

# Nasip za obranu od poplava armiran geosinteticima

---

Kovačić, Ivica

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:828294>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-17**

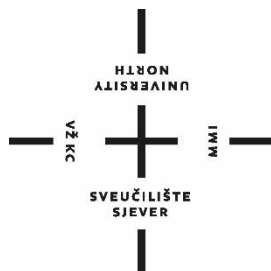


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**



DIPLOMSKI RAD br. 15/GRD/2020

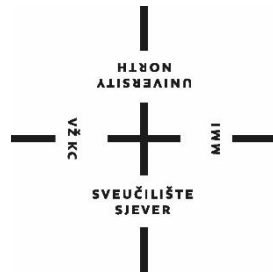
**NASIP ZA OBRANU OD POPLAVA**  
**ARMIRAN GEOSINTETICIMA**

Ivica KOVAČIĆ

Varaždin, listopad 2020.



**SVEUČILIŠTE SJEVER**  
**SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN**  
**Studij Graditeljstva**



DIPLOMSKI RAD br. 15/GRD/2020

**NASIP ZA OBRANU OD POPLAVA**  
**ARMIRAN GEOSINTETICIMA**

Student:  
Ivica KOVAČIĆ, 0825/336D

Mentor:  
dr. sc. Božo SOLDO, red.prof.

Varaždin, listopad 2020.



# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za graditeljstvo

STUDIJ diplomski sveučilišni studij Graditeljstvo

PRISTUPNIK Ivica Kovačić

MATIČNI BROJ 0825/336D

DATUM 15.09.2020.

KOLEGIJ Geotehničko inženjerstvo

NASLOV RADA Nasip za obranu od poplava armiran geosinteticima

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Flood defense embankment reinforced with geosynthetics

MENTOR dr.sc. Božo Soldo

ZVANJE redoviti profesor

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Bojan Đurin
2. prof.dr.sc. Božo Soldo
3. doc.dr.sc. Matija Orešković
4. doc.dr.sc. Aleksej Aniskin
5. \_\_\_\_\_

V Ž K K

M M I

## Zadatak diplomskog rada

BROJ 15/GRD/2020

OPIS

Pristupnik treba u radu općenito opisati geotehničke istražne radove potrebne za provedbu dobivanja laboratorijskih rezultata na osnovu kojih se vrši odabir parametara za projektiranje nasipa. Provesti potrebne računске analize nasipa prema hrvatskim normama Eurokod 7 i Eurokod 8. U sklopu rada potrebno je provesti analizu nasipa ojačanog geotekstilima. U zaključku je potrebno rezimirati važnost provođenja geoistražnih radova, odabira ispravnih parametara za računске analize te ulogu geosintetika kod poboljšanja karakteristika nasipa.

Rad treba sadržavati minimalno sljedeća poglavlja:

Sažetak

1. Uvod
2. Geotehnički istražni radovi
3. Laboratorijska ispitivanja
4. Geosintetici
5. Geotehnička analiza
6. Analiza rezultata
7. Zaključak

ZADATAK URUČEN

23.10.2020.

POTPIS MENTORA



## SAŽETAK

Nasip obrane od poplava su hidrotehničke inženjerske građevine koje imaju trajnu ili povremenu funkciju zaštite branjenog područja od poplava.

Kao i kod svih inženjerskih struktura projektant mora poznavati i razumjeti fizikalno - mehanička svojstva temeljnog tla i materijala izgradnje te kako će temeljno tlo i konstrukcija nasipa reagirati pod opterećenjem, bilo tijekom gradnje ili u fazi korištenja, u normalnim i ekstremnim operativnim uvjetima.

U svrhu definiranja parametara tla s kojim će se provesti analiza konstrukcije nasipa nužna je provedba kvalitetnih geomehaničkih istražnih radova i laboratorijskih ispitivanja.

Geotehnički istražni radovi se sastoje od terenskih istražnih radova i laboratorijskih ispitivanja.

Analizom dobivenih rezultata terenskih i laboratorijskih ispitivanja određuju su parametri materijala tla na lokaciji nalazišta i duž lokacije nasipa.

Geostatičkim proračunima dokazuje se da će građevinska konstrukcija tijekom njenog građenja i uporabe ispunjavati temeljni zahtjev mehaničke otpornosti i stabilnosti u dijelu u kojem tlo, stijena i podzemna voda utječu na tu građevinsku konstrukciju.

Proračuni u Republici Hrvatskoj se provode prema hrvatskim normama Eurokod 7 i Eurokod 8:

- norma HRN EN 1997-1:2012 i HRN EN 1997-1:2012/NA:2012
- norma HRN EN 1998-5:2011 i HRN EN 1998-5:2011/NA:2011.

Ako se geostatičkim proračunima ne dokaže stabilnost nasipa s predloženom geometrijom, uslojenosti temeljnog tla i materijalima sa nalazišta jedno od geotehničkih rješenja je poboljšanje svojstava tla i slojeva nasipa geosinteticima.

Svi neophodni proračuni za potrebe dimenzioniranja nasipa provedeni su u programu GEOSTUDIO 2016 (GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada).

## **ABSTRACT**

Flood defense embankments are hydraulic engineering structures that have a permanent or occasional function of protecting the protected area from floods.

As with all engineering structures the designer must know and understand the physical - mechanical properties of the foundation soil and construction materials, and how the foundation soil and embankment structure will react under load, either during construction or in the use phase under normal and extreme operating conditions.

In order to define the soil parameters with which the analysis of the embankment construction will be carried out, it is necessary to carry out quality geomechanical research works and laboratory tests.

Geotechnical investigation works consist of field research works and laboratory tests.

The analysis of the obtained results of field and laboratory tests determines the parameters of the soil material at the location of the site and along the location of the embankment.

Geostatic calculations prove that the building structure during its construction and use will meet the basic requirement of mechanical resistance and stability in the part in which the soil, rock and groundwater affect the building structure.

Calculations in the Republic of Croatia are carried out according to the Croatian standards Eurocode 7 and Eurocode 8:

- standard HRN EN 1997-1: 2012 and HRN EN 1997-1: 2012 / NA: 2012
- standard HRN EN 1998-5: 2011 and HRN EN 1998-5: 2011 / NA: 2011.

If geostatic calculations do not prove the stability with the proposed embankment geometry, layers of the foundation soil and materials from the excavation site, one of the geotechnical solutions is to improve the properties of the soil and embankment layers with geosynthetics.

All necessary calculations for the needs of embankment sizing were performed in the GEOSTUDIO 2016 program (GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada).



## **POPIS KORIŠTENIH KRATICA**

**ASTM** - američka norma za ispitivanje materijala (American Society for Testing and Materials)

**DIN** - njemačka norma (Deutsches Institut für Normung)

**EN** - europska norma (European Standard)

**GCL** - bentonitni tepih oblik nepropusnih geokompozita sastavljen od dva geotekstila, između kojih je ugrađena bentonitna glina.

**HRN** - hrvatska norma

**ISO** - međunarodna norma (International Organisation of Standardization)

**NU** –neporemećeni uzorak tla za provedbu laboratorijskih ispitivanja.

**OTU** - Opći Tehnički Uvjeti za radove u vodnom gospodarstvu (2011), propisuju uvjete izvedbe pojedinih vrsta radova u realizaciji projekata izgradnje, rekonstrukcije i održavanja vodno gospodarskih građevina.

**POG** - projekt organizacije građenja

**PPV** – pojava podzemne vode.

**PTU** - posebni tehnički uvjeti

**PU** – poremećeni uzorak tla za provedbu laboratorijskih ispitivanja

**RPV** - razina podzemne vode

**USBR** – eng. United States Bureau of Reclamation, Ured reklamacija Sjedinjenih Država

## SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
1.1.	Nasipi obrane od poplave .....	1
1.2.	Nalazište materijala za izradu nasipa.....	1
2.	GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI.....	5
2.1.	Terenski istražni radovi .....	7
2.2.	Istražno bušenje.....	7
2.3.	Standardni Penetracijski Test (SPT).....	10
2.4.	Mjerenje razine podzemne vode (RPV).....	12
2.5.	Ispitivanje džepnim penetrometrom i džepnom krilnom sondom.....	12
3.	LABORATORIJSKA ISPITIVANJA .....	14
3.1.	Određivanje granica konzistencije tla - (HRN U.B1.020/80).....	15
3.1.1.	Granica tečenja ( $W_L$ ).....	15
3.1.2.	Granica plastičnosti ( $W_p$ ) .....	17
3.2.	Određivanje optimalnog sadržaja vode - (HRN U.B1.038/68).....	19
3.3.	Ispitivanje granulometrijskog sastava materijala (ASTM D 422-07).....	22
3.3.1.	Ispitivanje granulometrijskog sastava metodom sisanja .....	22
3.3.2.	Ispitivanje granulometrijskog sastava materijala metodom areometriranja.....	24
3.4.	Ispitivanje čvrstoće tla izravnim posmikom .....	26
3.5.	Ispitivanje tla u edometru (HRN U. B1. 032).....	30
4.	GEOSINTETICI .....	33
4.1.	Vrste i namjena geosintetika.....	34
4.2.	Pregled vrsta geosintetika.....	35
4.3.	Primjena geosintetika.....	35
5.	GEOTEHNIČKA ANALIZA.....	38
5.1.	Općenito.....	38
5.2.	Računalne analize.....	39
5.3.	Analize stabilnosti.....	40

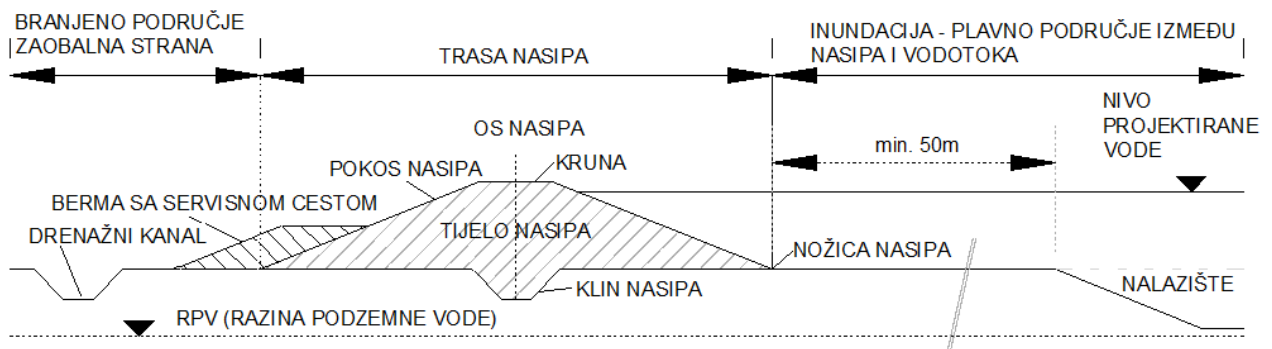
5.4. Model tla.....	40
5.5. Analiza globalne stabilnosti prema projektnom pristupu 3.....	40
5.5.1. Računski modeli.....	41
5.5.2. Projektne situacije.....	43
5.5.3. Geomreže.....	44
5.5.4. Računski model RM1 - nasip visine 4,0 m s pokosima u nagibu 1:2 krune širine 4,0 m.....	45
5.5.5. Računski model RM2 - nasip visine 4,0 m s pokosima u nagibu 1:3 krune širine 4,0 m.....	47
5.5.6. Računski model RM3 - nasip visine 4,0 m s pokosima u nagibu 1:2 sa ugrađenim ojačanjem geositeticima – geomreža.....	49
5.6. Analiza stabilnosti za seizmičko opterećenje.....	51
5.6.1. Projektna situacija.....	51
5.6.2. Rezultati proračuna.....	53
5.7. Analize procjeđivanja i hidrauličke stabilnosti.....	55
5.7.1. Model tla.....	56
5.7.2. Prikaz rezultata proračuna.....	57
6. ANALIZA REZULTATA.....	59
6.1. ANALIZA STABILNOSTI.....	59
6.2. ANALIZA STABILNOSTI ZA POTRES.....	60
6.3. ANALIZA PROCJEĐIVANJA.....	60
7. ZAKLJUČAK.....	61
8. IZJAVA O AUTORSTVU.....	62
9. LITERATURA.....	63

## 1. UVOD

### 1.1. NASIPI OBRANE OD POPLAVE

U nasute građevine spadaju građevine najrazličitijih namjena. Mogu biti projektirane i strogo kontrolirano građene, od strogo kontroliranog gradiva, a mogu biti i nagurane hrpe raznorodnog materijala od industrijskih ostataka, jalovine te komunalnog otpada. U svakom od ovih slučajeva primjenjuju se prikladna geotehnička rješenja.

Način izvedbe nasute građevine ovisi o nizu čimbenika, o namjeni nasipa, gradivu od kojeg su izvedeni i prostora na kojem mogu biti izvedeni. Nasute građevine koje zadržavaju i usmjeravaju vode građene su u svim poznatim davnim civilizacijama. [4]



Slika 1.1. Shematski prikaz nasipa osnovnim elementima

Temeljno tlo su tla koja se nalaze ispod nasipa i ona uzajamno djeluju s nasipom. Temeljno tlo može biti prilično složeno i promjenjivih fizikalno mehaničkih karakteristika u pogledu čvrstoće ili propusnosti.

Temeljna tla nisu strogo sastavni dio nasipa, ali ih valja uzeti u obzir pri projektiranju nasipa.

### 1.2. NALAZIŠTE MATERIJALA ZA IZRADU NASIPA

Nalazišta materijala za izgradnju nasipa obrane od poplava uglavnom su površine poljoprivrednog, livadnoga, rjeđe šumskog područja. Sa nalazišta se uklanja površinsko raslinje, humus i eventualni drugi slojevi sve do slojeva koji su pogodni za ugradnju prema preporukama iz geotehničkog elaborata, tj. iz rezultata istražnih radova.

Poželjno je da se nalazišta glinenog materijala nalaze neposredno uz trasu izgradnje nasipa kako bi projekt bio ekonomski što prihvatljiviji, tj. kako bi se smanjila izgradnja pristupnih cesta i skratila duljina transporta.

Nalazišta se lociraju na minimalnu udaljenost 50 m od nožice nasipa kako bi se izbjegli negativni utjecaji iskopavanja po stabilnost nasipa i temeljnog tla.



Slika 1.2. Lokacija nalazišta u fazi pripreme za eksploataciju



Slika 1.3. Nalazište u fazi eksploatacije

Izvedbom istražnih bušotina, raskopa te uzorkovanjem, terenskim i laboratorijskim ispitivanjem uzoraka tla određuje se uslojenost, sastav i svojstva materijala tla.



*Slika 1.4. Uređeno nalazište*

Istražne radove na nalazištima potrebno je provoditi prije faze projektiranja nasipa, a kako bi se definirale karakteristike materijala za projektiranje, dostupne količine materijala, uvjeti ugradnje materijala, pozicije pristupnih cesta.

Po izvedbi istražnih radova daje se :

- procjena iskoristivosti nalazišta za iskop na površinama nalazišta
- svojstva tla na lokaciji nalazišta – pogodnost materijala

Sukladno Općim tehničkim uvjetima (OTU - poglavlje 2, točka 2-09.1, tablica 2-09.1-1) za radove u vodnom gospodarstvu, Knjiga 1: Regulacijske i zaštitne građevine; Hrvatske vode, Zagreb, ožujak 2011. vrijede sljedeći kriteriji ugradnje zemljanih materijala iskopne kategorije C (glina). [10]

Tablica 1. Prethodna ispitivanja materijala za izradu nasipa od zemljanih materijala

Tehničko svojstvo	Ispitna norma	Uvjeti kvalitete
Sadržaj vode	HRN U.B1.012 ili CEN ISO/TS 17892-1	Ispituje se
Koeficijent nejednolikosti (granulometrijski sastav)	HRN U.B1.018 ili CEN ISO/TS 17892-4	d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub> ≥ 9
Udio sitnih čestica		>50%
<sup>1)</sup> Udio organskih tvari	HRN U.B1.024/68	<6%
Suha prostorna masa	HRN EN 13286-2 (standardni Proctor)	≥1,50 Mg/m <sup>3</sup> za nasipe visine do 3,0 m >1,55 Mg/m <sup>3</sup> za nasipeve od 3,0 m
Optimalan sadržaj vode, w <sub>opt</sub>		≤ 25%
Granica tečenja, w <sub>L</sub>	HRN U.B1.020 ili CEN ISO/TS 17892-12	≤ 65%
Indeks plastičnosti, I <sub>p</sub>		≤ 30%
Bubrenje nakon 4 dana potapanja u vodi	HRN U.B1.042 ili HRN EN 13286-47	< 4%

Napomena <sup>1)</sup> ukoliko materijal sadrži 6 do 10% organskih tvari njegovu pogodnost za ugradnju treba dokazati detaljnim laboratorijskim ispitivanjima.

Program terenskih i laboratorijskih istražnih radova mora biti prilagođen svojstvima građevine i nalazišta te uputama i zahtjevima iz posebnih uvjeta gradnje ili projektnog zadatka.

## 2. GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADovi

Kao i kod svih inženjerskih struktura projektant mora poznavati i razumjeti fizikalno - mehanička svojstva materijala izgradnje i kako će građevina reagirati pod opterećenjem, bilo tijekom gradnje ili dugoročno u normalnim i ekstremnim radnim uvjetima.

Karakteristike tla na kojem se nasip temelji i materijala od kojega je nasip izgrađen ili će biti izgrađen, promatran kroz geotehničke istražne radove osnova je za postizanje zahtijevanih temeljnih zahtjeva građevine. Tla su prirodni materijali i njihova fizikalno - mehanička svojstva su znatno promjenjivija od industrijsko- inženjerski proizvedenih materijala (npr. čelik, beton, opeka itd...).

Zbog taloženja tla u povijesti slojevi mogu sadržavati lokalizirane malformacije u kojima se svojstva tla značajno razlikuju od općeg raspona svojstava koja su primjenjiva na šire područje tla.

EC7 (Eurokod 7: Geotehničko projektiranje, HRN EN 1997-1:2012 i HRN EN 1997 1:2012/NA:2012) 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.

Prije početka projektiranja za planiranu građevinu izrađuje se program istražnih radova u skladu sa pripadajućom geotehničkom kategorijom sukladno preporukama iz EC7.

EC 7 predviđa podjelu građevina prema važnosti u tri geotehničke kategorije iz naredne tablice.

Tablica 2. Geotehničke kategorije prema EC 7 [8]

Geotehnička kategorija 1	Uključuje samo male i jednostavne građevine sa zanemarivim rizikom. Uključuje iskope do dubine od 2,0 m.
Geotehnička kategorija 2	Uključuje uobičajene tipove građevina, plitke i druge temelje, zidove i druge potporne građevine, iskope, <u>nasipe</u> i druge zemljane građevine, koje zahtijevaju kvantificirane geotehničke podatke, ali ne zahtijevaju više od rutinskih postupaka u ispitivanju tla.
Geotehnička kategorija 3	U njega su svrstane sve građevine koje ne pripadaju u prvu i drugu kategoriju.



Nasip spada u geotehničku kategoriju 2 te je nužno pristupiti provedbi geotehničkih istražnih radova sa prikazom rezultata ispitivanja i preporukama karakterističnih parametara tla u geotehničkom elaboratu.

Geotehnički istražni radovi se sastoje od terenskih istražnih radova u sklopu kojih se provodi „in situ“ ispitivanja i uzorkovanje tla za laboratorijska ispitivanja uzimanjem poremećenih (PU) i neporemećenih uzoraka tla (NU).

Cilj geotehničkih istražnih radova je prikupiti podatke o karakteristikama bitnih konstruktivnih dijelova građevine na predviđenoj lokaciji gradnje uz davanje preporuka za projektiranje i izvođenje zahvata.

Zbog ispravnog i sigurnog projektiranja nasipa nužna je provedba kvalitetnih istražnih radova radi utvrđivanja fizikalno - mehaničkih karakteristika tla:

- svojstva tla na kojem se nasip temelji
- svojstva tla na nalazištu, tj. ispitivanja materijala od kojeg se gradi nasip.



*Slika 2.1. Geotehnički istražni radovi na nalazištu*

## 2.1. TERENSKI ISTRAŽNI RADOVI

U sklopu terenskih istražnih radova izvode se geotehničke istražne bušotine. Istražne bušotine se izvode strojno - bušačim garniturama i motornim garniturama uz ručni potisak.

Bušenja su izvode rotacijski uz kontinuirano jezgrovanje, a od zarušavanja stjenke bušotina se štiti čeličnim kolonama.

Terenski istražni radovi se sastoje sljedećih segmenata:

- istražno bušenje uz geotehnički nadzor, identifikaciju i klasifikaciju bušaće jezgre.
- uzorkovanje (PU) poremećenih i (NU) neporemećenih uzoraka.
- „in-situ“ ispitivanja standardnog penetracijskog testa (SPT-a).
- mjerenje razine podzemne vode (RPV)
- terensko ispitivanje džepnim penetrometrom i
- terensko ispitivanje krilnom sondom.

## 2.2. ISTRAŽNO BUŠENJE

Jezgra se deponira u sanduke širine 1,0 metara. Jezgra se pažljivo odlaže u sanduke od lijeva na desno, odozgora prema dolje. Nakon slaganja slijedi fotografiranje jezgre te njeno obilježavanje nazivom bušotine i jediničnom dubinom bušenja.



Slika 2.2. Prikaz rezultata geoistražnog bušenja



Opis uzorkovane jezgre sa prognoznom identifikacijom, te odabranim PU i NU uzorcima tla za laboratorijska ispitivanja, provodi se na način usvojen u praksi tako da se prema određenom postupku upisuju sve osobine materijala u za to predviđene obrasce terenske identifikacije i klasifikacije tla.

Zapis terenske identifikacija i klasifikacija tla pri izvođenju geoistražnih radova geotehničaru služi kao smjernica u odabiru uzoraka za provedbu laboratorijskih ispitivanja.

Geotehničar pri zadavanju programa laboratorijskih ispitivanja može odbaciti dio uzoraka ako smatra da nisu relevantni za projektiranje građevine. Isto tako može zatražiti dodatna ispitivanja tla i na zahtjev sudjelovati kod obrade uzoraka u laboratoriju.

BUŠOTINA: S-043-20-02		NALOG:		DATUM: 09.09/2009	
ALIAS (VANJSKA OZNAKA):		NADZOR: VLAKA		SAT:	
GRABEVINA:		BUŠAČI: BUNČIĆ			
LOKACIJA: KEGAR 5-1		GARNITURA: KRETTA 46			

DUBINA	PU od / do / oznaka	NU od / do / oznaka	D <sub>max</sub> ZRNA [mm]	OBLIK ZRNA	MIRIS	BOJA	KONZIST. / ZBIEN.	OPIS TLA I OSTALA ZAPAZANJA	KLASIF. SIMBOL	PREKIDI / NASTAVAK (VRJEME) (DUBINA)	BUŠAČ PROMJER	ZAŠTITA (SPLAKA) (STJENKE)
od: 6,70 do: 7,80	7,29 7,39 9	7,29 7,39 9						PJESAK KRATKOST, SIJAN SADRŽI SJITNE ODLOMKE, DUNO MEDE BOJE	SM	P / N (.....) (.....m)		
od: 7,80 do: 9,00	8,19 8,29 10	8,19 8,29 10						PRAM PEKOVITI MISOZ KRATKOSTI DO PJESAK PRATIMAST, DUNO MEDE BOJE	HC/SM	P / N (.....) (.....m)		
od: 9,00 do: 10,50	9,39 9,89 12	9,39 9,89 12						PJESAK PRATI MAST, DUNO MEDE BOJE SADRŽI VEŠTO VALJITICA ZALUNA	SM	P / N (.....) (.....m)		
od: 10,50 do: 11,70	11,29 11,59 13	11,29 11,59 13						PJESAK SIJAN, SIJNO MEDE BOJE, PROBRAN DUNO MASTOM, SADRŽI PUGOVI VALJITICI SADRŽI ZALUNA	SP-SM	P / N (.....) (.....m)		
od: 12,70 do: 13,00	12,59 12,69 14	12,59 12,69 14						PJESAK MEĐANJE KUPAN, KRATKASTI, SADRŽI VALJITICE ZALUNA, PUNOČIŠE VEŠTINE DO 3CM	SM	P / N (.....) (.....m)		

TERENSKI ZAPISNIK - SPT ISPITIVANJE (O_POL-5.4-42.01)		NAPOMENE IZ SPT:		OSTALA ZAPAZANJA:		
ID	DATUM	SAT	od [m]	do [m]	RPV SPT [m]	RPV / RPV [m]
					N/S	
					N/S	
					N/S	
					N/S	
					N/S	
					N/S	
					N/S	
						ser / ukupno
						2 /

Slika 2.3. Zapisnik vizualne identifikacija i klasifikacija tla

### 2.3. STANDARDNI PENETRACIJSKI TEST (SPT).

Zbijenost tla se ispituje "in situ" metodom Standardnog Penetracijskog Testa (SPT).

Standardni penetracijski pokus je zabijanje pribora sa cilindrom udarcima utega mase od 64 kg i pada sa visine pada od 76 cm.

U nekoherentnim tlima koristi se cilindrični pribor sa vrhom u obliku šiljka dok se u koherentnim tlima za ispitivanje koristi šuplji cilindar sa nožem na vrhu.

Rezultat ispitivanja je broj udaraca za prodiranje pribora u 2 intervala po 15 cm. Korelacijskim tablicama se iz broja udaraca u ovisnosti izvođenja ispitivanja sa šiljkom ili „nožem“ određuje relativna zbijenost tla.

Rezultati terenskog ispitivanja SPT-a služe za:

- procjenu parametara čvrstoće i relativne zbijenosti nekoherentnih materijala prema postojećim korelacijama.
- za uspostavljanje neposrednih korelacija SPT s rezultatima laboratorijskih pokusa.

Na svakoj dubini ispitivanja bilježe se slijedeći podaci: dubina ispitivanja, profil zacjvljenja, trenutna razina podzemne vode i tip pribora ispitivanja (šiljak ili šuplji cilindar).

Spuštanjem pribora ispitivanja na bušaćim šipkama u bušotinu bilježi se dubina do dna bušotine, te eventualna dubina prodiranja pribora u tlo pod težinom seta opreme za ispitivanje.

Ispitivanje se izvodi brojanjem udaraca bata na sljedeći način:

- za penetraciju od 15 cm ( $N_1$ ).
- za narednih 30 cm (2 koraka po 15cm) broje se udarci ( $N_2$  i  $N_3$ ) za svakih 0,15 m penetracije, a čiji zbroj daje  $N$  mjernog mjesta ( $N=N_2+N_3$ ).

Ukoliko se postigne 50 i više udaraca u bilo kojem od tri koraka ispitivanja, bilježi se ukupna dubina prodiranja pribora uz napomenu da je zabilježeno  $N>50$  udaraca.

Tablica 3. Korelacijska tablica vrijednosti SPT-a i svojstava nekoherentnog tla

STUPANJ ZBIJENOSTI	CPT q <sub>c</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	SPT N [ud./st.]	RELATIVNA GUSTOĆA Dr [%]	KUT UNUTARNJEG TRENJA φ		MODUL STIŠLJIVOSTI M <sub>s</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	
				Peck 1974	Meyenhof 1956	Pijesak sitan i srednji	Krupan pijesak i šljunak
vrlo rastresit	<2	<4	<20	<29	<30	<3,5	<8,5
rastresit	2-4	4-10	20-40	29-30	30-35	3,5-7,5	8,5-15
srednje zbijen	4-12	10-30	40-60	30-35	35-40	7,5-15	15-30
zbijen	12-20	30-50	60-80	36-41	40-45	15-30	30-60
vrlo zbijen	>20	>50	80-100	>41	>45	>30	>60

Korelacijska tablica vrijednosti SPT-a i svojstava koherentnog tla (glina)

KONZISTENTNO STANJE	SPT UDAR / KORAK	q <sub>u</sub> [Kn/m <sup>2</sup> ]	M <sub>v</sub> [Kn/m <sup>2</sup> ]	τ <sub>f</sub> [Kn/m <sup>2</sup> ]	I <sub>c</sub> [1]	TERENSKA IDENTIFIKACIJA
ŽITKO	<2	< 25	< 300	< 12,5	<0	može se utisnuti šaka
MEKO	PLASTIČNO	2 - 4	25 - 50	200 - 600	12,5 - 25	0 - $\frac{1}{3}$ može se lako utisnuti palac ne može se valjati
SREDNJE		4 - 8	50 - 100	500 - 1.500	25 - 50	$\frac{1}{3} - \frac{2}{3}$ palac se može utisnuti laganim pritiskom može se valjati valjčić φ<3mm
KRUTO		8 - 15	100 - 200	1.200 - 5.000	50 - 100	$\frac{2}{3} - 1$ može se ostaviti otisak palca samo uz jaki pritisak na granici mogućnosti valjanja do φ 3mm, a da se ne drobi
POLUČVRSTO	15 - 30	200 - 400	5.000 - 20.000	100 - 200	$1 < \frac{w_L - w_s}{I_p}$	može se lako zarezati noktom drobi se kod φ 3mm, ali se može prignječiti
ČVRSTO	> 30	> 400	> 20.000	>200	$> \frac{w_L - w_s}{I_p}$	teško se zarezuje noktom gnječenjem se mrvi

## 2.4. MJERENJE RAZINE PODZEMNE VODE (RPV).

U sklopu izvođenja istražnih radova prati se pojava podzemne vode (PPV) i razina podzemne vode (RPV). Mjerenja su vrše mjeračem podzemne vode, a vrijednosti izmjerenih dubina upisuju se u obrasce terenske klasifikacije materijala.

Rezultati terenskog mjerenja RPV-a ovisi o trenutnim hidrološkim uvjetima i trenutnoj razini podzemnih voda. Za preciznije podatke o razinama RPV-a u bušotinu je moguće ugraditi piezometarsku instalaciju kako bi se opažanje moglo vršiti u dužem periodu.

## 2.5. ISPITIVANJE DŽEPNIM PENETROMETROM I DŽEPNOM KRILNOM SONDOM

Na jezgri bušenja koherentnim materijalima vrši se ispitivanje jednoosne tlačne čvrstoće džepnim penetrometrom -  $q_u$  (kPa), te ispitivanje vršne i rezidualne nedrenirane čvrstoće džepnom krilnom sondom -  $c_u$  i  $c_{ur}$  (kPa).

Džepni penetrometar je ručni instrument za ispitivanje približne vrijednosti jednoosne tlačne čvrstoće koherentnog tla na terenu ili u laboratoriju. Instrument se sastoji od kućišta sa mjernom skalom i pokazivačem unutar kojeg se nalazi kalibrirana opruga.

Mjerenje se izvodi utiskivanjem mjerne sonde penetrometra u tlo do dubine 6,4 mm te očitavanja vrijednosti sa mjerne skale. Mjerni raspon se kreće od 0 do maksimalno 450 kPa.



Slika 2.4. Džepni penetrometar i džepna krilna sonda

Džepna krilna sonda je ručni instrument za ispitivanje približne vrijednosti vršne i rezidualne nedrenirane posmične čvrstoće koherentnog tla na terenu ili u laboratoriju. Instrument se sastoji od kućišta sa pokazivačem i mjernom skalom na koji se pričvršćuje nastavak (disk) sa lopaticama na jednoj strani.

Mjerenje se izvodi utiskivanjem nastavka sa lopaticama u tlo te rotiranjem kućišta u smjeru kazaljke na satu do sloma tla. Nakon sloma tla očitava se vrijednost vršne čvrstoće sa mjerne skale.

Potom se radi mjerenje rezidualne čvrstoće na istom mjestu. Pokazivač se vraća na početni položaj (0), a princip mjerenja je isti kao i kod mjerenja vršne čvrstoće. Ovisno o konzistentnom stanju tla koristi se jedan od tri raspoloživa nastavka.

Najveći nastavak ima mjerni raspon 0-20 kPa, a koristi se u mekanim tlima. Srednji nastavak ima mjerni raspon 0-100 kPa dok najmanji nastavak ima mjerni raspon 0-250 kPa te se koristi u tvrdim glinama.



### 3. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

Laboratorijska ispitivanja PU i NU uzoraka tla provode su u geomehaničkim laboratorijima. Ispituju se fizikalna i mehanička svojstva tla uzorkovanog geoistražnim radovima.

Radi osiguranja kvalitete i pouzdanosti rezultata ispitivanja nužno je provesti ih u skladu s važećim propisima i normama.

Rezultati laboratorijskih ispitivanja prikazuju se na geotehničkim presjecima bušotina, u ispitnim izvještajima i radi lakše preglednosti u zbirnim tablicama rezultata.

Na reprezentativnim poremećenim (PU) i neporemećenim (NU) uzorcima tla rade se laboratorijska ispitivanja prikazana u narednoj tablici.

Tablica 4. Laboratorijska ispitivanja uzoraka tla

Vrsta ispitivanja	Oznaka	Jed.	Norma
<b>Razredbena ispitivanja, raspoznavanje i opis tla</b>			
Određivanje sadržaja prirodne vode (vlažnosti)	$w_o$	%	HRN U. B1. 012
Određivanje ukupne gustoće mase (zapreminska težina)	$\gamma$ i $\gamma_d$	kN/m <sup>3</sup>	HRN U. B1. 016
Određivanje gustoće mase čestica (specifična težina)	$\gamma_s$	kN/m <sup>3</sup>	HRN U. B1. 014
Određivanje granica konzistentnih stanja (Atterbergove granice)	$w_L$ i $w_P$	%	HRN U. B1. 020
Granulometrijska analiza	--	%	ASTM D-422
<b>Kemijsko ispitivanje tla</b>			
Određivanje sadržaja organske materije	--	%	HRN U. B1. 024
<b>Ispitivanje čvrstoće tla</b>			
Jednoosno tlačno ispitivanje s praćenjem deformacija - pritisna čvrstoća - relativna deformacija	$q_u$ $\epsilon$	kPa %	ASTM D2850
Konsolidirano ispitivanje izravnim posmikom - kohezija - kut unutrašnjeg trenja	$c$ $\phi$	kPa °	HRN U. B1. 028
<b>Ispitivanje stišljivosti i deformiranja tla</b>			
Edometarsko ispitivanje stišljivosti	$M_s$	MPa	HRN U. B1. 032
<b>Ispitivanje zbijenosti tla</b>			
Ispitivanje zbijenosti (standardni Proctor)	$w_{opt}$ $\gamma_{dmax}$	% kN/m <sup>3</sup>	HRN U. B1. 038
<b>Ispitivanje propusnosti tla</b>			
Određivanje koeficijenta propusnosti (hidrauličke provodljivosti) uz promjenjiv hidraulički gradijent u edometru	$k$	(cm/s)	HRN U. B1. 034

### 3.1. ODREĐIVANJE GRANICA KONZISTENCIJE TLA - (HRN U.B1.020/80)

Granice plastičnih stanja, odnosno Atterbergove granice, koriste se za klasifikaciju sitnozrnatih tala.

Koherentna tla klasificiraju se prema plastičnosti pomoću granice tečenja ( $W_L$ ) i indeksa plastičnosti ( $I_P$ ).

Klasifikacija tla prema USBR, oznake sa značenjima:

GW	Dobro graduiran šljunak
GP	Slabo graduiran šljunak
GM	Prašinasti šljunak
GC	Glinoviti šljunak
SW	Dobro graduiran pijesak
SP	Slabo graduiran pijesak
SM	Prašinasti pijesak

SC	Glinoviti pijesak
CL	Glina niske plastičnosti
ML	Prah niske plastičnosti
OL	Organska glina niske plastičnosti
CH	Glina visoke plastičnosti
MH	Prah visoke plastičnosti
OH	Organska glina niske plastičnosti

#### 3.1.1. GRANICA TEČENJA ( $W_L$ )

Pomoću Casagrandeovog aparata se određuje granica tečenja ( $W_L$ )

Casagrandeov aparat je uređaj s pokretnom metalnom zdjelicom standardiziranog oblika. Uređaj podiže zdjelicu na visinu od 1 cm te ju pušta da slobodnim padom pada na bakelitnu podlogu.

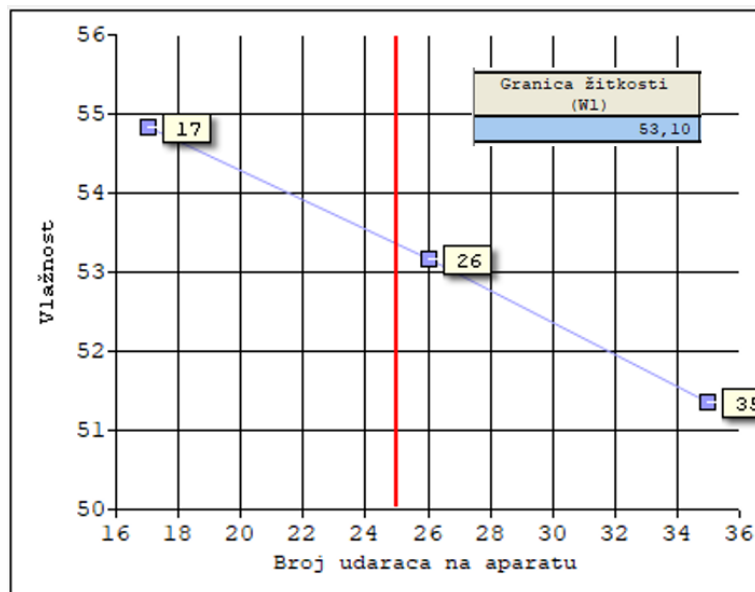
Na uzorak postavljen za ispitivanje u zdjelicu se radi žljeb standardiziranim nožem. Zdjelica brzinom od 2 udarca u sekundi udara u podlogu te se ispitivanje prekida kad se procjep sastavi u duljini od 12 mm.



Slika 3.1. Casagrandeov uređaj sa ispitnim uzorkom

Ispitivanje se provodi na uzorcima tla sa tri različita sadržaja vlažnosti, a broj udaraca Casagrandeovog uređaja ne smije biti manji od 10, niti veći od 40.

Nakon toga 3 različita uzorka se nose na određivanje mase i sušenje. Za svaki uzorak se određuje vlažnost (%) i broj udaraca (n), te se povuče se pravac kroz tri točke i odredi vlažnost  $W_L$  (%) za 25 udaraca.



Slika 3.2. Dijagram određivanja granica plastičnosti

### 3.1.2. GRANICA PLASTIČNOSTI ( $W_p$ )

Za određivanje granica plastičnosti ne treba poseban aparat. Uzorak se priprema u mekoplastičnom stanju. Uzorci materijala se valjaju na neupijajućoj podlozi i formiraju u valjčice promjera 3 mm.

Izrađeni valjčići moraju imati površinske pukotine ali moraju zadržati svoju cjelovitost.

Ispravno su izrađeni samo oni valjčići koji su počeli pucati na debljini od 3 mm. Oni se važu se i stavljaju se sušiti. Vaganjem suhog uzorka dobivamo razliku u postotku vlažnosti vlažnog i suhog uzorka te određujemo granicu plastičnosti  $W_p$  preko formula.



Slika 3.3. Pripremljeni uzorci valjčića kod ispitivanje granica plastičnosti

Na slici niže je prikazan je dijagram plastičnosti koji služi za klasificiranje koherentnih materijala.

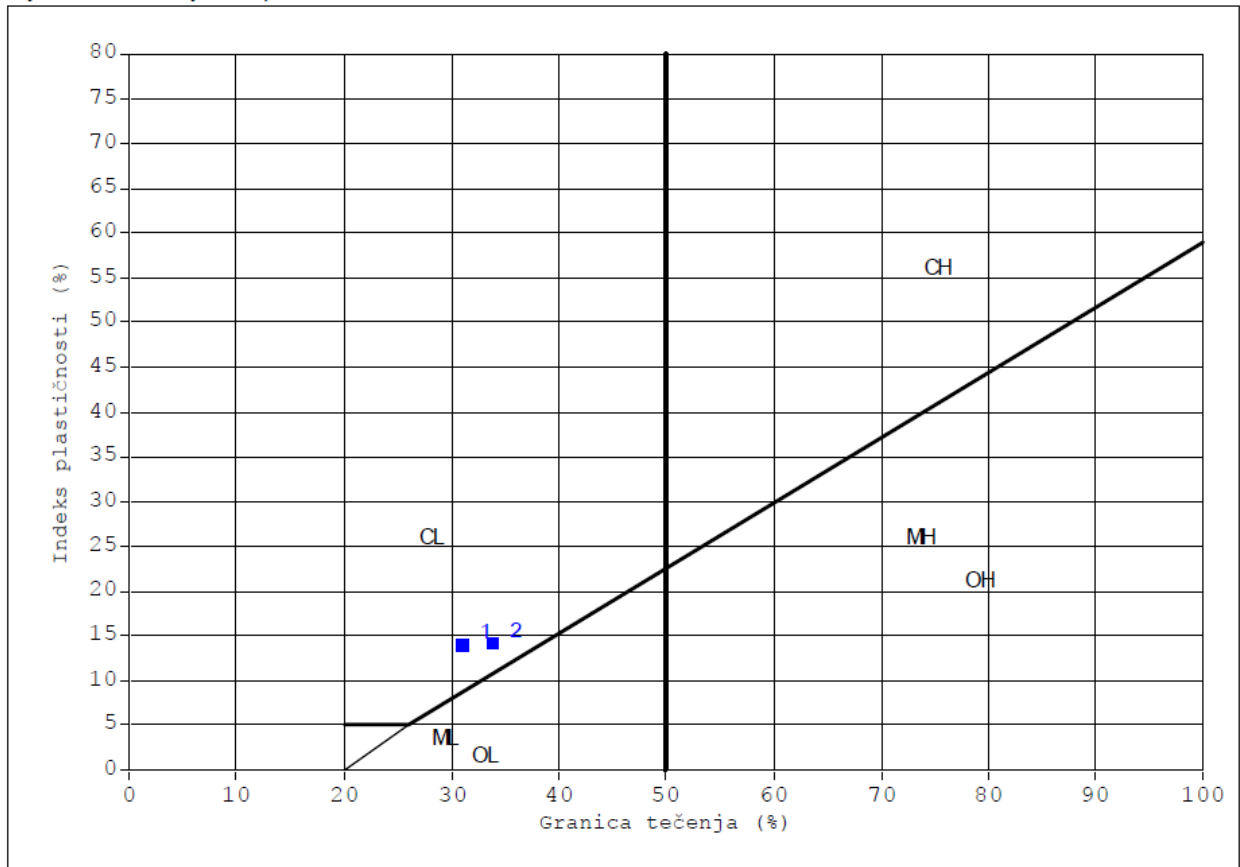
Na y osi nalaze se vrijednosti granice tečenja  $w_L$ , a na x osi nalaze se vrijednosti indeksa plastičnosti  $I_p$ .

$$I_p = w_L - w_p$$

$I_p$  - indeks plastičnosti

$w_L$  - granica tečenja

$w_p$  - granica plastičnosti



rbr.	bušotina/jama/ stacionaža	dubina / kota (m)	oznaka JLO ispitivanja	simbol	wl (%)	wp (%)	IP (%)	os (%)	pv / ps
1	S-058-19-01	0,50-0,70	S-058-19-01-01-1-05	CL	30,96	17,05	13,91	0,00	pv
		Konkreције do 2 mm.							
2	S-058-19-04	0,50-0,70	S-058-19-04-01-1-05	CL	33,76	19,53	14,23	0,00	pv
		Konkreције do 2 mm							

**LEGENDA:**

CH - Glina anorganska visoke plastičnosti    MH - Prah visoke plastičnosti    SM - Prašnasti pijesak    OH - Glina organska visoke plastičnosti  
 CL - Glina anorganska niske plastičnosti    ML - Prah niske plastičnosti    SC - Zaglinjeni pijesak    OL - Glina organska niske plastičnosti

OS - % ostatka na situ No.40(0,425mm) %    pv - priprema u prirodno vlažnom stanju    ps - priprema u prirodno suhom stanju

Slika 3.4. Prikaz rezultata ispitivanja određivanja granica konzistencije tla

### 3.2. ODREĐIVANJE OPTIMALNOG SADRŽAJA VODE - (HRN U.B1.038/68)

Određivanje optimalnog sadržaja vode pri maksimalnoj zbijenosti tla izvodi se laboratorijskim ispitivanjem sukladno normi HRN U.B1.038.

Ovim se laboratorijskim ispitivanjem se određuje optimalan sadržaj vode ( $w_{opt}$  - %m/m) i maksimalna suha gustoća tla ( $\rho_{d\ max}$  - kg/m<sup>3</sup>).

U laboratoriju se provodi obrada i ispitivanje uzoraka tla koje je predviđeno za ugradnju i/ili zbijanje na terenu – uzorci sa slojeva nasipa ili uzorci temeljnog tla.

U laboratoriju se priprema 5 uzoraka tla sa unaprijed određenim različitim udjelima vode - vlažnosti.



*Slika 3.5. Laboratorijska aparatura za Proctor-ov pokus*

Količina vode koja se dodaje prosušanim uzorcima kreće se u rasponima od 2% do 4%, a ovisi o očekivanoj optimalnoj vlažnosti (za koherentna tla - iskustveno prema granici krutosti određene preko Atterbergovih granica HRN U. B1. 020  $\sim w_{opt} = w_p - 2\%$ ).

Na pripremljenim uzorcima tla Proctor-ov pokus vrši se laboratorijski zbijanjem primjenom:

- energije zbijanja  $592,7 \text{ kNm/m}^3$  – tlo se zbija u 3 sloja po 25 udaraca, bat  $24,51 \text{ [N]} = 2,5 \text{ [kg]}$ , pad s visine od  $304,8 \pm 1,3 \text{ mm}$  - standardni Proctor.
- energije zbijanja  $2.693 \text{ kNm/m}^3$  – tlo se zbija u 5 slojeva po 56 udaraca, bat  $44,48 \text{ [N]} = 4,53 \text{ [kg]}$ , pad s visine od  $457,2 \pm 1,3 \text{ mm}$  - modificirani Proctor.

Nakon provedenog zbijanja vaganjem se određuje masa zbijenog uzorka unutar kalupa i uzorkuje se reprezentativni uzorak materijala za određivanje vlage prema HRN U. B1. 012.

Gustoća tla ( $\rho$ ) računa se prema:

$$\rho = \frac{(M_{cp} - M_c)}{V} \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

Suha gustoća tla ( $\rho_d$ ) računa se prema:

$$\rho_d = \frac{\rho}{1 + \frac{w}{100}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]$$

gdje je:

$M_{cp}$	[g]	- masa cilindra i uzorka u vlažnom stanju
$M_c$	[g]	- masa cilindra bez ispitnog uzorka
$V$	[ $\text{cm}^3$ ]	- volumen cilindra
$w$	[%]	- vlažnost
$\rho$	[ $\text{kg/m}^3$ ]	- suha zapreminska masa

Zbog korištenja rezultata ispitivanja u daljnjim geotehničkim proračunima praktično je iskazivanje rezultata suhe gustoće preko zapreminske težine ( $\gamma_{d \max} - \text{kN/m}^3$ ).

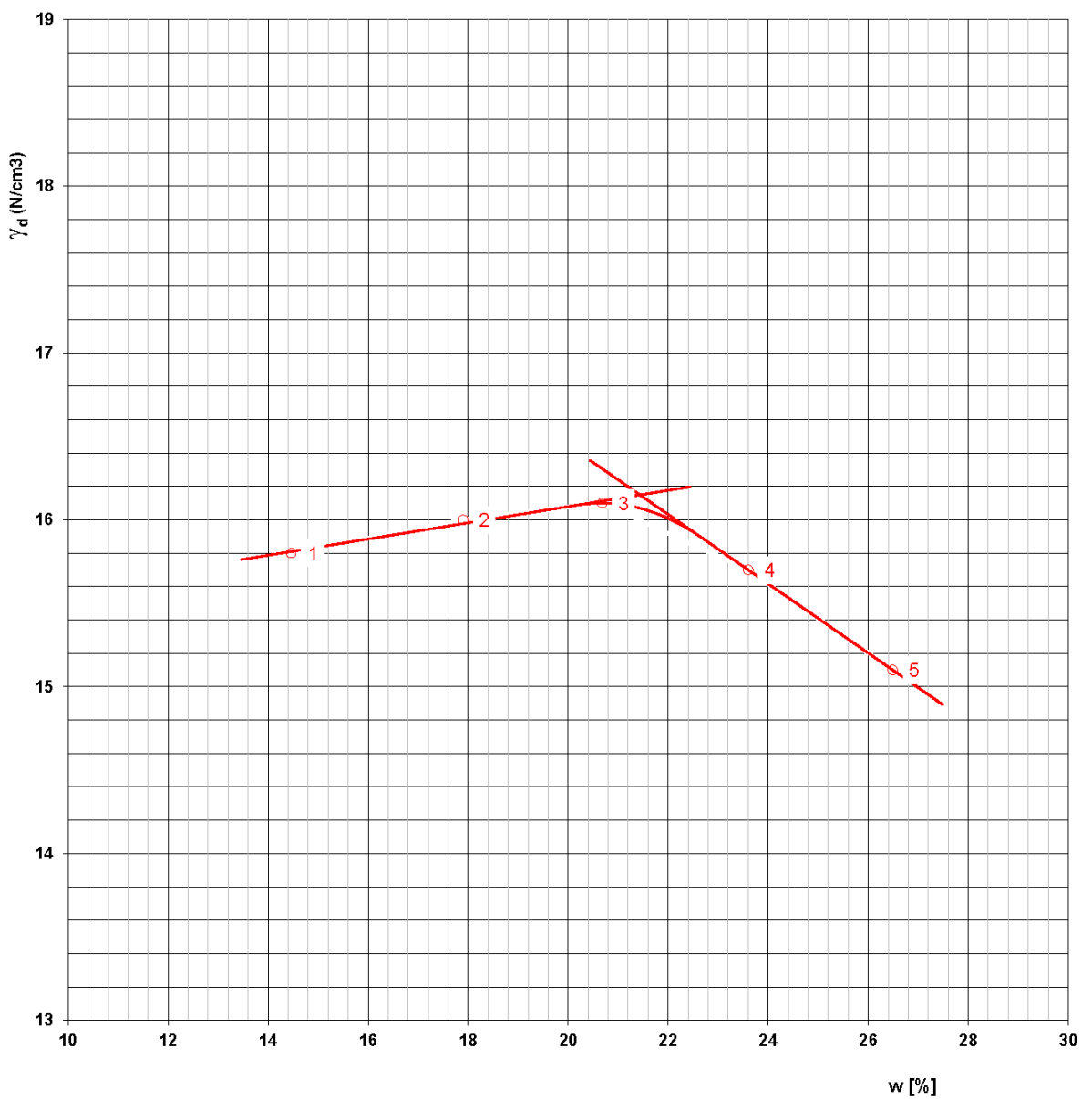
$$\gamma_{d \max} = g \times \rho_d$$

gdje je:

- $\gamma_{d \max}$  [kN/m<sup>3</sup>] - suha zapreminska težina
- $g$  [m/s<sup>2</sup>] - gravitacijsko ubrzanje
- $\rho_d$  [kg/m<sup>3</sup>] - suha zapreminska masa

Rezultati određivanja optimalnog udjela vode su od ključne uloge kod određivanja tehnologije ugradnje slojeva nasipa, tj. dali je slojeve potrebno prosušivati ili dodatno vlažiti.

Vlažnost	$W_{opt}$	20,7	[%]
Suha težina	$\gamma_d$	16,10	[kN/m <sup>3</sup> ]



Slika 3.6. Prikaz rezultata ispitivanja optimalnog sadržaja vode



Rezultati određivanja optimalne gustoće tla ( $\rho_{d \max}$ ) sudjeluju u daljnjem ocjenjivanju kvalitete ugrađenog sloja. Ispitivanje zbijenih slojeva se radi preko stupnja zbijenosti iz izvađenih uzoraka iz nasipa kojima se određuju vlažnost ( $w$ ) i suha gustoća ( $\rho_{d \text{uzorka}}$ ).

Stupanj zbijenosti računa se prema slijedećem izrazu:

$$S_z = \frac{\rho_{d \text{uzorka}}}{\rho_{d \max}} \times 100 \quad [\%]$$

### 3.3. ISPITIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA MATERIJALA (ASTM D 422-07)

Granulometrijski sastav tla podrazumijeva prikaz masa pojedinih frakcija zrnatih i koloidnih čestica, izraženih u postocima ukupne mase ispitnog uzorka tla.

Poznavanje granulometrijskog sastava služi za klasifikaciju tla te za izvođenje korelacijskih veličina svojstava tla.

Granulometrijski sastav zrna većih od 75  $\mu\text{m}$  (sito No. 200) određuje se sijanjem, a zrna manjih od 75  $\mu\text{m}$  određuje se areometriranjem kroz proces sedimentacije.

#### 3.3.1. ISPITIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA METODOM SIJANJA

Prosušeni i izvagani uzorak materijala treba prosijati kroz slijedeći niz sita prema tablici u nastavku (prema):

Tablica 5. Popis sita prema ASTM D 422

Oznaka sita	Otvor sita	Oznaka sita	Otvor sita
3 in.	75.00 mm	No. 10	2.00 mm
2 in.	50.00 mm	No. 20	850 $\mu\text{m}$
1 1/2 in.	37.50 mm	No. 40	425 $\mu\text{m}$
1 in.	25.00 mm	No. 60	250 $\mu\text{m}$
3/4 in.	19.00 mm	No. 140	106 $\mu\text{m}$
3/8 in.	9.50 mm	No. 200	75 $\mu\text{m}$
No. 4	4.75 mm		

Nakon sijanja važe se masa frakcije materijala koja je ostala na svakom pripadajućem situ.

Zatim se radi proračun razreda (frakcije) što je postotak pojedine mase ostatka na situ u ukupnoj masi uzorka.

Postoci se određuju prema izrazu:

$$N_i = \frac{m_i}{\sum_n m_i} \cdot 100 \quad [\%]$$

gdje je:

$m_i$  [g]      masa ostatka na situ  $i$

Grafički prikaz daje se kumulativnim granulometrijskim dijagramom, kod kojih se pojedini postoci pribrajaju drugima.

Kumulativna krivulja se određuje:

$$N_{Di} = 100 - \sum_1^i N_i \quad [\%]$$

gdje je:

$N_{Di}$  [%]    - koeficijent prolaza mase kroz sito  
 $N_i$  [%]    - pojedinačni koeficijent prolaza mase kroz sito  
 $D$  [mm]    - promjer (veličina) zrna



Slika 3.7. Set laboratorijskih sita za ispitivanje granulometrijskog sastava sijanjem

### 3.3.2. ISPITIVANJE GRANULOMETRIJSKOG SASTAVA MATERIJALA METODOM AREOMETRIRANJA

Postupak areometriranja koristi se za određivanje granulometrijskog sastava tla za frakcije materijala koje prolaze kroz sito otvora 75  $\mu\text{m}$ .

Pri uzorkovanju ispitnog uzorka za metodu areometriranja, uobičajeno se odvaja materijal na situ No. 10 (2,0mm).

Izdvojeni uzorak tla se miješa sa antikoagulansom (sredstvo za razdvajanje čestica) i nakon 24 sata se ulijeva se u menzuru.

Nakon toga se pristupa miješanju uzorka okretanjem menzure. Nakon odlaganja uzorka i menzure na stabilnu podlogu započinje se sa mjerenjem vremena kronometrom uz lagano uranjanje areometra u suspenziju i počinje sa očitanjem. Očitavanje na areometru vrši se na gornjem rubu meniska.

Primjenom Stokesovog zakona se u mirnom fluidu iz brzine padanja čestice određuje njena veličina tj. promjer. Brzina padanja je veća što su čestice krupnije, a manja što su čestice sitnije.

Stokes-ov zakon glasi:

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18 \cdot \eta} \cdot D^2$$

a brzinu možemo pisati i kao:

$$v = \frac{L}{t}$$

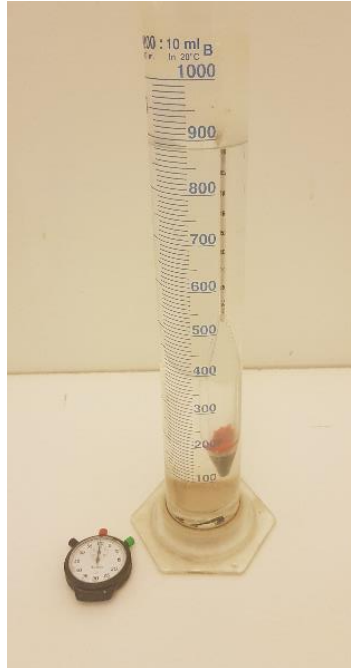
pa izjednačavanjem tih dvaju izraza dobijemo

$$D_t = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot L}{(\rho_s - \rho_f) \cdot t}} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{\rho_s - \rho_f}} \cdot \sqrt{\frac{L}{t}} = \text{const} \cdot \sqrt{\frac{L}{t}}$$

gdje je:

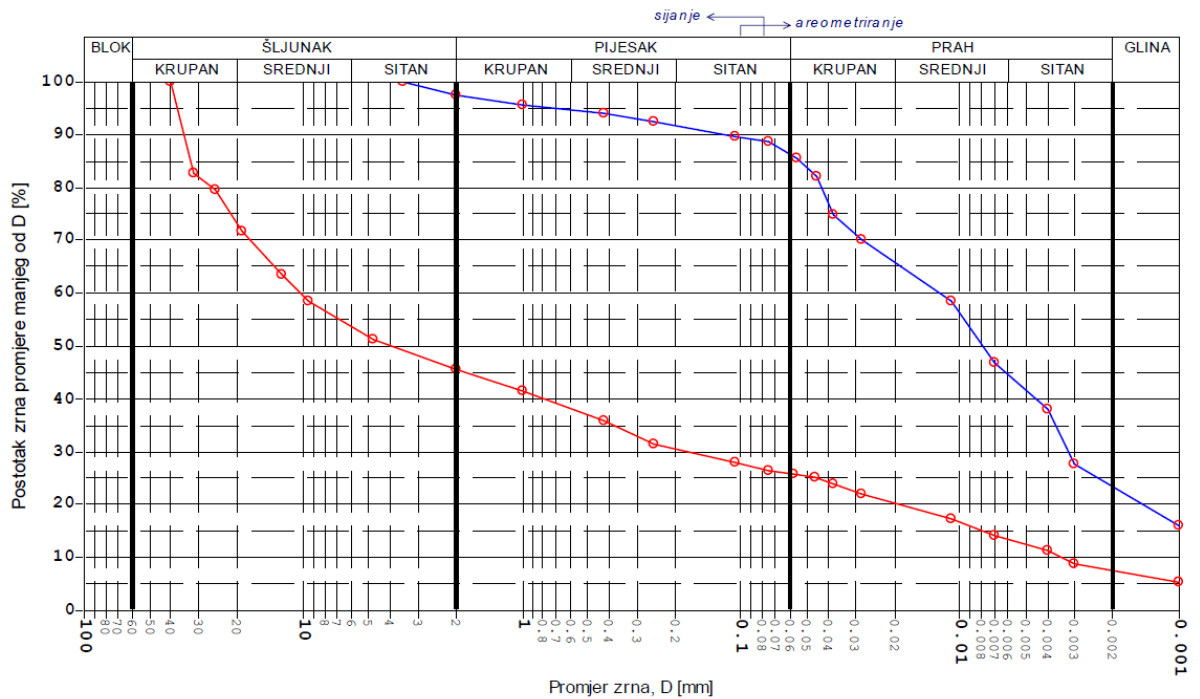
- v [mm/min] - brzina padanja čestice,
- $D_t$  [mm] - promjer istaloženog zrna nakon vremena t,

$\eta$	- viskoznost vode na određenoj temperaturi (svojstvo materijala),
$L$ [mm]	- efektivna dubina, udaljenost od površine do razine gdje areometar mjeri gustoću (visina padanja zrna),
$t$ [min]	- vrijeme
$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	- specifična gustoća tla
$\rho_f$ [g/cm <sup>3</sup> ]	- specifična gustoća tekućine



Slika 3.8. Laboratorijska oprema za određivanje granulometrijskog sastava metodom areometriranja

Ispitivanja težinskih udjela pojedine frakcije u uzorku daje podatke za granulometrijsku krivulju preko koje se može napraviti klasifikacija tla. Granulacija materijala nema direktnih korelacija sa parametrima čvrstoće ili modulima deformabilnosti već kao posredni podatak sudjeluje u drugim korelacijama.



Slika 3.9. Prikaz rezultata ispitivanja granulometrijskog sastava

### 3.4. ISPITIVANJE ČVRSTOĆE TLA IZRAVNIM POSMIKOM

Izravan posmik je laboratorijski postupak čiji je cilj utvrditi posmičnu čvrstoću tla. Posmična čvrstoća definira se kao maksimalni otpor koji materijal može podnijeti kada je izložen smicanju. Izravan posmik smatra se jednim od najčešćih i najjednostavnijih laboratorijskih ispitivanja za utvrđivanje čvrstoće tla i može se izvoditi na (NU) neporemećenim i laboratorijski pripremljenim uzorcima (PU).

U mehanici tla posmična čvrstoća procjenjuje se pomoću Mohr-Coulombov zakona sloma.

Mohr-Coulombov zakon pretpostavlja da funkcija posmične čvrstoće ( $\tau_f$ ) ovisi o tri faktora:

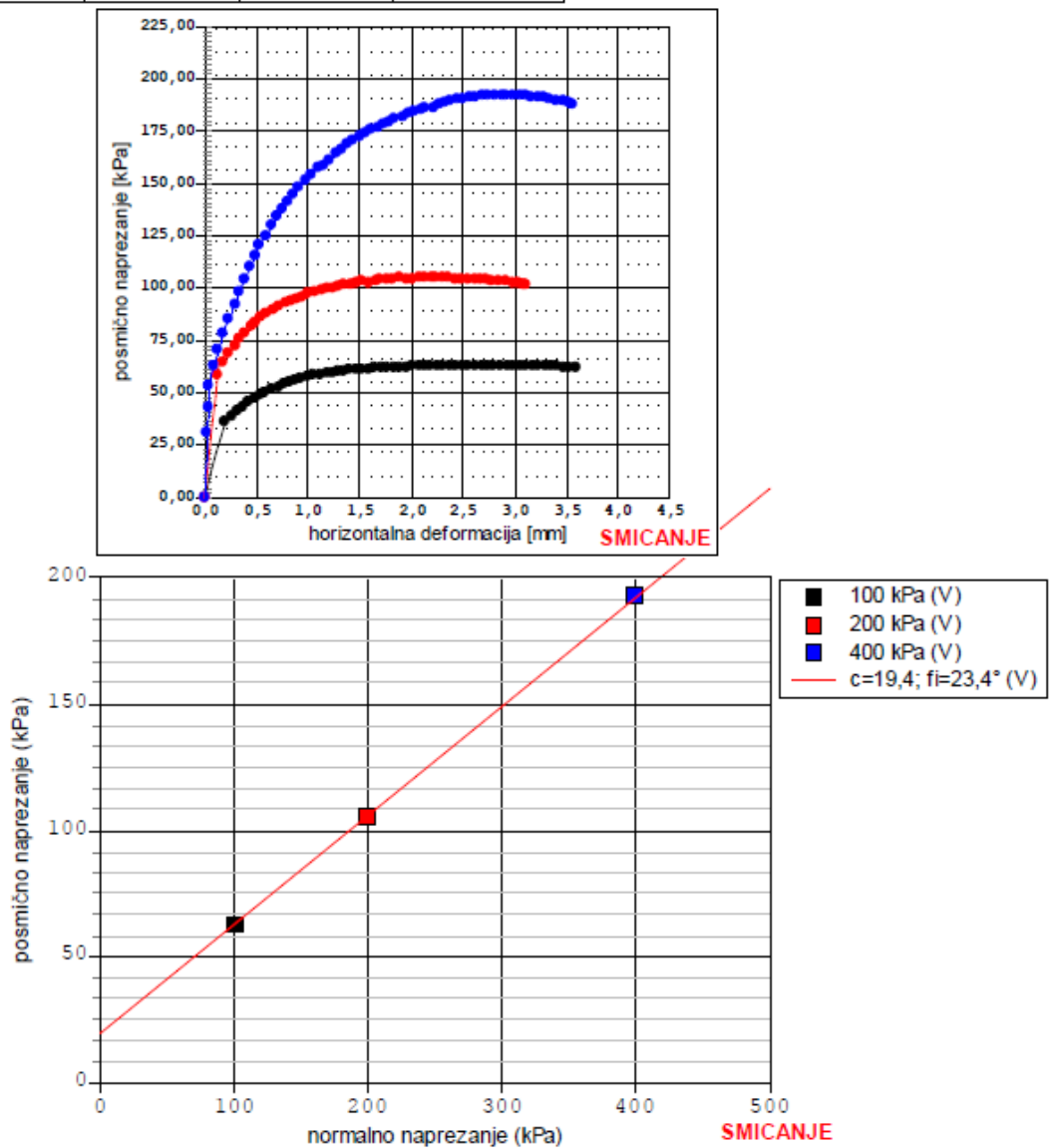
- normalnog efektivnog naprezanja ( $\sigma_n$ )
- unutrašnjeg kuta trenja materijala ( $\varphi$ )
- kohezije materijala ( $c$ )

Korelacija tih komponenata izražena je preko izraza:

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

točka	$\bar{\sigma}_V$ (kPa)	w (%) poč. stanje/ konač. stanje	$\rho/\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) poč. stanje	$\rho/\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> ) konač. stanje	početna visina / širina (mm)	uzorak potopljen/ ako DA $\bar{\sigma}_V$ (kPa)
1	100	28,3 / 29,0	1,95 / 1,51	2,00 / 1,55	24,9 / 60,1	DA/100
2	200	28,3 / 28,3	1,95 / 1,52	2,00 / 1,56	24,9 / 60,3	DA/200
3	400	28,3 / 27,6	1,93 / 1,52	2,09 / 1,64	24,9 / 60,2	DA/400

točka	brzina smicanja (mm/min)	$\bar{\sigma}_V$ (kPa)	$\tau_1$ (kPa)	horiz. def. pri slomu (mm)
1	0,03	100	63,1	2,65
2	0,03	200	105,2	2,26
3	0,03	400	192,6	2,88



Slika 3.10. Prikaz rezultata laboratorijskog ispitivanja izravnog posmika

Kut koji pravac čvrstoće zatvara sa apscisom predstavlja kut unutarnjeg trenja  $\varphi$  dok je odsječak na ordinati koji siječe pravac čvrstoće kohezija  $c$ .

Za nekoherentne materijale se pretpostavlja da je kohezija  $c=0$  dok za koherentne materijale ona ovisi o mogućnosti istjecanja vode iz uzorka i brzini pokusa.

Uzorak tla stavlja se u ćeliju izravnog posmika koja se sastoji od dva metalna kalupa, dva porozna kamena, dva vijka i poklopca za nanošenje normalnog naprezanja.

Ćelija izravnog posmika može biti kružnog ili četvrtastog oblika, ona ograničava vodoravno naprezanje uzorka, ali omogućuje smicanje na nametnutoj vodoravnoj ravni gdje se spajaju dvije metalne ploče.



Slika 3.11. Prikaz ćelije izravnog posmika sa ugrađenim uzorkom

Zatim se ćelija izravnog posmika stavlja na uređaj za smicanje gdje se vrši konsolidacija uzorka djelovanjem vanjske sile. U ovoj fazi su metalne ploče ćelije za smicanje međusobno pričvršćene.

Nakon konsolidacije uzorka primjenjuje se naprezanje posmika duž ćelije izravnog posmika do sloma uzorka.

Prilikom ispitivanja nužno je pratiti pomoću mjernih uređaja:

- horizontalnu silu smicanja,
- vertikalne i
- horizontalne deformacije.



*Slika 3.12. Prikaz uzorka ispitanog na posmik*

Zbog dobivanja realnih rezultata, a prije početka smicanja nužno je osigurati zasićenje pora uzorka i završetak postupka konsolidacije.

U protivnom ako se tijekom ispitivanja poveća tlak pora vode, posmična čvrstoća uzorka bit će manja.

Uobičajene pogreške koje se javljaju tijekom izravnog ispitivanja smicanjem uključuju poremećaj uzorka prije ispitivanja (prirodna nehomogenost uzorka zbog sadržaja kongrecija, valutica šljunka, odlomaka kamena), nepotpunu konsolidaciju ili odabir previsoke brzine smicanja.

Poremećaji obično utječu na strukturu uzorka što rezultira neprimjereno visokim rezultatima čvrstoće. Stoga rezultati ispitivanja nisu reprezentativni za stvarno ponašanje tla.

Kod nedovoljne konsolidacije uzorka i kod veće brzine smicanja dolazi do povećanja tlaka u porama, smanjujući efektivno naprezanje i rezultirajući manjom posmičnom čvrstoćom.



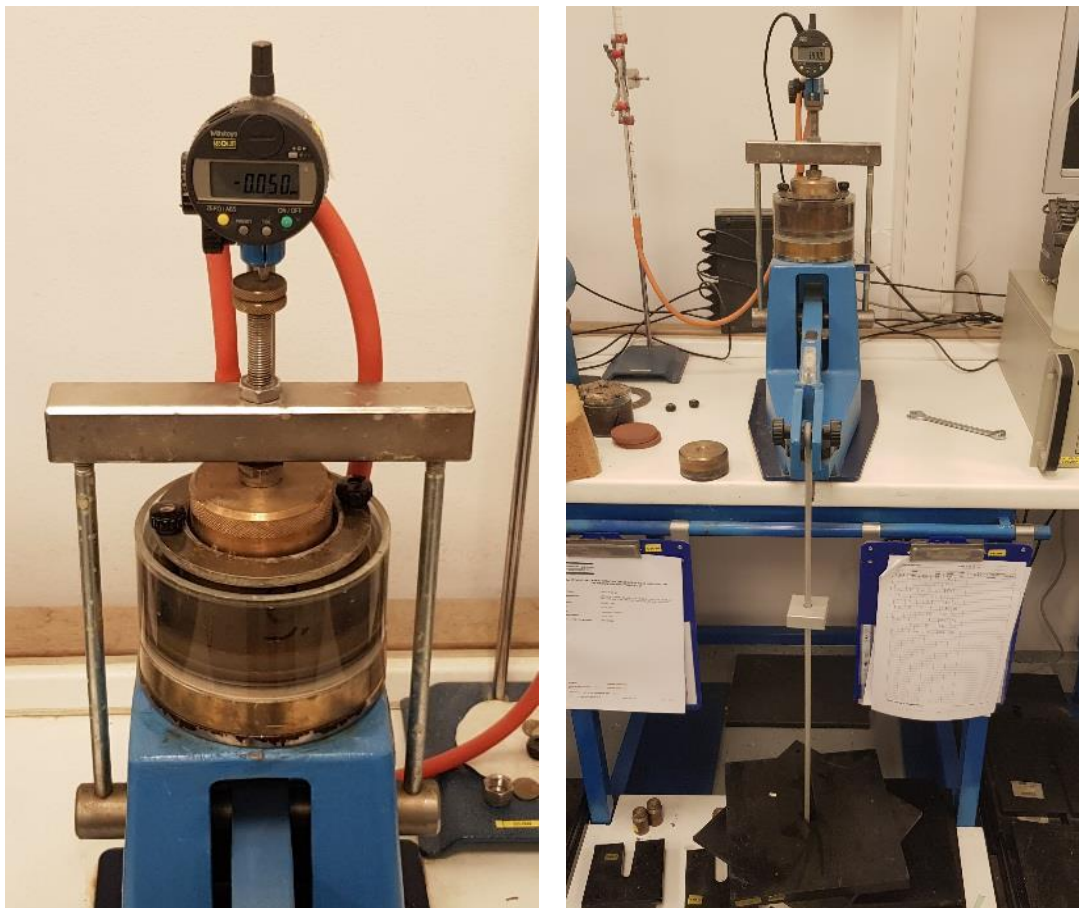
### 3.5. ISPITIVANJE TLA U EDOMETRU (HRN U. B1. 032)

Edometarskim ispitivanjem na odabranim uzorcima tla određuju se vrijednosti stišljivosti tla i bubrenja pri spriječenom bočnom širenju.

Određivanje stišljivosti tla -  $M_s$ (MPa) služi određivanju karakteristika stišljivosti tla pri različitim stupnjevima opterećenja i u raznim vremenskim intervalima.

Na osnovu stišljivosti i dijagrama vremenskog toka konsolidacije predviđa se veličina i vremenski tok slijeganja objekata na terenu.

Uzorak cilindričnog oblika ugrađuje se u aparat za ispitivanje stišljivosti - edometar, opterećuje se raznim stupnjevima opterećenja i prati promjena visine tj. zapremine uzorka pri svakom stupnju opterećenja u raznim vremenskim intervalima.



Slika 3.13. Edometar sa ugrađenim uzorkom u ćeliji za ispitivanje.

Edometarski modul stišljivosti  $M_v$  određuje se prema formulama u nastavku.

Na osnovu dijagrama relativnog slijeganja, odnosno dijagrama promjene koeficijenta poroznosti, izražava se modul stišljivosti.

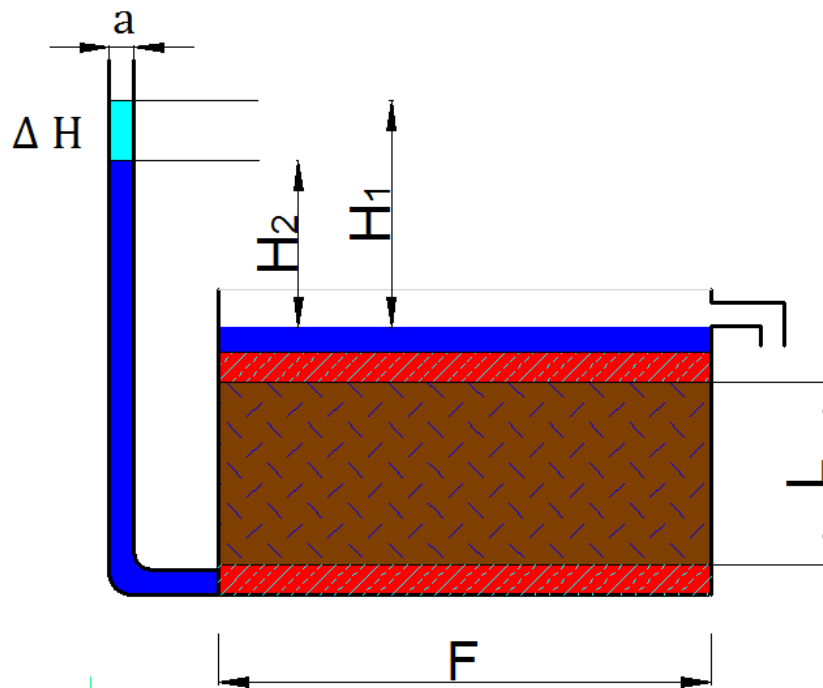
$$M_v = \frac{1 + e_1}{\Delta e} \cdot \Delta \sigma_v$$

Važno je napomenuti da se edometarski modul izračunava prema ciklusu vertikalnog opterećenja (standardno za  $\sigma_v = 50, 100, 200, 400$  i  $800$  kPa) te ga treba odabrati u skladu sa geološkim pritiskom za pojedini sloj, tj. zasebno za svaki inkrement napona. U praksi se često odabire jedan prosječni modul stišljivosti za proračun.

### VODOPROPUSNOST

Koeficijent vodopropusnosti  $k$  se u edometru direktno određuje mjerenjem pada visine stupca vode u vremenu za postavljeno vertikalno opterećenje (mjerenje propusnosti uz promjenjiv pad, prema slijedećoj formuli:

$$k = 2,3 \frac{L \cdot a}{A \cdot \Delta t} \log \frac{h_1}{h_2}$$



Slika 3.14. Ispitivanje vodopropusnosti u edometru



Važno je napomenuti da se ispitivanjem vodopropusnosti u edometru određuje uglavnom vertikalna vodopropusnost, tj. rezultat vodopropusnosti ovisi o smjeru u kojem je uzorak ugrađen.

Razvojem numeričkih programa kojima je moguće vršiti složenije analize procjeđivanja u tlu otvorila se mogućnost različitog zadavanja koeficijenta propusnosti u vertikalnom i horizontalnom smjeru (SEEP/W, GeoStudio 2004). Odnos  $k_h/k_v$  je za većinu ispitivanih glinovitih tala manji od 1,50 no mogući su i odnosi i veći od 10 za izrazito slojevita glinena tla.

## 4. GEOSINTETICI

Geosintetici su planarni polimerni materijali koji se koriste u kombinaciji ili u kontaktu sa zemljanim ili kamenim tлом ili ostalim geotehničkim materijalima za različite svrhe kod gradnje hidrotehničkih i ostalih inženjerskih građevina.

Geosintetici se upotrebljavaju za razdvajanje, filtriranje, dreniranje, ojačanje/armiranje, brtvljenje i zaštitu.

Većina geosintetika proizvedena je od sintetskih polimera: polipropilena, poliesetra i polietilena. Ti polimeri su visoko otporni na biološke i kemijske utjecaje. Rjeđe se koriste poliamidi i staklena vlakna. Prirodna vlakna kao što su kokos, juta i pamuk mogu se također koristiti za proizvodnju geosintetika, međutim zbog toga što oni samo privremeno obavljaju svoju funkciju dok se ne raspadnu, razmatraju se odvojeno od geosintetika.

Geosintetske materijale dijelimo u nekoliko glavnih grupa:

- geotekstile - propusni, planarni tekstilni materijali koji mogu biti netkani, tkani, pleteni, iglani ili toplo valjani. Najviše se koriste za razdvajanje, filtriranje i za zaštitu, a često i za dreniranje i ojačanje/armiranje;
- geomreže - za ojačanja - planarni materijali sa pravilno raspoređenim otvorima. Sastoje se od mreže elemenata za natezanje, međusobno povezanih varenjem, spajanjem ili ekstrudiranjem. Veličina otvora je bitno veća od elemenata koji tvore strukturu. Njihova primarna uloga je armiranje;
- geomreže – drenažne - poseban oblik geomreža koji se sastoji od guste, pravilne mreže elemenata čiji su sastavni dijelovi međusobno povezani čvorovima ili ekstruzijom. Koriste se prije svega za razdvajanje i dreniranje;
- geopletiva - trodimenzionalna, propusna struktura načinjena od polimernih jednovrsnih niti i/ili drugih elemenata (sintetičkih ili prirodnih), koji su mehanički i/ili termički i/ili kemijski i/ili na neki drugi način spojeni.
- geomembrane - nepropusni, planarni materijali čija je glavna svrha brtvljenje

- geokompoziti - proizvedeni ili na terenu sastavljeni umjetni materijali koji se sastoje od najmanje dvije vrste različitih materijala, od kojih je najmanje jedan od polimernih sintetskih vlakana. Postoji skoro neograničen broj različitih vrsta geokompozita. Najviše se koriste za dreniranje i brtvljenje

- bentonitni tepisi (GCL) - oblik nepropusnih geokompozita sastavljen od dva geotekstila, između kojih je ugrađena bentonitna glina. Koriste se za postizanje vodnoneprousnosti. [5]

#### 4.1. VRSTE I NAMJENA GEOSINTETIKA

Geosintetici se u građevinarstvu mogu koristiti za različite funkcije poput filtracije, odvajanja, ojačanja, drenaže, zaštite od erozije i si. Ovisno o vrsti tla, vrsti konstrukcije, karakteru opterećenja, uvjetima korištenja, odabire se odgovarajući geosintetik po vrsti i potrebnim svojstvima.

U narednoj tablici dan je pregled primjene različitih tipova geosintetika prema funkcijama koje moraju ispuniti.

Tablica 6. Tipovi geosintetika sa primjenom

Tip \ Funkcija	Odvajanje	Drenaža / odvodnja	Filtracija	Ojačanje	Nepropusnost	Zaštita
Netkani geotekstil	●	○	●			●
Tkani geotekstil	●		○	●		
Geomreža				●		
Geomembrana					●	
Geočelije	●			●		
GCL					●	○
Geokompoziti	○	●	○	○	●	●
Georešetka		●				
Geocijevi		●				

Legenda: ● primarna funkcija, ○ sekundarna funkcija

Pri odabiru primjerenog tipa i načina djelovanja geosintetika, potrebno je identificirati vjerojatan / mogući / dominantan mehanizam gubitka funkcije, odnosno sloma geosintetika.

## 4.2. PREGLED VRSTA GEOSINTETIKA

Geosintetici su proizvodi s barem jednom komponentom načinjenom od sintetičkog ili prirodnog polimera, u planarnom obliku, obliku trake ili trodimenzionalne strukture, koji se koriste u kontaktu s tlom i/ili drugim materijalima u geotehničkim i ostalim građevinskim zahvatima.

U narednoj tablici dana je podjela geosintetika prema normi HRN EN ISO 10318:2008.

Tablica 7. Podjela geosintetika

GEOSINTETICI		
GEOTEKSTIL	GEOTEKSTILU SRODNI PROIZVODI	GEOSINTETIČKE BARIJERE
(propusni)		(nepropusni)
tkani netkan pleteni / iglani	georešetka geomreža geočelija geotraka geopletivo drugi (geocijevi, Eeopjena)	polimerna (geomembrana)  glineno-geosintetička (bentonitni tepih - GCL)  bitumenska
↓	↓	↓
<b>GEOKOMPOZITI</b> kombinacija dva ili više geosintetika		

## 4.3. PRIMJENA GEOSINTETIKA

Geomreža (GGR) je planarna, polimerna struktura koja se sastoji od vlačnih elemenata integralno spojenih u mrežu pravilnih otvora, koji mogu biti povezani istiskivanjem, vezivom ili ispreplitanjem, a čiji su otvori veći od samih komponenti (HRN EN ISO 10318:2008, točka 1.2.1.2.1.). Prema nosivosti, geomreže se mogu podijeliti na mreže nosive u jednom (monoaksijalne), dva (biaksijalne) ili više smjerova.



Slika 4.1. Ugradnja geosintetika - troosna geomreža tip Tensar – TriAx TX 190L – armiranje tla



Slika 4.2. Ugradnja geosintetika – geotekstil GEO PP HP 300 – razdjelno / nosivi sloj



*Slika 4.3. Ugradnja geokompozita – Bentonitni tepih Modulo Geobent XP 5/310 – razdjelno / brtveni sloj*



*Slika 4.4. Ugradnja geokompozita – VMax SC250 - ojačanje pokosa nasipa*



## 5. GEOTEHNIČKA ANALIZA

### 5.1. OPĆENITO

Sve geotehničke građevine u Republici Hrvatskoj projektiraju se prema projektnom pristupu 3 (PP3), a iznimno se geotehnička sidra i piloti mogu projektirati prema PP2.

U geotehničkom inženjerstvu prema EC7 se definiraju proračunski pristupi (PP1, PP2, PP3) kojima se određuju parcijalni proračunski koeficijenti kojima se faktoriziraju:

- karakteristična djelovanja (A – engl. Action - djelovanje,)
- materijali (M – engl. Material – materijalna svojstva)
- proračunska otpornost (R – engl. Resistance – otpornost).

Kod projektnog pristupa PP3 uzimaju se slijedeće kombinacije faktora (A1+M2+R3)

Vrijednost pojedinog elementa proračuna množi se odgovarajućim parcijalnim proračunskim koeficijentom.

U narednoj tablici prikazane su vrijednosti parcijalnih koeficijenata za djelovanja (A) za granična stanja STR i GEO.

Tablica 8. *Parcijalni faktori za djelovanja (A)*

Djelovanje		Simbol	Skupina	
			A1	A2
Trajno	Nepovoljno	$\gamma_{G;sup}$	1.35	1.0
	Povoljno	$\gamma_{G;sup}$	1.0	1.0
Promjenjivo	Nepovoljno	$\gamma_Q$	1.5	1.3
	Povoljno	$\gamma_Q$	0	0

U narednoj tablici prikazane su vrijednosti parcijalnih koeficijenata za utjecaj materijala (M2) za granična stanja STR i GEO.

Tablica 9. *Parcijalni faktori za parametre tla (M2)*

Parametri tla	Simbol	Vrijednost
Kut unutarnjeg trenja	$\gamma_{p'}$	1.25
Efektivna kohezija	$\gamma_{c'}$	1.25
Nedrenirana posmična čvrstoća	$\gamma_{cu}$	1.4
Jednoosna tlačna čvrstoća	$\gamma_{qu}$	1.4
Gustoća (težine)	$\gamma_{\gamma}$	1,0

Tablica 10. *Parcijalni faktori otpora (R)*

Otpornost	Simbol	R1	R2	R3
Kosine i opća stabilnost – otpor tla	$\gamma_{R,e}$	1,0	1,1	1,0

## 5.2. RAČUNALNE ANALIZE

Računalne analize metodom granične ravnoteže analiziraju stabilnost računskog modela tla podijeljenog u preddefinirane klizne plohe. Svaka klizna ploha podijeljena je na lamele u čijim se osnovicama računa vrijednost efektivne posmične čvrstoće i efektivnog posmičnoga naprezanja.

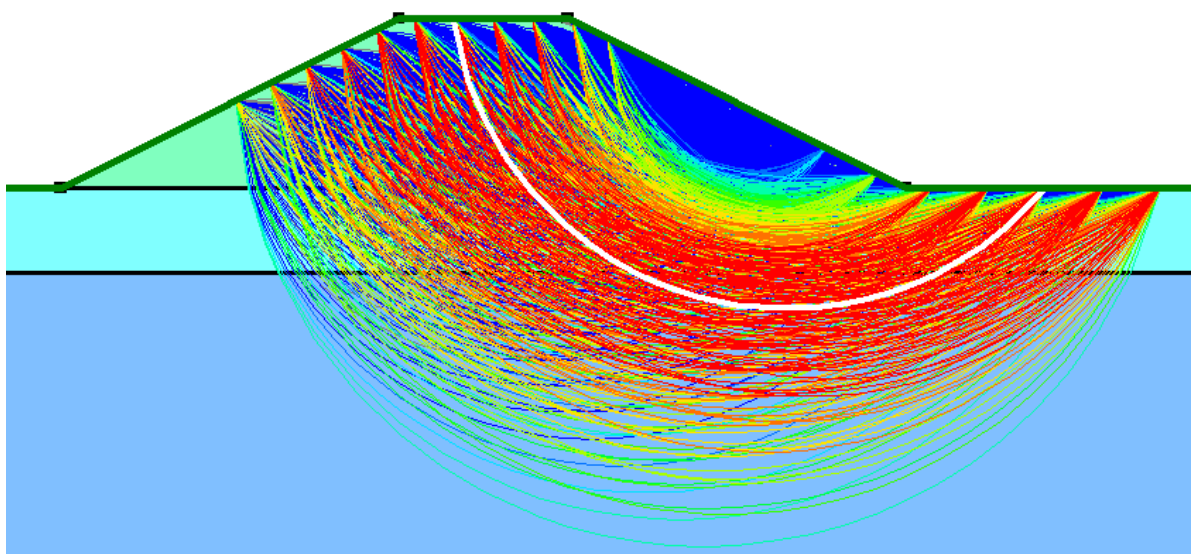
Zbrajanjem vrijednosti po lamelama dobiva se ukupna posmična čvrstoća ( $\tau_f$ ) i posmično naprezanje duž klizne plohe ( $\tau$ ).

Stabilnost probnih kliznih ploha izražava se preko faktora sigurnosti ( $F_s$ ):

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau}$$

Najmanji faktor sigurnosti pripada kliznoj plohi koja se naziva kritična klizna ploha.

Faktor sigurnosti  $F < 1$  ocjenjuje promatrani model kao nestabilan dok faktor sigurnosti  $F > 1$  ocjenjuje model kao stabilan.



Slika 5.1. *Primjer modela nasipa sa računskim kliznim plohama*

Svi neophodni proračuni za potrebe dimenzioniranja građevine provedeni su u programu:

**SLOPE/W** modul programa GEOSTUDIO 2016 (GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada) koji jednom od odabranih metoda granične ravnoteže (Fellenius, Janbu, Bishop, Spencer, Morgenstern-Price, Corp of Engineers, Lowe-Karafiath itd.) omogućava neograničen broj računskih analiza stabilnosti po pretpostavljenim cilindričnim ili cilindrično-poligonalnim plohamu posmičnog sloma

**SEEP/W** modul programa GEOSTUDIO 2016 (GEO-SEEP International Ltd., Calgary, Alberta, Canada) koji problem stacionarnog tečenja rješava metodom konačnih elemenata.

Proračuni su provedeni prema hrvatskim normama Eurokod 7 i Eurokod 8 :

- norma HRN EN 1997-1:2012 i HRN EN 1997-1:2012/NA:2012
- norma HRN EN 1998-5:2011 i HRN EN 1998-5:2011/NA:2011

### 5.3. ANALIZE STABILNOSTI

Karakteristike materijala određuju se na temelju izvedenih geomehaničkih istražnih radova uz respektiranje geomehaničkih iskustava pri izgradnji sličnih građevina.

### 5.4. MODEL TLA

Karakteristični parametri tla korišteni u proračunima stabilnosti prikazani su u tablici:

grupa, vrsta i oznaka materijala	zapreminska težina $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	nedrenirana čvrstoća $c_{uk}$ (kPa)	kohezija $c'_k$ (kPa)	kut unutrašnjeg trenja $\phi'_{\kappa}$ (°)
(1) POVRŠINSKA GLINA	19	26	8	17
(2) GLINA - DUBLJI SLOJ	19	20	6	12
(3) NASIP	19	35	9	19

### 5.5. ANALIZA GLOBALNE STABILNOSTI PREMA PROJEKTNOM PRISTUPU 3

Analize stabilnosti su provedene za projektni pristup 3 (PP3) sukladno HRN EN 1997. Proračunski pristup 3 ima sljedeću kombinaciju grupa parcijalnih koeficijenata: A1+M2+R3.

Parametri tla reducirani su parcijalnim koeficijentima:

$$\text{tg}\phi'_d = \text{tg}\phi'_k / \gamma_\phi \quad c'_d = c'_k / \gamma_c \quad c_{ud} = c_{uk} / \gamma_{cu}$$

$$\text{gdje je:} \quad \gamma_\phi = \gamma_c = 1,25 \text{ i } \gamma_{cu} = 1,40.$$

Proračunske vrijednosti čvrstoće temeljnog tla i materijala brane pruža tablica:

grupa, vrsta i oznaka materijala	zapreminska težina $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	nedrenirana čvrstoća $c_{ud}$ (kPa)	kohezija $c'_d$ (kPa)	kut unutrašnjeg trenja $\varphi'_d$ (°)
(1) POVRŠINSKA GLINA	19	19	6	14
(2) GLINA - DUBLJI SLOJ	19	14	5	10
(3) NASIP	19	25	7	15

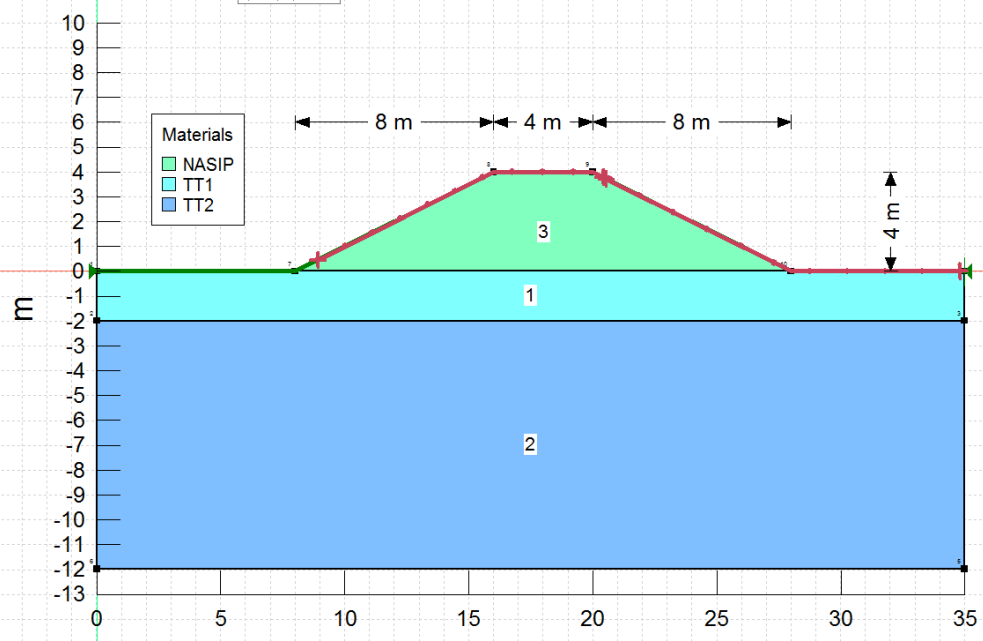
### 5.5.1. RAČUNSKI MODELI

Analiza stabilnosti je provedena na tri računski modela:

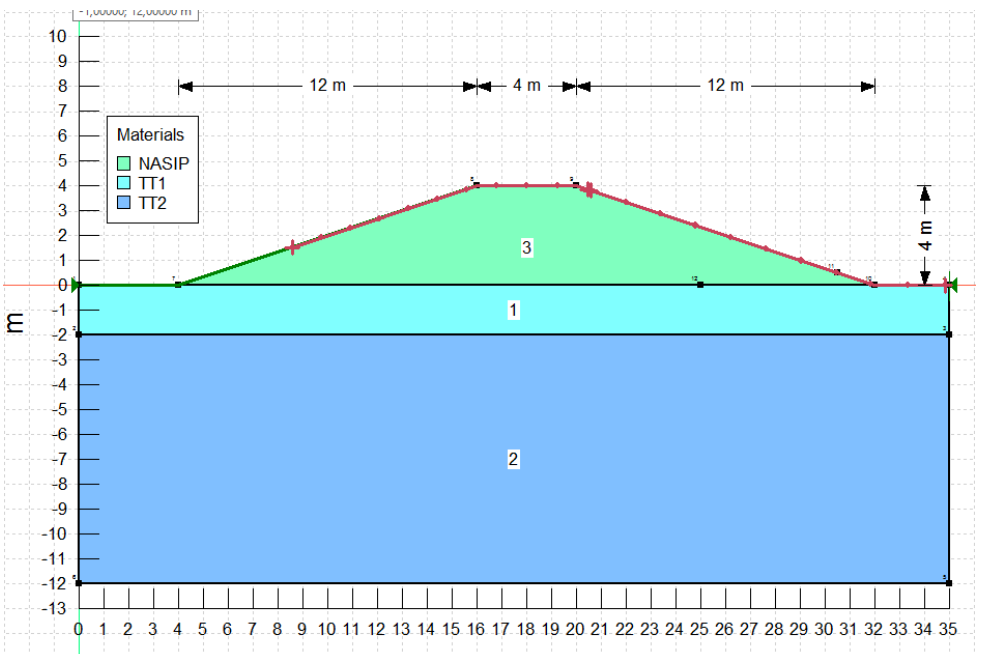
1. Računski model RM1 opisuje nasip visine 4,0 m s pokosima u nagibu 1:2 krune širine 4,0 m,
2. Računski model RM2 opisuje nasip visine 4,0 m s pokosima u nagibu 1:3 krune širine 4,0 m,
3. Računski model RM3 opisuje nasip visine 4,0 m s pokosima u nagibu 1:2 krune širine 4,0 m sa ugrađenim ojačanjem geosinteticima – geomreža.

Karakteristični profili korišten za Računski model RM1

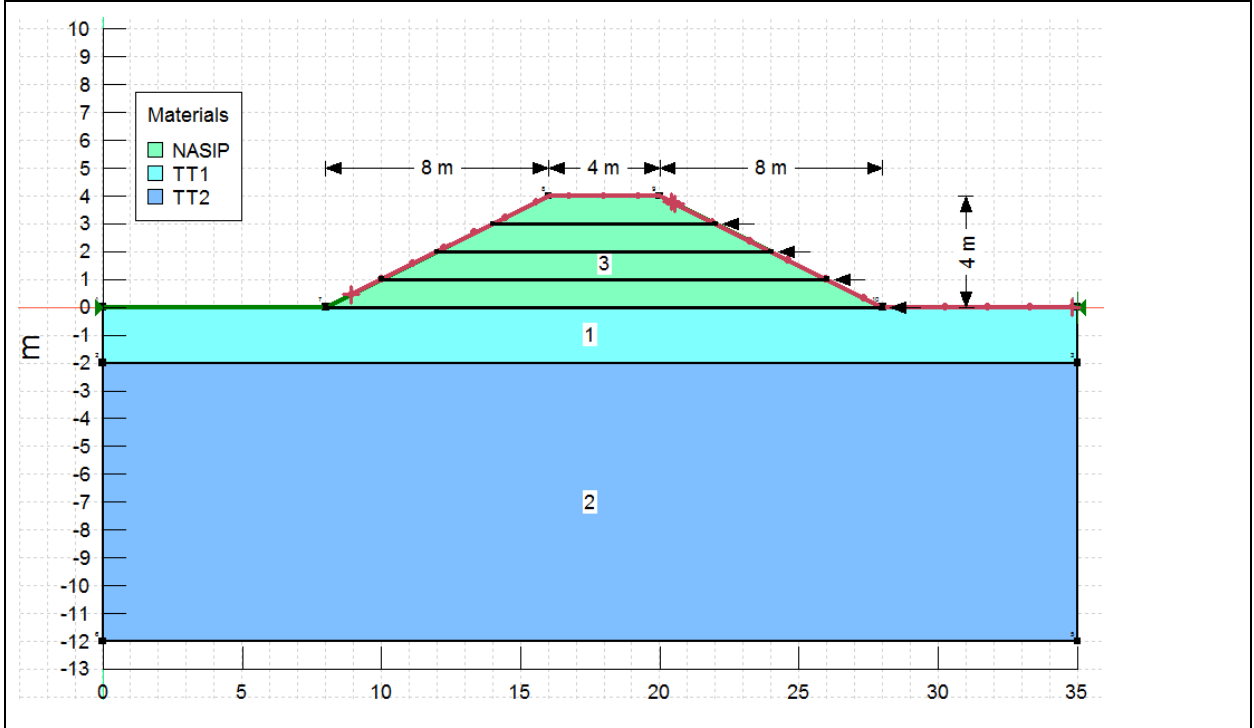
**Računski model RM1 - nasip visine 4,0 m s pokosima u nagibu 1:2 krune širine 4,0 m,**



**Računski model RM2 - nasip visine 4,0 m s pokosima u nagibu 1:3 krune širine 4,0 m,**



**Računski model RM3 - nasip visine 4,0 m s pokosima u nagibu 1:2 krune širine 4,0 m sa ugrađenim ojačanjem geosinteticima - geomreža**



**5.5.2. PROJEKTNE SITUACIJE**

Analize stabilnosti provedene su na računskim modelima RM1, RM2 i RM3 za projektne situacije:

R. br.	Oznaka modela	Projektna situacija	Klizna ploha
1	S1	Završetak gradnje	Klizna ploha minimalnog $F_s$ , drenirani parametri.
2	S2	Korištenje	Klizna ploha minimalnog $F_s$ razina vode je na 1,2m ispod kote krune nasipa, drenirani parametri.
3	S3	Visoki vodostaj	Klizna ploha minimalnog $F_s$ razina vode je na koti krune nasipa, drenirani parametri.
4	S4	Naglo sniženje vodostaja	Klizna ploha minimalnog $F_s$ , drenirani parametri, naglo sniženje vodostaja, uzvodni pokos nasipa.
5	S5	Potres	Klizna ploha u fazi eksploatacije uslijed djelovanja potresa, nedrenirani parametri.

### 5.5.3. GEOMREŽE

Geomreže su zadane pomoću kontaktnih parametara čvrstoće  $c$  i  $\varphi$  i sile otpornosti na čupanje.

**Geomreža 15 kN/m**

Reinforcement

Type:      F of S Dependent:      Force Distribution:      Anchorage:

Geosynthel    Yes    Distributed    Yes

Length:    16 m    Direction:    0 °

Pullout Resistance (F/Area):    15 kPa    Tensile Capacity:    15 kN

Calculate Pullout Resistance from:

    Interface Adhesion:    0 kPa    Reduction Factor:    1

    Interface Shear Angle:    0 °    Force Orientation:    0

    Surface Area Factor:    2    (0 - Axial, 1 - Parallel to Slice Base)

    Resistance Reduction Factor:    1

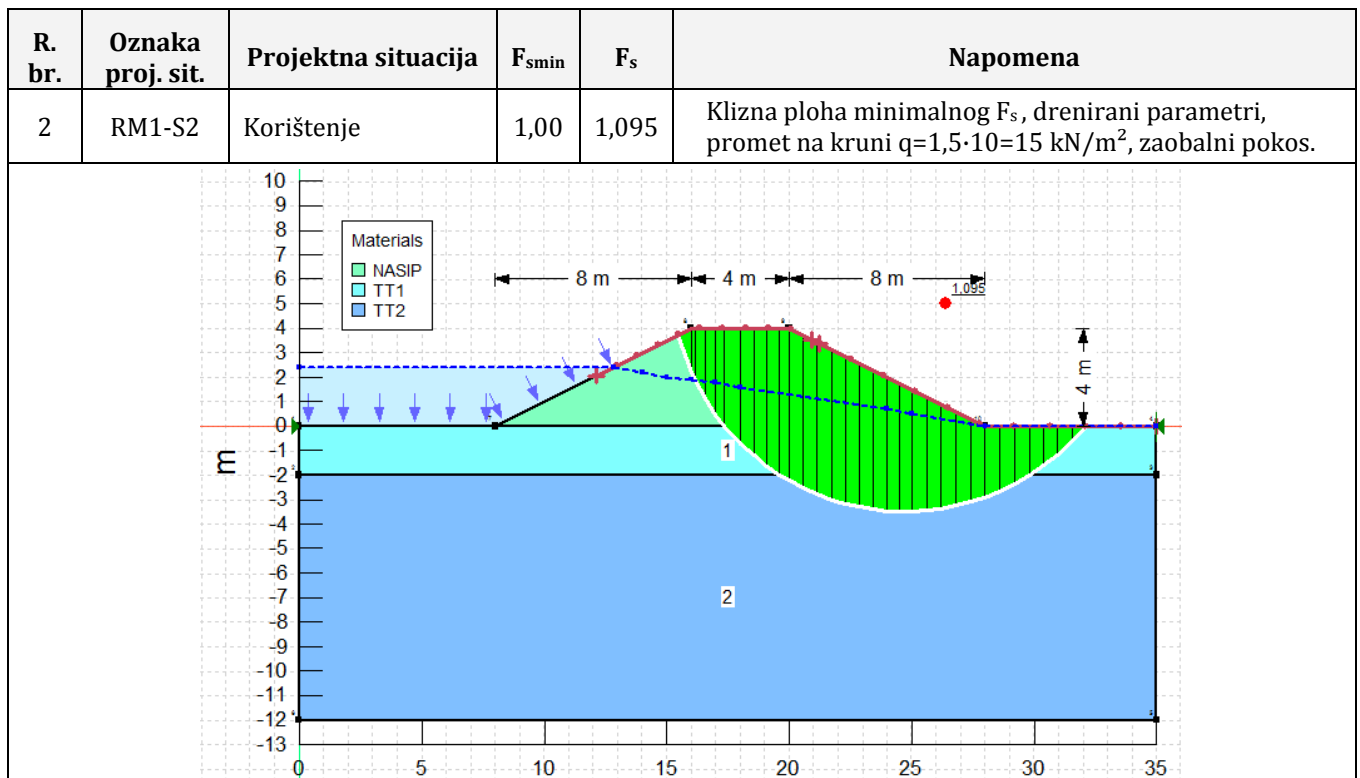
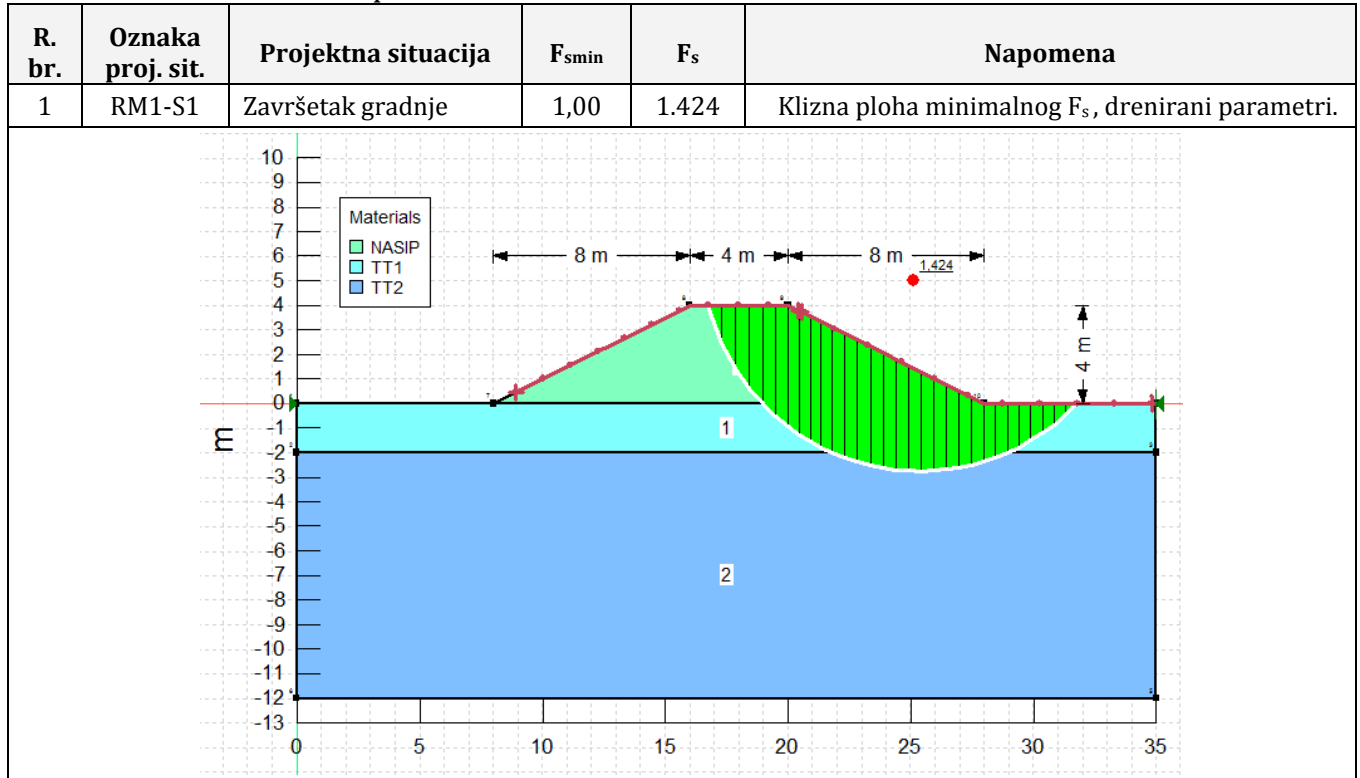
Factored Pullout Resistance:	15 kN/m / F of S
Maximum Pullout Force:	0 - 15 kN / F of S

Done

Parcijalni faktor sigurnosti na vlačnu čvrstoću geomreže (Reduction Factor) je 1.

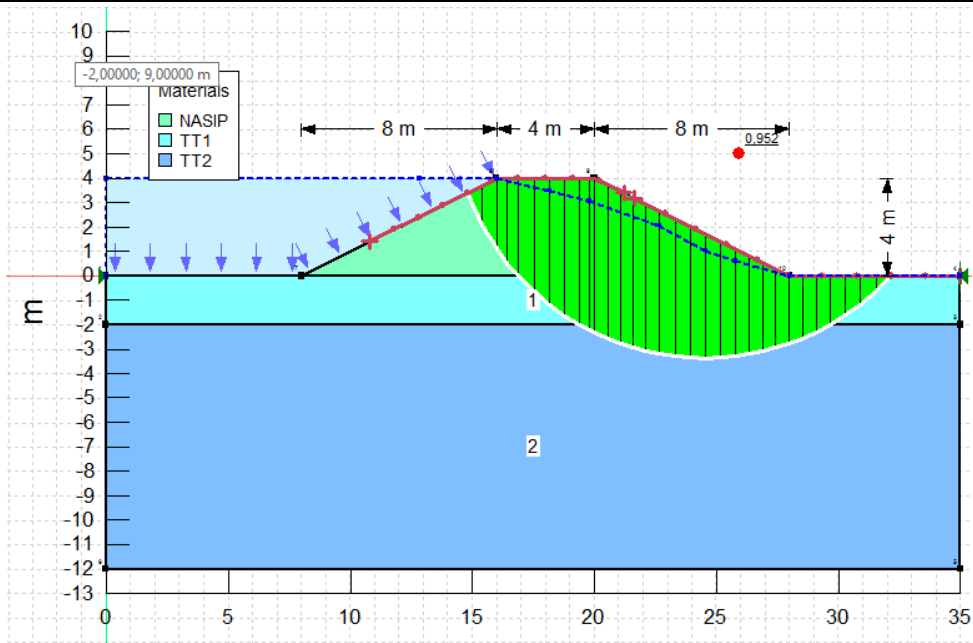
### 5.5.4. RAČUNSKI MODEL RM1 - NASIP VISINE 4,0 M S POKOSIMA U NAGIBU 1:2 KRUNE ŠIRINE 4,0 M

Prikaz rezultata proračuna stabilnosti:

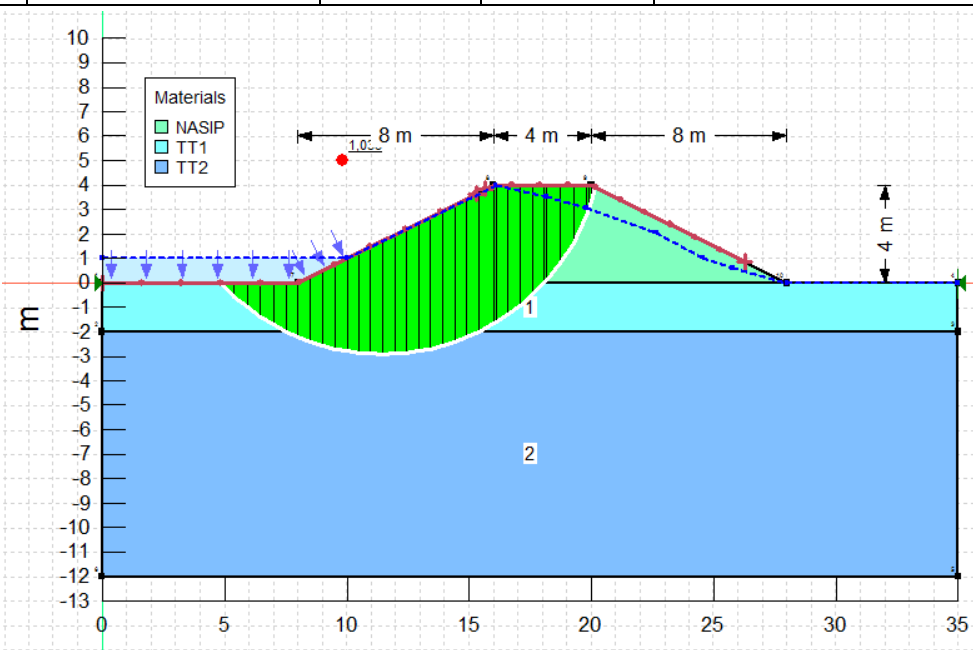




R. br.	Oznaka proj. sit.	Projektna situacija	$F_{s \min}$	$F_s$	Napomena
3	RM1-S3	Visoki vodostaj	1,00	0,952	Klizna ploha minimalnog $F_s$ , drenirani parametri, visoki vodostaj, zaobalni pokos.

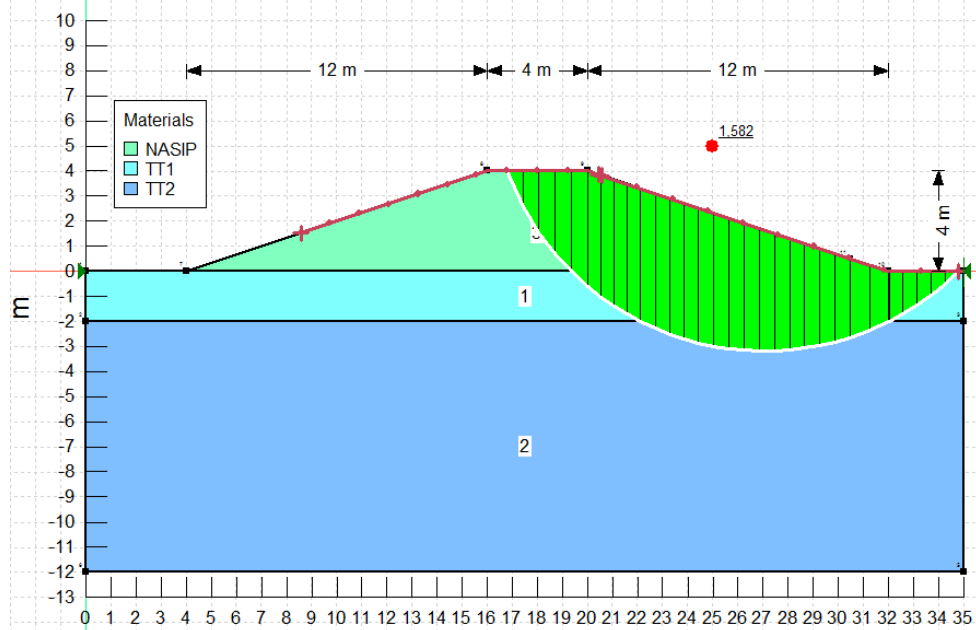


R. br.	Oznaka proj. sit.	Projektna situacija	$F_{s \min}$	$F_s$	Napomena
4	RM1-S4	Naglo sniženje	1,00	1,033	Klizna ploha minimalnog $F_s$ , drenirani parametri, naglo sniženje vodostaja..

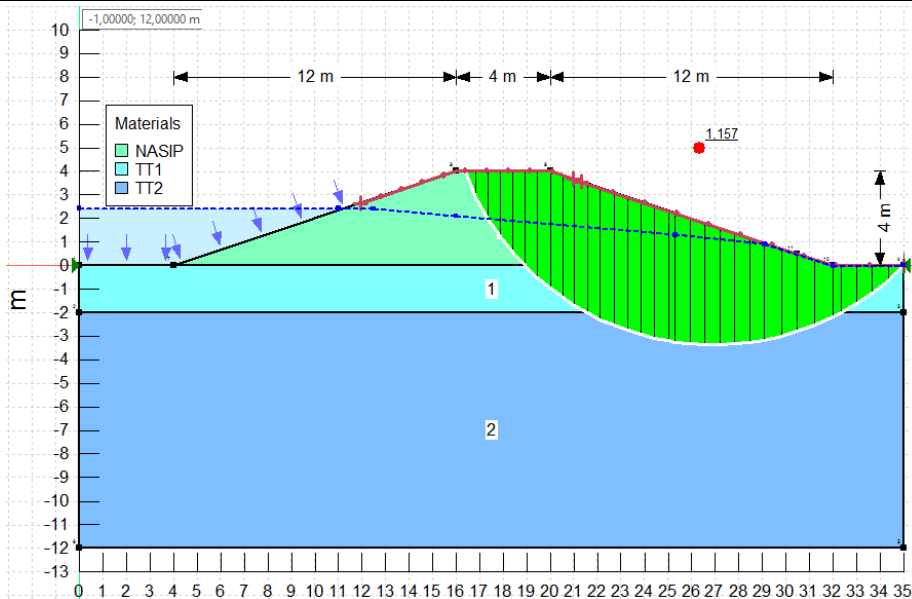


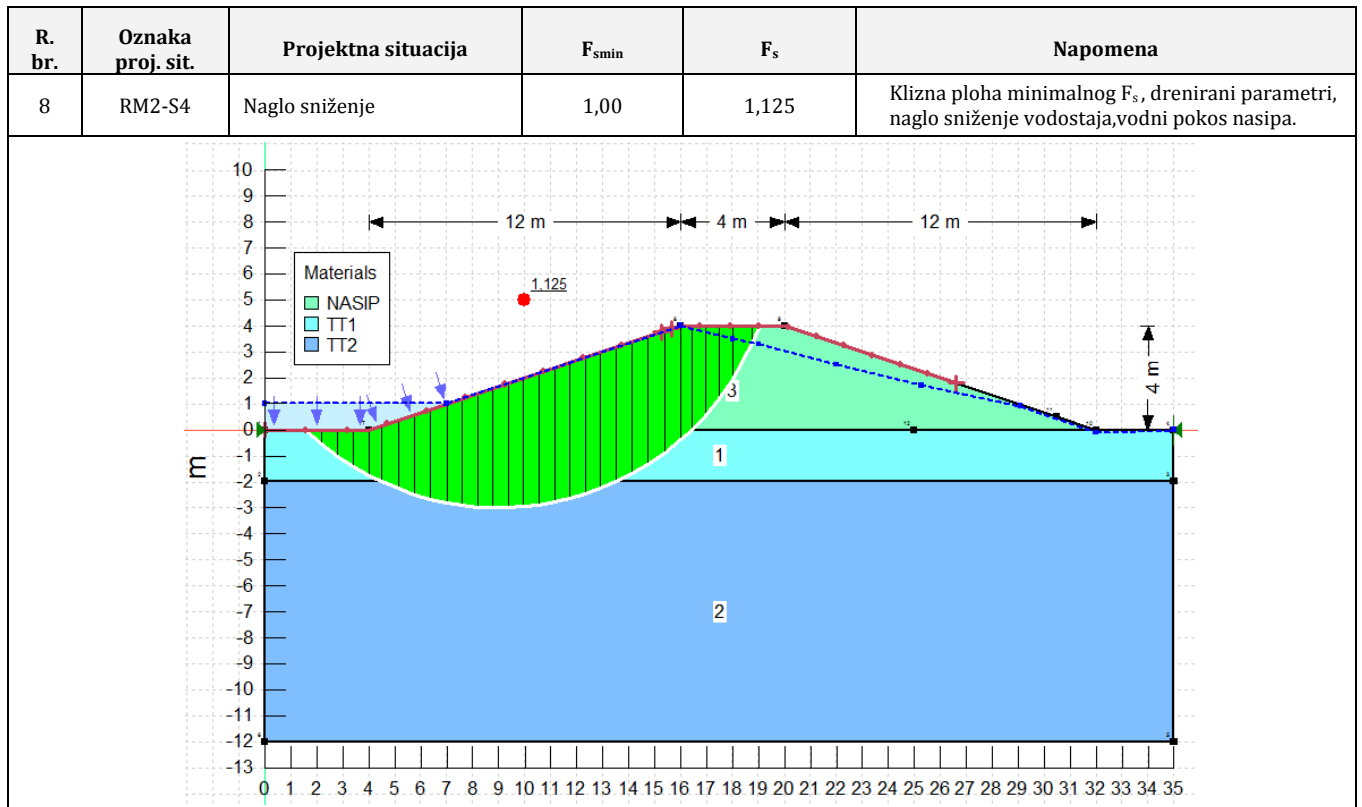
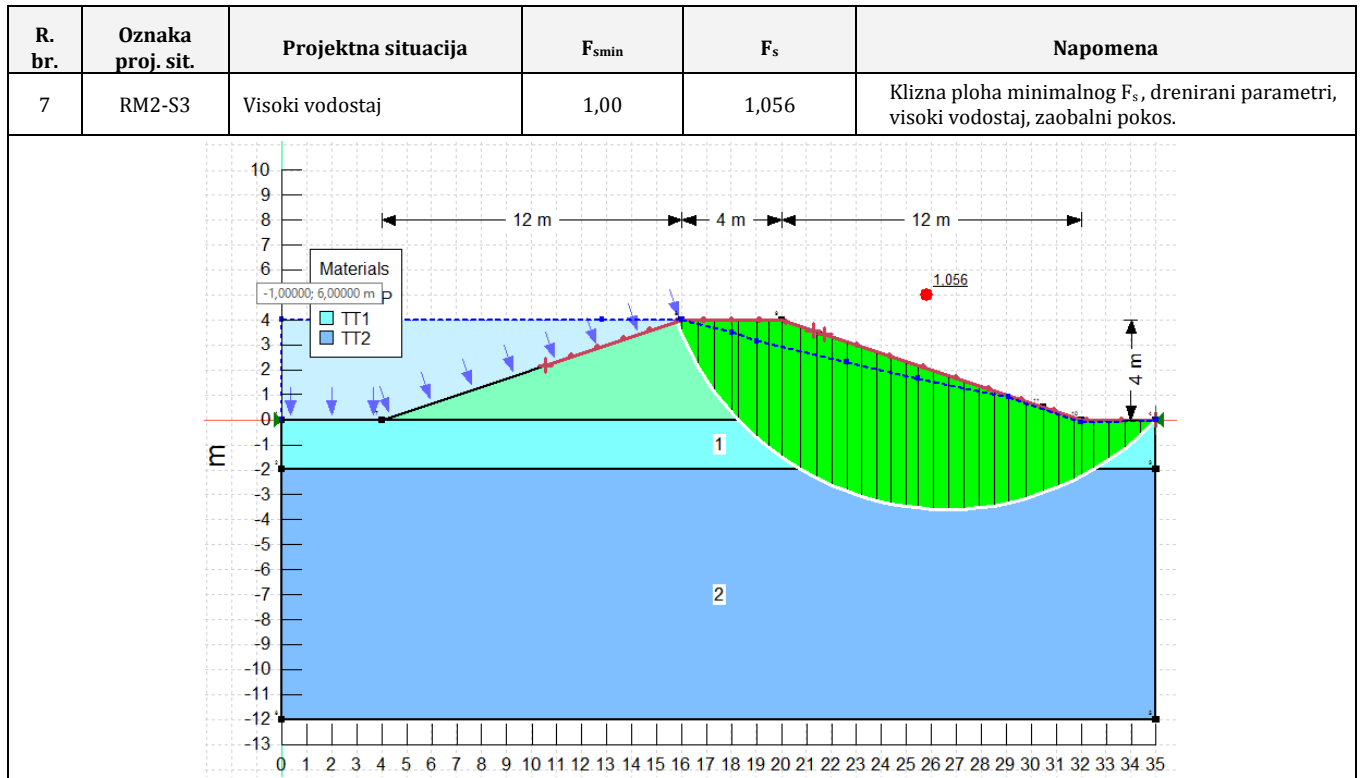
**5.5.5. RAČUNSKI MODEL RM2 - NASIP VISINE 4,0 M S POKOSIMA U NAGIBU 1:3 KRUNE ŠIRINE 4,0 M**

R. br.	Oznaka proj. sit.	Projektna situacija	$F_{smin}$	$F_s$	Napomena
5	RM2-S1	Završetak gradnje	1,00	1,582	Klizna ploha minimalnog $F_s$ , nedrenirani parametri, zaobalni pokos.

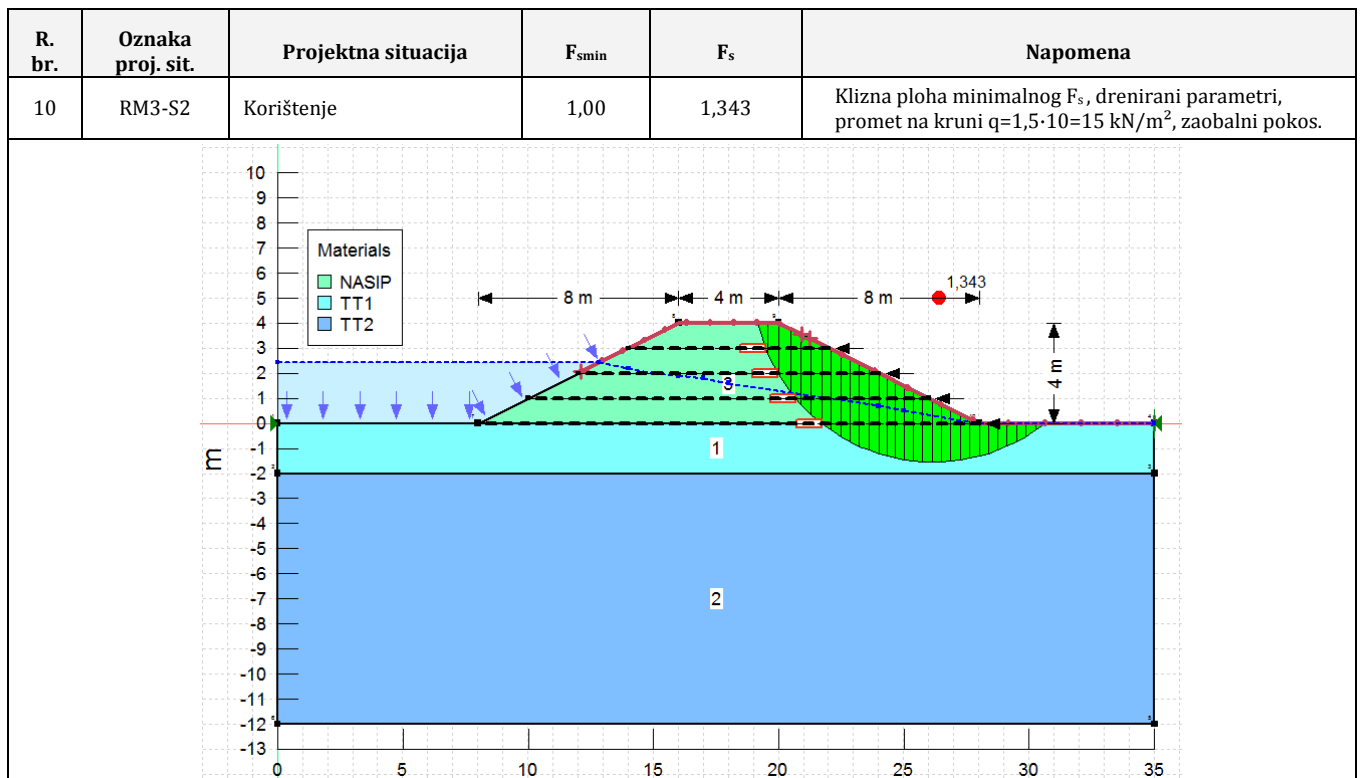
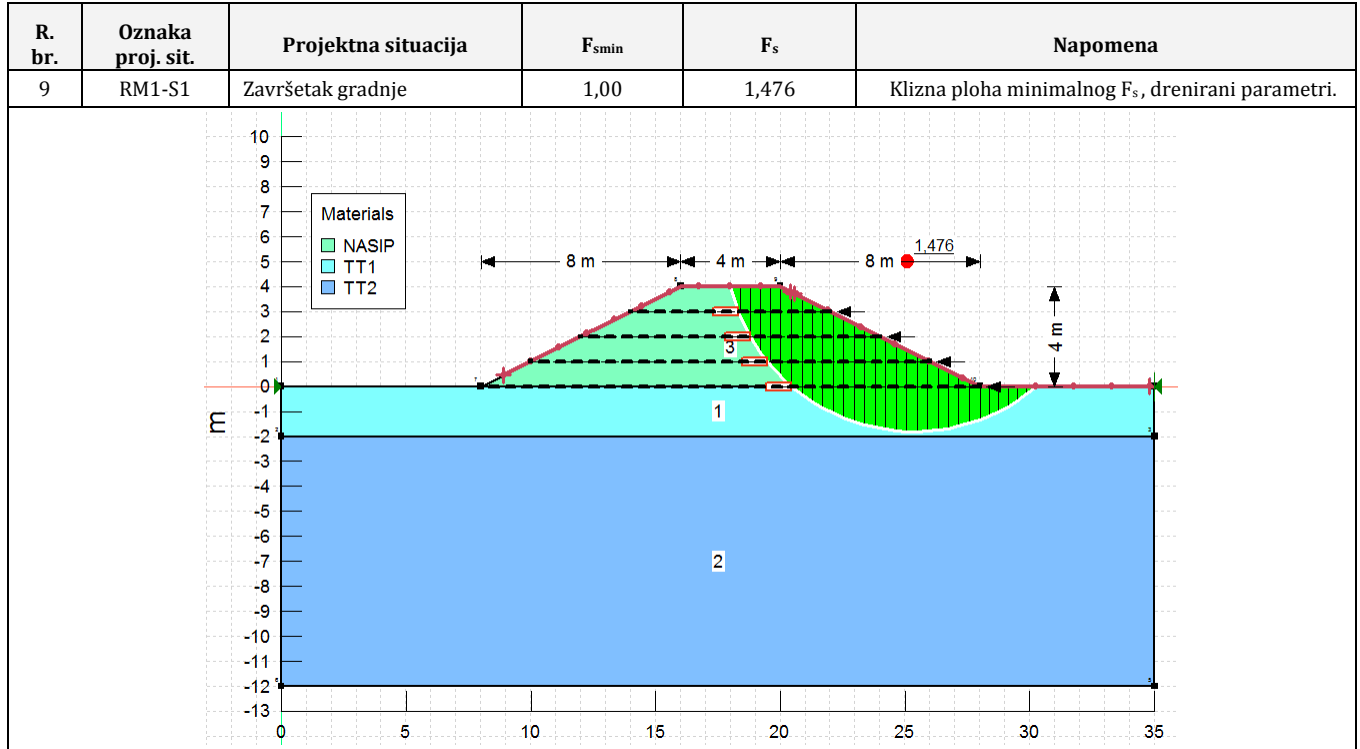


R. br.	Oznaka proj. sit.	Projektna situacija	$F_{smin}$	$F_s$	Napomena
6	RM2-S2	Korištenje	1,00	1,157	Klizna ploha minimalnog $F_s$ , drenirani parametri, zaobalni pokos.

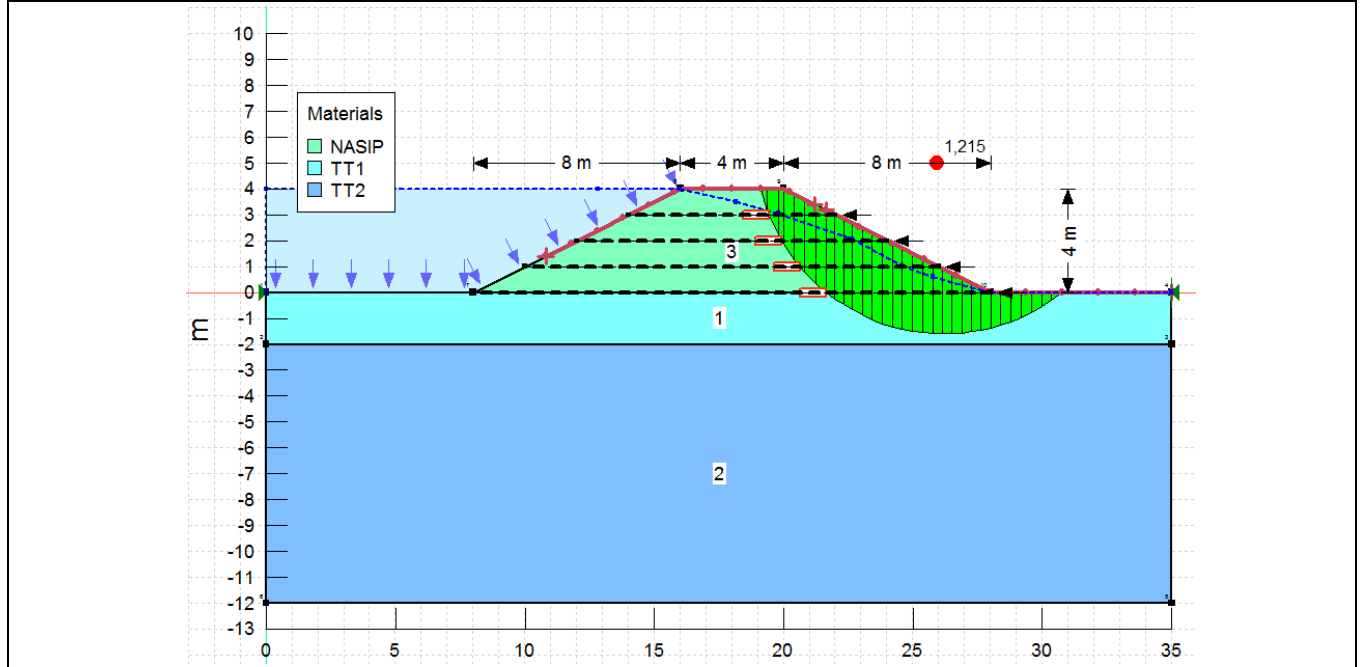




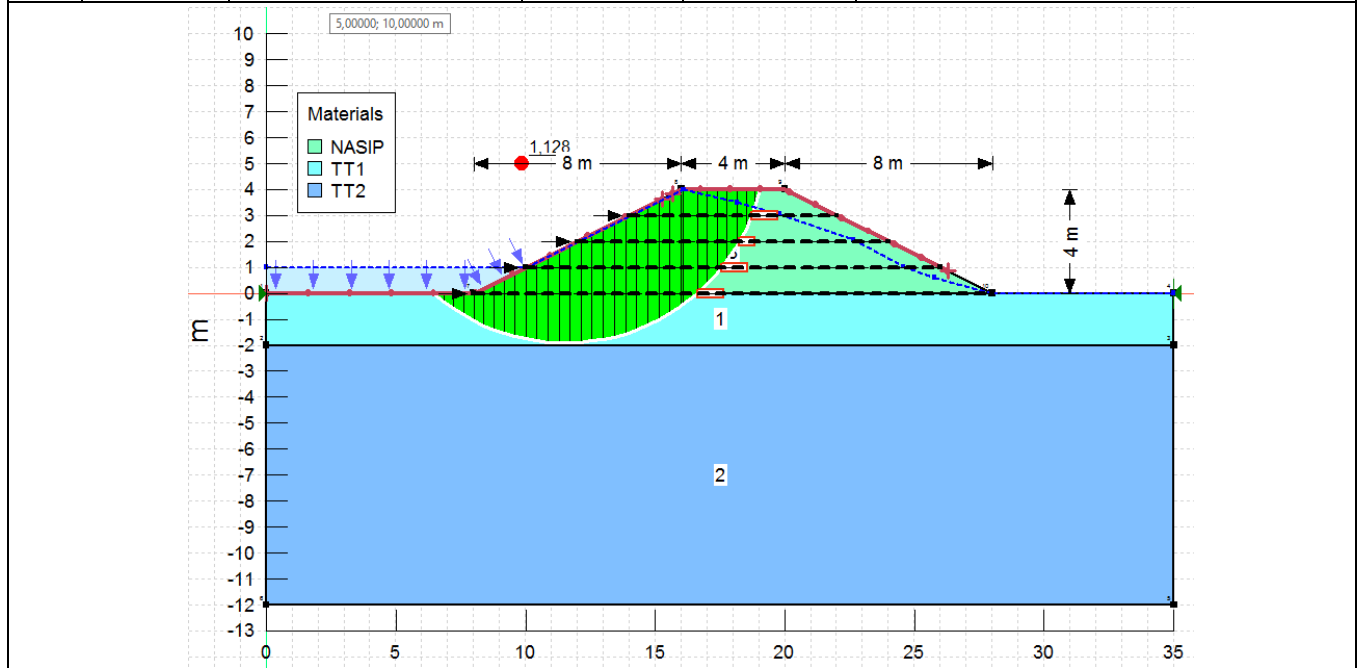
**5.5.6. RAČUNSKI MODEL RM3 - NASIP VISINE 4,0 M S POKOSIMA U NAGIBU 1:2 SA UGRAĐENIM OJAČANJEM GEOSITETICIMA – GEOMREŽA.**



R. br.	Oznaka proj. sit.	Projektna situacija	$F_{smin}$	$F_s$	Napomena
11	RM3-S3	Visoki vodostaj	1,00	1,215	Klizna ploha minimalnog $F_s$ , drenirani parametri, visoki vodostaj, zaobalni pokos.



R. br.	Oznaka proj. sit.	Projektna situacija	$F_{smin}$	$F_s$	Napomena
12	RM3-S4	Naglo sniženje	1,00	1,128	Klizna ploha minimalnog $F_s$ , drenirani parametri, naglo sniženje vodostaja, vodni pokos nasipa.



## 5.6. ANALIZA STABILNOSTI ZA SEIZMIČKO OPTEREĆENJE

Inicijalna analiza stabilnosti na potres provedena je kvazistatičnom metodom. Proračun provjerava granično stanje stabilnosti na pojavu kliznih ploha, za utjecaj komponenti horizontalnog i vertikalnog ubrzanja u tlu od potresa.

Karakteristični parametri tla odabrani za proračun stabilnosti prikazani su u tablici:

grupa, vrsta i oznaka materijala	zapreminska težina $\gamma_w$ (kN/m <sup>3</sup> )	nedrenirana čvrstoća $c_{uk}$ (kPa)	kohezija $c'_k$ (kPa)	kut unutrašnjeg trenja $\varphi'_k$ (°)
(1) POVRŠINSKA GLINA	19	26	8	17
(2) GLINA - DUBLJI SLOJ	19	20	6	12
(3) NASIP	19	35	9	19

### 5.6.1. PROJEKTNJA SITUACIJA

Naponsko stanje pri nastupu potresa simulirano je kao dodatna sila koja djeluje u težištu svake pojedine lamele. Dodatna sila je podijeljena na horizontalnu i vertikalnu komponentu.

Iznosi komponenti dodatnih sila definirane su prema izrazima:

- horizontalna komponenta:  $F_H = 0,5 \cdot \alpha \cdot S \cdot W$

- vertikalna komponenta:  $F_V = \pm 0,5 \cdot F_H$

gdje je:

$\alpha$  - ubrzanje tla izraženo postotkom gravitacije (g) za predmetnu lokaciju

$$T_p=475; \alpha=0,134 \cdot g$$

S - parametar tla prema tipovima tla iz EN 1998 - 1:2004, temeljno tlo je definirano kao tip B (S=1,20)

W - težina kliznog tijela (za potrebe proračuna uzima se 1,0).

Prema tome za povratni period  $T_{p=475}$  vrijednosti horizontalne i vertikalne komponente iznose:

- horizontalna komponenta:  $F_H = 0,5 \cdot \alpha \cdot S \cdot W = 0,5 \cdot 0,134g \cdot 1,20 \cdot 1 = 0,0804g$

- vertikalna komponenta:  $F_V = 0,5 \cdot F_H = 0,5 \cdot 0,080 = 0,0402g$

Tablica prikazuje karakteristike za određeni tip temeljnog tla prema EC8:

Tip tla	Opis geotehničkog profila tla	$v_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (n/30cm)	$C_u$ (kPa)
A	Stijena ili druga geološka formacija uključujući najviše 5 m slabijeg materijala na površini.	>800	-	-
B	<b>Nanosi vrlo zbijenoga pijeska, šljunka ili vrlo krute gline debljine najmanje nekoliko desetaka metara, sa svojstvom postupnoga povećanja mehaničkih svojstava s dubinom.</b>	<b>360 - 800</b>	<b>&gt;50</b>	<b>&gt;250</b>
C	Debeli nanosi srednje zbijenoga 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 m 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		10-20
S2	Nanosi likvefakcijski osjetljivog tla pijeska i gline ili bilo koji tip tla koji nije opisan od A do E i pod S1			

**LEGENDA:**

$v_{s,30}$  - srednja vrijednost brzine (L) poprečnih površinskih valova

$N_{SPT}$  - standardni penetracijski test (broj udaraca)

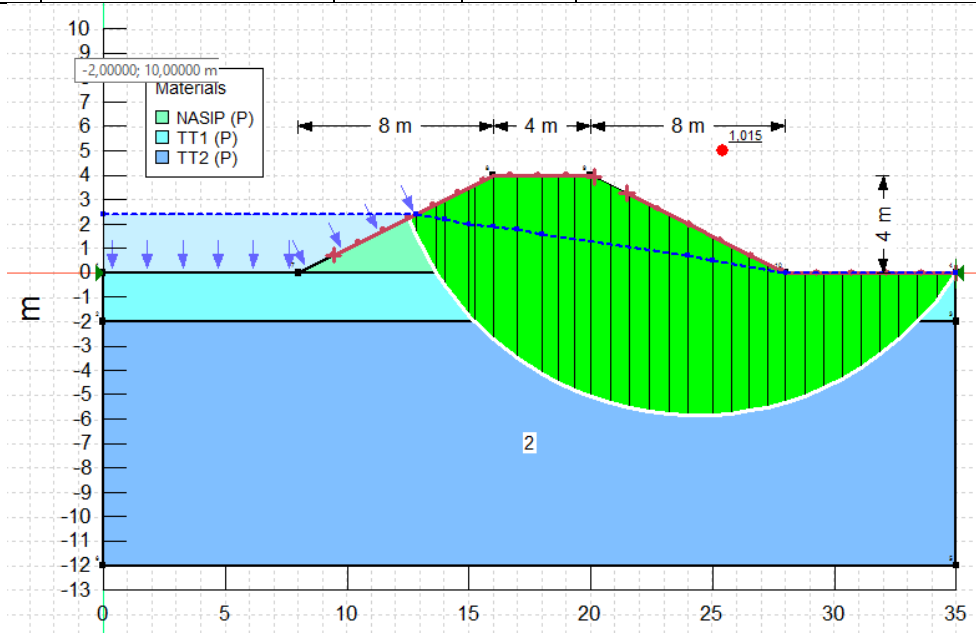
$C_u$  - posmična čvrstoća tla

TIP TLA	S	$T_B$ (s)	$T_c$ (s)	TD (s)
A	1,0	0,15	0,4	2,0
B	<b>1,2</b>	<b>0,15</b>	<b>0,5</b>	<b>2,0</b>
C	1,15	0,20	0,6	2,0
D	1,35	0,20	0,8	2,0
E	1,4	0,15	0,5	2,0

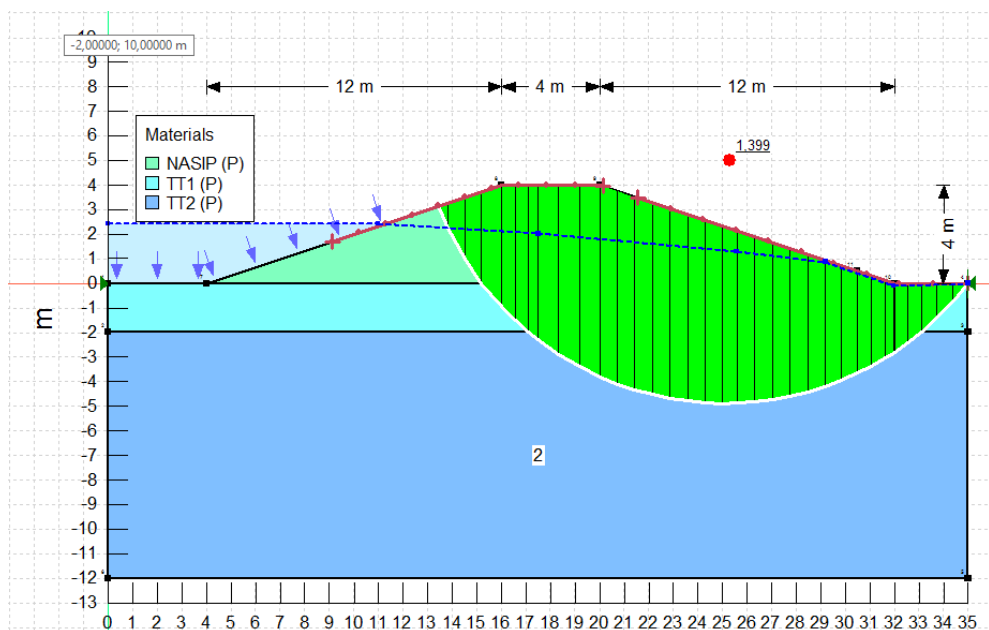
### 5.6.2. REZULTATI PRORAČUNA

Pojedinačni prikaz rezultata proračuna stabilnosti:

R. br.	Oznaka proj. sit.	Projektna situacija	$F_{smin}$	$F_s$	Napomena
1	RM1-S4	Potres	1,00	1,015	Klizna ploha u fazi eksploatacije uslijed djelovanja potresa, nedrenirani parametri.

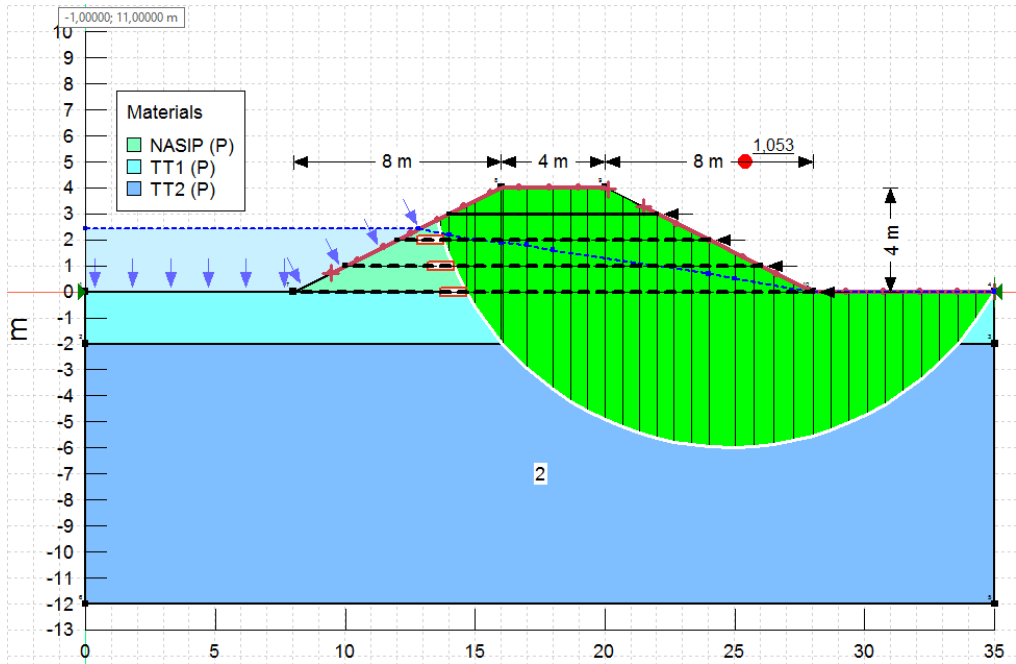


R. br.	Oznaka proj. sit.	Projektna situacija	$F_{smin}$	$F_s$	Napomena
2	RM2-S4	Potres	1,00	1,399	Klizna ploha u fazi eksploatacije uslijed djelovanja potresa, nedrenirani parametri.





R. br.	Oznaka proj. sit.	Projektna situacija	$F_{smin}$	$F_s$	Napomena
3	RM3-S4	Potres	1,00	1,053	Klizna ploha u fazi eksploatacije uslijed djelovanja potresa, nedrenirani parametri.



## 5.7. ANALIZE PROCJEĐIVANJA I HIDRAULIČKE STABILNOSTI

Izvršena je stacionarna analiza toka vode kroz tijelo nasipa za obranu od poplava. Nasip za obranu od poplava je retencijskog, a ne akumulacijskog karaktera, stoga je provedena analiza hidrauličke stabilnosti nepovoljnija od stvarne situacije.

Radni modeli RM3 je geometrijski i po parametrima tla isti kao RM1 te se analiza primjenjuje na jednom modelu.

Postupak provjere nastupanja hidrauličkog sloma tla sastoji se od usporedbe računskog hidrauličkog gradijenta ( $i$ ) sa kritičnim hidrauličnim gradijentom ( $i_{CR}$ ).

Kritični hidraulični gradijent je onaj pri kojem voda ispire i iznosi čestice temeljnog tla ili nasipa i zbog kojeg dolazi do sloma tla koji se naziva hidraulični slom tla.

Hidraulički gradijent ( $i$ ) se određuje prema slijedećoj formuli:

$$i = \frac{\Delta H}{L} = \frac{H_{više} - H_{niže}}{L} \quad [1]$$

Kritični hidraulični gradijent:

$$i_{CR} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} \quad [1]$$

gdje je:

$\Delta H$  [cm] - razlika hidrauličkog potencijala vode

$L$  [cm] - najkraći put kretanja vode (procjedna linija)

$\gamma$  [kN/m<sup>3</sup>] - težina tla

$\gamma'$  [kN/m<sup>3</sup>] - uronjena jedinična težina tla

$\gamma_w$  [kN/m<sup>3</sup>] - obujamska težina vode

Ocjena sigurnosti nasipa od hidrauličkog sloma tla donosi se usporedbom dobivenog hidrauličkog gradijenta i kritičnog hidrauličkog gradijenta. Nasip zadovoljava u pogledu hidrauličkog sloma ako je proračunati hidraulički gradijent ( $i$ ) manji od kritičnog hidrauličkog gradijenta ( $i_{CR}$ ), tj. :

$i < i_{CR}$  - nije nastupio hidraulički slom tla

$i > i_{CR}$  - nastupio je hidraulički slom tla

Izračun kritičnog hidrauličnog gradijenta:

$$i_{CR} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{19 \left[ \frac{kN}{m^3} \right] - 10 \left[ \frac{kN}{m^3} \right]}{10 \left[ \frac{kN}{m^3} \right]} = 0,9 [1]$$

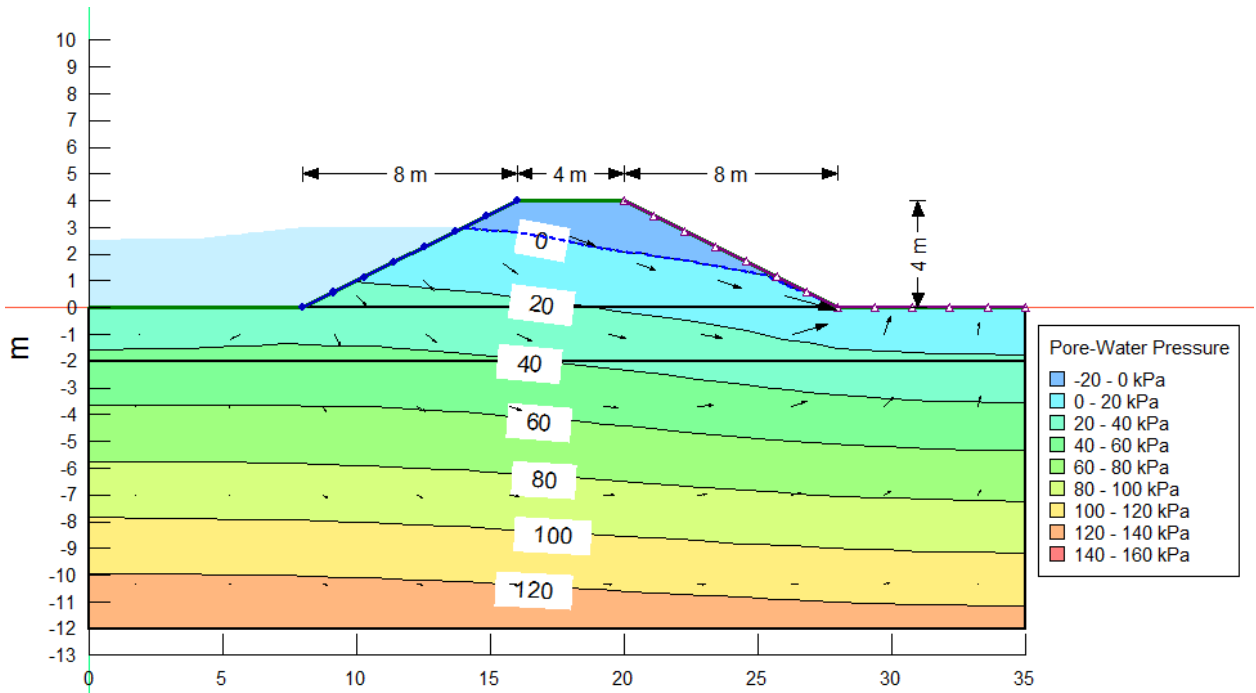
### 5.7.1. MODEL TLA

Vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti određeni su na temelju laboratorijskih istražnih radova i iskustva sa sličnim materijalima i dani su u tablici:

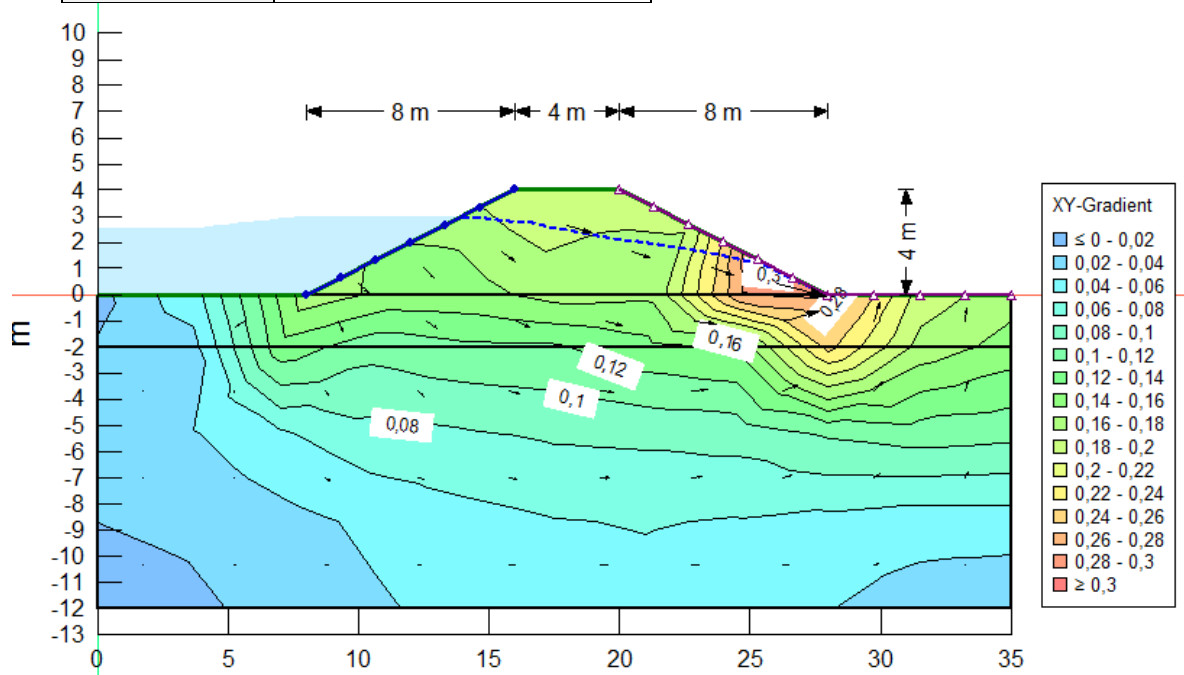
grupa, vrsta i oznaka materijala	Koeficijent propusnosti $k_x$ [m/s]
(1) POVRŠINSKA GLINA	$2 \cdot 10^{-7}$
(2) GLINA - DUBLJI SLOJ	$2 \cdot 10^{-8}$
(3) NASIP	$2 \cdot 10^{-7}$

### 5.7.2. PRIKAZ REZULTATA PRORAČUNA

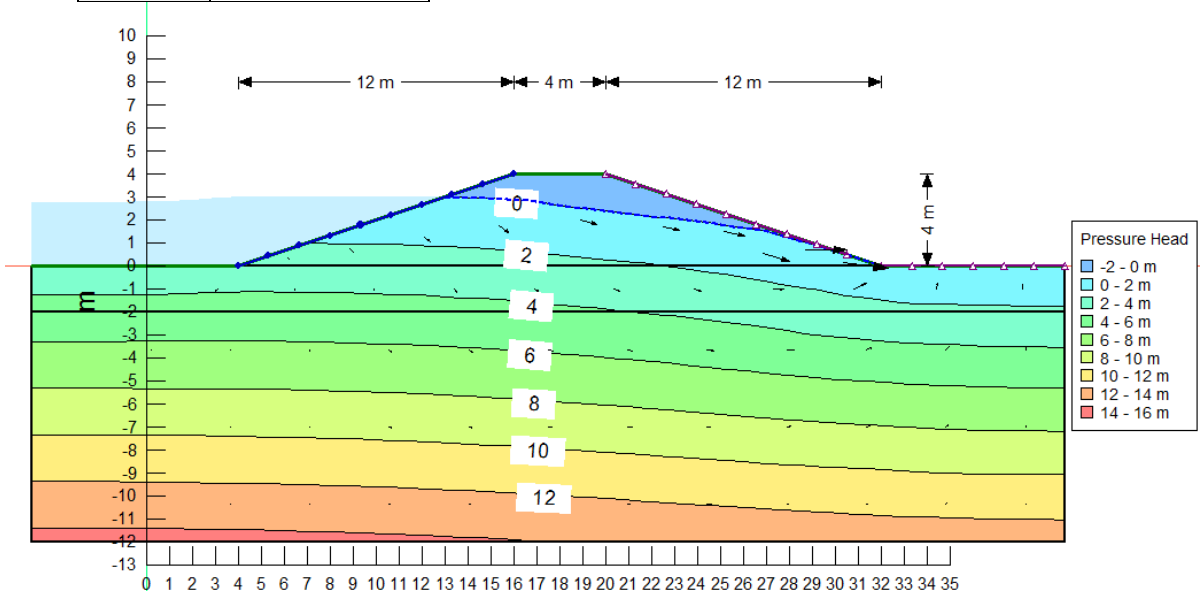
RM1 / RM3    Ekvipotencijale



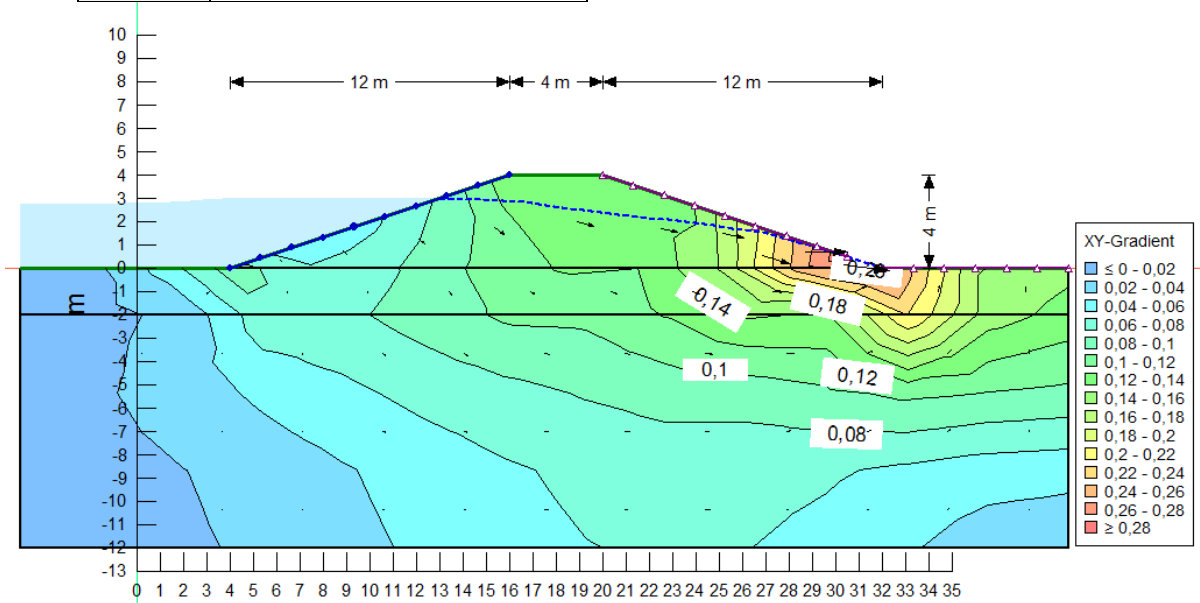
RM1 / RM3    Izo linije izlaznog gradijenta i



RM2 Ekvipotencijale



RM2 Izo linije izlaznog gradijenta i



## 6. ANALIZA REZULTATA

Numeričkim analizama dobivene su vrijednosti faktora sigurnosti za odabrane cilindrične/poligonalne klizne plohe kojima se karakterizira globalna stabilnost pokosa.

Minimalni potrebni faktori sigurnosti iznose  $F_s=1,0$ .

Vrijednosti dobivenih faktora sigurnosti prikazane su u sljedećoj tablici:

Tablica 11. Računski faktori sigurnosti

Projektna situacija		Računski model nasipa sa opisom		
		RM1 pokos 1:2	RM2 pokos 1:3	RM3 pokos 1:2 +geosintetik
S1	Završetak gradnje	1,424	1,582	1,476
S2	Korištenje	1,095	1,157	1,343
S3	Visoki vodostaj	0,952	1,056	1,215
S4	Naglo sniženje vodostaja	1,033	1,125	1,128
S5	Potres	1,015	1,399	1,053

### 6.1. ANALIZA STABILNOSTI

Faktori sigurnosti za stabilnost završenog nasipa su približno isti i kreću se od 1,424 (RM1-S1), 1,476(RM3-S1) za nasipe sa pokosom 1:2 odnosno 1,582 (RM2-S1) za nasip sa pokosom 1:3. Kod proračuna stabilnosti u fazi završetka nije vidljivo bitnije poboljšanje karakteristika primjenom ojačanja geosinteticima.

Kod situacije uobičajenog korištenja vidljivo je osjetno povećanje faktora sigurnosti nasipa pokosa 1:2 sa ugrađenim gesinteticima (RM3-S2) u odnosu na nearmirani nasip pokosa 1:2 (RM1-S2) sa  $F_s=1,095$  na  $F_s=1,343$  također i u odnosu na nasip sa pokosom 1:3 koji ima  $F_s=1,157$  (RM2-S2).

Visoki doprinos sigurnosti nasipa primjenom geosintetika prikazan je modelom (RM3-S3) kod kojeg je zabilježen faktor sigurnosti  $F_s=1,215$  dok nasip istih geometrije bez ojačanja geosinteticima ima nezadovoljavajući faktor sigurnosti od  $F_s=0,952$ .

Kod naglog sniženja vodostaja također je zabilježen doprinos armiranja nasipa geosinteticima povećanjem faktora sigurnosti na  $F_s=1,128$  na modelu (RM3-S4) sa osnovnog

modela nasipa gdje je zabilježena skoro granična vrijednost faktora sigurnosti od  $F_s=1,033$  (RM1-4). Nasip sa pokosima 1:3 ima faktor sigurnosti  $F_s=1,125$  (RM2-S4).

Provedenim numeričkim analizama stabilnosti i proračunskim rezultatima zaključujemo da projektirani računski modeli za provjeravane projektne situacije, zadovoljavaju kriterije stabilnosti osim u slučaju visokog vodostaja nasipa s pokosom 1:2 (RM1-S3).

## 6.2. ANALIZA STABILNOSTI ZA POTRES

Analiza stabilnosti na potres provedena je u situaciji korištenja kod razine vode 1,2m ispod krune nasipa. Prema provedenoj analizi globalne stabilnosti dobiveni faktori sigurnosti zadovoljavaju minimalno tražene za slučaj potresa povratnog perioda 475 godina za odabranu geometriju nasipa.

Numeričkim analizama dobivene su zadovoljavajuće vrijednosti faktora sigurnosti za odabrane cilindrične/poligonalne klizne plohe kojima se karakterizira globalna stabilnost nasipa na potres.

Kod proračuna stabilnosti na potres najveći faktor sigurnosti  $F_s=1,399$  ima nasip sa pokosima 1:3 (RM2-S4) dok nasip sa pokosom 1:2 pokazuje slične vrijednosti 1,015 (RM1-S4) i 1,053 (RM3-S4). Ugradnjom geosintetika na način opisan u ovom radu ne pridonosi značajnije stabilnost nasipa na potres.

## 6.3. ANALIZA PROCJEDIVANJA

Zbog kratkotrajnog trajanja visokog vodostaja stacionarno stanje strujanja vode kroz tijelo nasipa neće se ostvariti. Analizirano je stacionarno strujanje vode jer ono nepovoljnije djeluje na hidrauličku stabilnost nasipa.

Provedenim proračunima dokazana je hidraulička stabilnost nasipa.

Model	Max. dop. vr. $i_{CR}$	Max. vrijednost $i_{max}$
RM1 / RM3	0,90	0,30
RM2	0,90	0,26

## 7. ZAKLJUČAK

Nasip obrane od poplava su hidrotehničke inženjerske građevine koje imaju trajnu ili povremenu funkciju zaštite branjenog područja od poplava. Kao i kod svih inženjerskih struktura projektant mora poznavati i razumjeti fizikalno - mehanička svojstva temeljnog tla i materijala izgradnje te kako će temeljno tlo i konstrukcija nasipa reagirati pod opterećenjem, bilo tijekom gradnje ili u fazi korištenja, u normalnim i ekstremnim operativnim uvjetima.

U svrhu definiranja parametara tla s kojim će se provesti analiza konstrukcije nasipa nužna je provedba kvalitetnih geomehaničkih istražnih radova i laboratorijskih ispitivanja.

Analizom rezultata terenskih i laboratorijskih ispitivanja određuju su parametri materijala tla na lokaciji nalazišta i duž lokacije nasipa. Rezultati o provedenim geotehničkim radovima i preporuke za odabir geotehničkih parametara temeljnog tla i materijala sa nalazišta daju se u geotehničkom elaboratu.

Za potrebe projektiranja nasipa izrađuju se geotehnički modeli nasipa sa karakterističnim vrijednostima materijala temeljnog tla i materijala ugradnje.

Geostatičkim proračunima za predviđene situacija dokazuje se da će građevinska konstrukcija tijekom njenog građenja i uporabe ispunjavati temeljni zahtjev mehaničke otpornosti i stabilnosti u dijelu u kojem tlo, stijena i podzemna voda utječu na tu građevinsku konstrukciju.

Ako se geostatičkim proračunima na geotehničkim modelima ne dokaže stabilnost jedno od geotehničkih rješenja je poboljšanje svojstava tla i slojeva nasipa geosinteticima. Primjenom geosintetika povećavamo otpor kliznog tijela na posmična naprezanja. Ugradnjom geosintetika u slojeve nasipa dodajemo sile otpora koje se aktiviraju kretanjem kliznog tijela na način prenošenja poprečnih sila preko geosintetika trenjem u okolno tlo van klizne plohe.

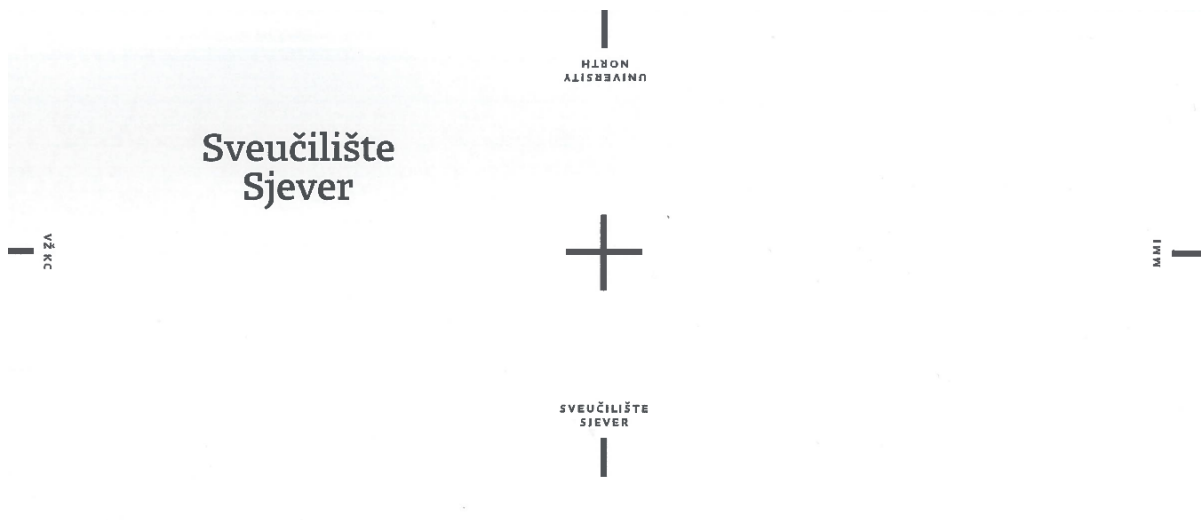
Varaždin, 19.10.2020

Ivica Kovačić





## 8. IZJAVA O AUTORSTVU



### IZJAVA O AUTORSTVU

#### I

#### SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Ivica Kovačić (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Nasip za obranu od poplava armiran geosinteticima (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Ivica Kovačić   
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, Ivica Kovačić (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Nasip za obranu od poplava armiran geosinteticima (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

Ivica Kovačić   
(vlastoručni potpis)

## 9. LITERATURA

### Literatura:

- [1.] Krahn, J. (2004.): „Seepage modeling with SEEP/W“, Geoslope international ltd, Canada
- [2.] Krahn, J. (2004.): „Stability modeling with SLOPE/W“, Geoslope international ltd, Canada
- [3.] CIRIA C731, (2013.): „The International levee Handbook. CIRIA“, London
- [4.] Roje-Bonacci, T. (2015.): „Nasute građevine“, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split
- [5.] Mulabdić M. i suradnici (2016): „Priručnik za primjenu geosintetika u nasipima za obranu od poplava“, Građevinski fakultet, Osijek
- [6.] Kovačić I. (2016): „Terenska i laboratorijska ispitivanja materijala pri izgradnji prometnica“, Sveučilište Sjever, Varaždin
- [7.] „Transverzalni nasip od oteretnog kanala Odra do savskog nasipa kod sela Suše“, E-066-17-01 (2018); Geokon-Zagreb d.d., Zagreb

### Norme i propisi:

- [8.] Eurokod 7: Geotehničko projektiranje, HRN EN 1997-1:2012 i HRN EN 1997 1:2012/NA:2012
- [9.] Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija, HRN EN 1998-5:2011 i HRN EN 1998-5:2011/NA:2011
- [10.] Opći tehnički uvjeti za radove u vodnom gospodarstvu (2010): Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu i Institutu IGH d.d., Zagreb

**POPIS SLIKA:**

Slika 1.1. Shematski prikaz nasipa osnovnim elementima.....	1
Slika 1.2. Lokacija nalazišta u fazi pripreme za eksploataciju .....	2
Slika 1.3. Nalazište u fazi eksploatacije .....	2
Slika 1.4. Uređeno nalazište .....	3
Slika 2.1. Geotehnički istražni radovi na nalazištu .....	6
Slika 2.2. Prikaz rezultata geoistražnog bušenja.....	7
Slika 2.3. Zapisnik vizualne identifikacija i klasifikacija tla .....	9
Slika 2.4. Džepni penetrometar i džepna krilna sonda .....	12
Slika 3.1. Casagrandeov uređaj sa ispitnim uzorkom .....	16
Slika 3.2. Dijagram određivanja granica plastičnosti .....	16
Slika 3.3. Pripremljeni uzorci valjčića kod ispitivanje granica plastičnosti .....	17
Slika 3.4. Prikaz rezultata ispitivanja određivanja granica konzistencije tla .....	18
Slika 3.5. Laboratorijska aparatura za Proctor-ov pokus .....	19
Slika 3.6. Prikaz rezultata ispitivanja optimalnog sadržaja vode .....	21
Slika 3.7. Set laboratorijskih sita za ispitivanje granulometrijskog sastava sijanem .....	23
Slika 3.8. Laboratorijska oprema za određivanje granulometrijskog sastava metodom areometriranja .....	25
Slika 3.9. Prikaz rezultata ispitivanja granulometrijskog sastava.....	26
Slika 3.10. Prikaz rezultata laboratorijskog ispitivanja izravnog posmika.....	27
Slika 3.11. Prikaz ćelije izravnog posmika sa ugrađenim uzorkom .....	28
Slika 3.12. Prikaz uzorka ispitanog na posmik .....	29
Slika 3.13. Edometar sa ugrađenim uzorkom u ćeliji za ispitivanje.....	30
Slika 3.14. Ispitivanje vodopropusnosti u edometru .....	31
Slika 4.1. Ugradnja geosintetika - troosna geomreža tip Tensar – TriAx TX 190L – armiranje tla.....	36
Slika 4.2. Ugradnja geosintetika – geotekstil GEO PP HP 300 – razdjelno / nosivi sloj....	36
Slika 4.3. Ugradnja geokompozita – Bentonitni tepih Modulo Geobent XP 5/310 – razdjelno / brtveni sloj.....	37
Slika 4.4. Ugradnja geokompozita – VMax SC250 - ojačanje pokosa nasipa.....	37
Slika 5.1. Primjer modela nasipa sa računskim kliznim plohama .....	39

**SADRŽAJ TABLICA:**

Tablica 1.	Prethodna ispitivanja materijala za izradu nasipa od zemljanih materijala .....	4
Tablica 2.	Geotehničke kategorije prema EC 7 [8] .....	5
Tablica 3.	Korelacijska tablica vrijednosti SPT-a i svojstava nekoherentnog tla.....	11
Tablica 4.	Korelacijska tablica vrijednosti SPT-a i svojstava koherentnog tla (glina).....	11
Tablica 5.	Laboratorijska ispitivanja uzoraka tla.....	14
Tablica 6.	Popis sita prema ASTM D 422 .....	22
Tablica 7.	Tipovi geosintetika sa primjenom.....	34
Tablica 8.	Podjela geosintetika.....	35
Tablica 9.	Parcijalni faktori za djelovanja (A).....	38
Tablica 10.	Parcijalni faktori za parametre tla (M2).....	38
Tablica 11.	Parcijalni faktori otpora (R) .....	39
Tablica 12.	Računski faktori sigurnosti.....	59