

Analiza razvoja klizišta u umanjenom fizičkom modelu izazvanog oborinama

Brajdić, Monika

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:766970>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-14**



Repository / Repozitorij:

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



image not found or type unknown

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Monika Brajdić

ANALIZA RAZVOJA KLIZIŠTA U UMANJENOM FIZIČKOM MODELU IZAZVANOG
OBORINAMA

Diplomski rad

Rijeka, 2024.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Sveučilišni diplomski studij

Geotehnika

Stabilnost kosina

Monika Brajdić

JMBAG: 0114031840

ANALIZA RAZVOJA KLIZIŠTA U UMANJENOM FIZIČKOM MODELU IZAZVANOG
OBORINAMA

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2024.

IZJAVA

Diplomski rad izradila sam samostalno u suradnji s mentorom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva uz odnosu na ovaj rad.

Monika Brajdić

U Rijeci, rujan 2024.

Želim se zahvaliti svojem mentoru prof. dr. sc. Željku Arbanasu što je prihvatio mentorstvo, savjetovao tijekom pisanja rada te na prenesenom znanju i podršci tijekom studiranja.

Također, želim se zahvaliti komentoru dr. sc. Josipu Peraniću na uloženom trudu, vremenu i susretljivosti prilikom izrade modela i pisanja rada.

Najveće hvala mojoj mami Mirjani i tati Milanu koji su mi omogućili da ovako nešto posebno i veliko postignem. Hvala mojim sestrama Anamarii i Heleni koje su mi pružale podršku tijekom cijelog mog obrazovanja, od osnovne škole pa sve do fakultetskih dana. Hvala vam jer bez vaše podrške i ljubavi ne bih bila tu gdje jesam.

Posebno bih se zahvalila mojoj kumi Karli koja mi je kao član obitelji. Hvala ti za svaku riječ utjehe, a pogotovo ti hvala za nezaboravne trenutke koje smo provele studirajući zajedno u Rijeci.

Hvala baki Ruži i dedi Dragi što su uvijek držali fige za prolaze na ispitu i vjerovali u mene.

I za kraj,

Veliko hvala mojim prijateljima, Svenu, cimericama, Gorani i njezinim curkama i kolegama na nezaboravnim trenucima, smijehu i neplaniranim avanturama koje su ovo razdoblje pretvorili u najljepše uspomene. Hvala vam za potporu koju ste pružili, skrpitu koju ste posudili i pomogli tijekom učenja.

Hvala mojoj šefici Ireni za podršku i sve savjete koje je nesebično podijelila samnom.

SAŽETAK

Opasnost od klizišta je ozbiljna elementarna nepogoda koja može prouzročiti značajne materijalne štete i ugroziti ljudske živote. Najčešći uzrok pojave klizišta su oborine, odnosno kada u kratkom periodu padaju velike količine kiše, zatim potres i ljudski faktor. Cilj ovog diplomskog rada je realizacija laboratorijskog ispitivanja na umanjenom modelu klizišta koje je simulirano oborinama, odnosno kišom s različitim intenzitetom. Na Građevinskom fakultetu u Rijeci provodi se ispitivanje u laboratoriju za geotehniku. Ispitivanja na umanjenim modelima su od velike koristi jer se dobivaju korisne informacije i podaci koji se kasnije mogu koristiti prilikom sanacije klizišta ili drugih sličnih ispitivanja u modelu. Korištenjem senzora koji se ugrađuju u model otkrivaju se korisne informacije vezane za vlažnost tla, porni pritisak i pomake. Ovaj diplomski rad prikazuje utjecaj vode na kosinu, odnosno utjecaj vlažnosti tla i pornih pritisaka te prezentira rezultate koji su uslijedili iz analiza prikupljenih podataka s mjernih uređaja.

Ključne riječi: stabilnost kosine, klizište, vlažnost tla, porni pritisci, umjetna kiša, fizičko modeliranje, oprema

ABSTRACT

The risk of a landslide is a serious natural disaster that can cause significant material damage and endanger human lives. The most common cause of landslides is precipitation, i.e. when large amounts of rain fall in a short period of time, followed by earthquakes and the human factor. The aim of this thesis is to carry out a laboratory test on a reduced model of a landslide, which is simulated by precipitation, i.e. rain with different intensity. At the Faculty of Civil Engineering in Rijeka, testing is carried out in the geotechnical laboratory. Tests on reduced models are very useful because useful information and data are obtained that can later be used during the rehabilitation of landslides or other similar tests in the model. By using sensors that are built into the model, useful information related to soil moisture, pore pressure and displacements is revealed. This graduate thesis shows the influence of water on the slope, that is, the influence of soil moisture and pore pressures, and presents the results that followed from the analysis of the data collected from the measuring devices.

Key words: slope stability, landslide, soil moisture, pore pressures, artificial rainfall, physical modeling, equipment

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Općenito o klizištima	2
1.2. Dimenzije klizišta.....	3
1.3. Elementi klizišta.....	4
1.4. Tipovi klizišta.....	7
2. Opis modela kosine i ugradnja materijala.....	12
2.1. Priprema i ugradnja materijala	14
3. Oprema.....	20
3.1. Mjerači vlažnosti	22
3.2. Mjerač pornih pritisaka	25
4. Rezultati pokusa.....	27
5. Analiza rezultata pokusa	31
6. Zaključak.....	40
7. Literatura.....	42

Popis slika

Slika 1. Dimenzije klizišta [2].....	4
Slika 2. Elementi klizišta [2]	5
Slika 3. Shematski prikaz elemenata klizišta [6].....	7
Slika 4. Shematski prikaz odrona [6]	8
Slika 5. Shematski prikaz prevrtanja [6]	9
Figure 6. Shematski prikaz rotacijskog klizanja [6]	9
Figure 7. Shematski prikaz translacijskog klizanja [6].....	10
Slika 8. Shematski prikaz širenja tla [6].....	11
Slika 9. Shematski prikaz toka [6].....	11
Slika 10. Shematski prikaz skaliranog fizičkog modela [13].....	12
Slika 11. Shematski prikaz umanjenog modela (dimenzijame su prikazane u cm)	13
Slika 12. Prazan model pripremljen za izradu pokusa s geomrežom pričvršćenom na donje čelične ploče i drenažnim elementima u donjem dijelu modela	13
Slika 13. Model kosine s nagibom od 35 stupnjeva izgrađen od čistog, jednoliko granuliranog, finog pijeska na početku ispitivanja.....	14
Slika 14. Miješalica u kojoj se miješao suhi materijal s vodom.....	15
Slika 15. Alat koji se koristi tijekom ugradnje materijala: nabijači (lijevo) i nazubljena špahtla (desno).....	17
Slika 16. Model kosine s prikazanim donjim dijelom modela sa u potpunosti ugrađen materijalom i središnji dio u kojem je materijal djelomično ugrađen.....	18
Slika 17. Prikaz senzora teros 10 (desni stupac, 4 komada) i teros 31 (lijevi stupac, 2 komada)	19
Slika 18. Sprinkleri koji se nalaze na središnjem dijelu modela	19
Slika 19: Prikaz uređaja za prikupljanje podataka i njihovu pohranu.....	20
Slika 20. Shematski prikaz pozicija senzora i sprinklera [1].....	21
Slika 21. Dimenzije senzora TEROS 10 [9].....	22
Slika 22. Dijelovi senzora TEROS 10 [9]	23
Slika 23. Dimenzije senzora TEROS 12 [10].....	24

Slika 24. Dijelovi snezora TEROS 12 [10]	25
Slika 25. Dijelovi senzora TEROS 31 [11]	26
Slika 26. Model na početku pokusa $t = 1$ min	27
Slika 27. Prva pukotina pojavila se nakon 59 minuta od početka pokusa.....	28
Figure 28. Lijevo slika prikazuje trenutak prije nastanka kružne klizne plohe, a desno slika prikazuje kružnu kliznu plohu	29
Slika 29. Stanje modela nakon 80 minuta pokusa.....	30
Slika 30. Završetak pokusa, prikaz stanja modela s gornjeg i donjeg dijela	30
Slika 31. Shematski prikaz pozicije senzora u modelu	31
Slika 32. Grafički prikaz mjerenja senzora Teros 10 – gornji dio (U).....	32
Slika 33. Grafički prikaz mjerenja senzora Teros 10 – središnji dio (M)	33
Slika 34. Prikaz što se odvija u modela u vremenu između 130. i 140. minute.....	34
Slika 35. Grafički prikaz mjerenja senzora teros 10 – donji dio (L)	35
Slika 36. Grafički prikaz senzora teros 10 i 12 ugrađeni na dubini od 18 cm.....	35
Slika 37. Grafički prikaz sadržaja vode i pornih pritisaka na vertikali na M dijelu modela	36
Figure 38. Grafički prikaz sadržaja vode i pornih pritisaka na vertikali na donjem dijelu modela	37
Slika 39. Prikaz modela nakon što je prošlo 42 minute od početka pokusa.....	38
Slika 40. Prikaz klizne plohe i stanje modela nakon 10-ak minuta od početka pokusa	39

Popis tablica

Tablica 1. Tipovi nestabilnosti.....	8
Tablica 2. Svojstva čistog pijeska.....	16
Tablica 3. Ukupna količina materijala koji je ugrađen u model	16
Tablica 4. Specifikacija senzora TEROS 10.....	23
Tablica 5. Specifikacija senzora TEROS 12.....	25
Tablica 6. Specifikacija senzora TEROS 31	26

1. Uvod

Klizišta su prirodni geološki procesi koji se odnose na kretanje tla, kamenja ili drugih materijala niz padinu zbog utjecaja gravitacije. Mogu biti izazvana različitim faktorima koji su vezani uz prirodne procese, kao što su erozija, kiša, potresi, vulkanske aktivnosti, ali i ljudske aktivnosti, kao što su krčenje šuma i slično [2].

U svijetu klizišta smatraju se jednim od najopasnijih geoloških pojava, ugrožavaju sigurnost u osjetljivim urbanim i ruralnim sredinama, a samim time rezultiraju ozbiljnim ljudskim i ekonomskim gubicima. Povećanje intenziteta i učestalosti padalina dovodi do pojave, odnosno aktivacije novih ili starih klizišta [1, 3].

Proces klizanja tla obuhvaća više faza i ovisi o nekoliko čimbenika koji utječu na stabilnost kosine. Taj proces može biti polagan i trajan ili brz i iznenađan. Najbitniji čimbenik je sama izgrađenost kosine, odnosno geološka građa i nehomogenost materijala. Kako se promatra geotehnički profil prema dubini, tako variraju materijalne značajke tla, ali i razina podzemne vode.

Za potrebe izrade ovog diplomskog rada korišten je skalirani fizički model u kojem se prikazuje simulacija pokretanja i gibanja klizišta koje je potaknuto infiltracijom oborina s pomoću sprinklera. Fizički modeli su korisni za modeliranje nezasićenog tla na kosinama gdje se pojavljuju klizišta u uvjetima djelomično zasićenog do zasićenog tla. Glavni cilj ovih modela je infiltracija oborina u nezasićeno tlo na kosinama i pokretanje klizišta [3].

Upotrebom odgovarajućih senzora i mjerne opreme koja se koristi za nadziranje ponašanja modela, ostvaruju se podaci koji se mogu upotrebljavati samostalno ili se mogu kombinirati s numeričkim modelima. Ukoliko su izvedeni neki posebno prilagođeni pokusi, tada se njihovi podaci također mogu koristiti pri verifikaciji drugih analitičkih rješenja [3].

U radu je temeljito opisana cijela procedura ugradnje materijala u model. Zatim je opisana mjerna oprema koja se koristila tijekom ispitivanja, kao i njezine karakteristike. Također, prikazani su elementi klizišta, a opisani su tipovi klizišta. Općenito su opisana klizišta i navedene definicije koje su usko vezane uz rad te će pomoći pri daljnjem razumijevanju. Glavni cilj ispitivanja je prikazati i iščitati rezultate koji su dobiveni od opreme ugrađene u model.

Praćenje rezultata i što se događa u modelu omogućuju senzori koji su ugrađeni na već unaprijed određenim dubinama, a senzori služe za mjerenje pornih pritisaka, pomaka i sadržaja vlage u tlu. Između ostalog, fokus prilikom ispitivanja bio je usmjeren na intenzitet oborina koji se povremeno mijenjao. Intenzitet je bio jednolik tijekom cijelog pokusa. Eventualne promjene su se događale kada se na pojedinom dijelu modela ugasio sprinkler ili kada se pred sami kraj pokusa pojačao intenzitet da se ubrza urušavanje kosine. Rezultati ispitivanja doprinose poboljšanju sustava praćenja i odabrane mjerne opreme, kako u budućim ispitivanjima projekta, tako i u sličnim vrstama istraživanja u skaliranom fizičkom modeliranju.

1.1. Općenito o klizištima

Klizište se određuje kao gibanje mase stijena, krhotina ili zemlje niz padinu. Može se još opisati kao da označava svako pomicanje tla i stijena nizbrdo pod izravnim utjecajem gravitacije. Pojam "klizište" obuhvaća pet načina kretanja padina: padove, prevrtanja, klizanje, širenje i tečenje (kasnije u tekstu prikazano sa skicama i objašnjenjem). Oni se dalje dijele prema vrsti geološkog materijala (stijena, krhotine ili zemlja). Tokovi krhotina (obično se nazivaju tokovi blata ili klizišta) i odroni kamenja primjeri su uobičajenih tipova klizišta [4].

Klizanje (engl. landsliding, sliding) – proces otkidanja, a zatim kretanje mase (kliznog tijela) preko stabilne podloge putem translacije ili rotacije. Pokreti se događaju po jasno, a katkad nejasno izraženoj kliznoj plohi na kojoj je nastao slom. Doći će do puzanja kada dođe do usporavanja pokreta klizanja, ali i ne mora. Prema tipu pokreta razlikuju se translacijsko, rotacijsko i blokovsko klizanje [5].

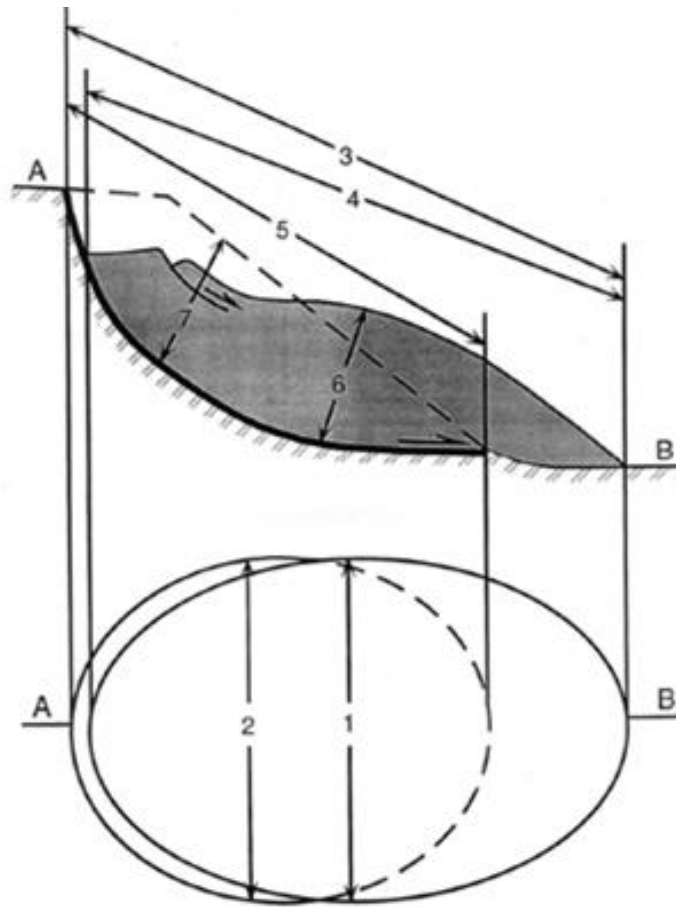
Klizište (engl. landslide, slide) – segment terena gdje je proces klizanja aktivan ili je bio aktivan u prošlosti. Za aktivno klizište kažemo da je kada su u tom trenutku zapažanja jasno vidljivi pomaci masa, a kada je došlo do mirovanja kretanja klizne mase ili koluvija, kažemo da je to umireno klizište. Prilikom klizanja dolazi do sloma materijala na kliznoj plohi; može biti kružna ako se radi o homogenom materijalu, a najčešće je uvjetovana geološkom građom. Na osnovu međusobnog položaja kliznih tijela, klizišta razlikujemo na: složena, pojedinačna, kompleksna, sukcesivna i višestruka. Ako ih dijelimo prema aktivnosti, onda su to: reaktivirano, aktivno, neaktivno, privremeno ili trajno umireno, stabilizirano i reliktno klizište [5].

Klizna ploha (engl. surface of rupture) – ili se još može nazvati ploha sloma, donja je granica pokrenutog materijala, a smjestila se ispod prvobitne površine terena [5].

1.2. Dimenzije klizišta

Na slici 1 su prikazane i označene dimenzije klizišta sa kratkim opisom svakog elementa.

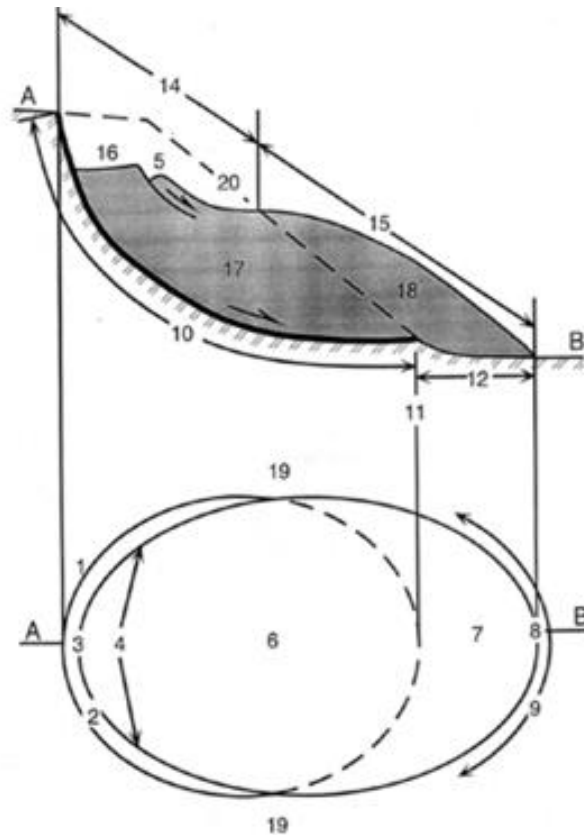
- 1. Širina pomaknute mase (Wd)** - maksimalna širina mase koja se pokrenula ona je okomita na duljinu pokrenute mase.
- 2. Širina plohe sloma (Wr)** - maksimalna udaljenost između bokova klizišta ona je okomita na duljinu plohe sloma.
- 3. Ukupna duljina (L)** - sveukupna udaljenost od krune do dna klizišta.
- 4. Duljina pokrenute mase (Ld)** - maksimalna udaljenost od vrha do dna klizišta.
- 5. Duljina plohe sloma (Lr)** - maksimalna udaljenost od krune klizišta do završne točke plohe sloma.
- 6. Dubina pokrenute mase (Dd)** - maksimalna dubina pokrenute mase, mjerena okomito na ravninu koju definiraju širina i duljina pokrenute mase.
- 7. Dubina klizne plohe (Dr)** - maksimalna dubina plohe sloma mjerena od originalne površine okomito na ravninu koju definiraju širina i duljina plohe sloma.



Slika 1. Dimenzije klizišta [2]

1.3. Elementi klizišta

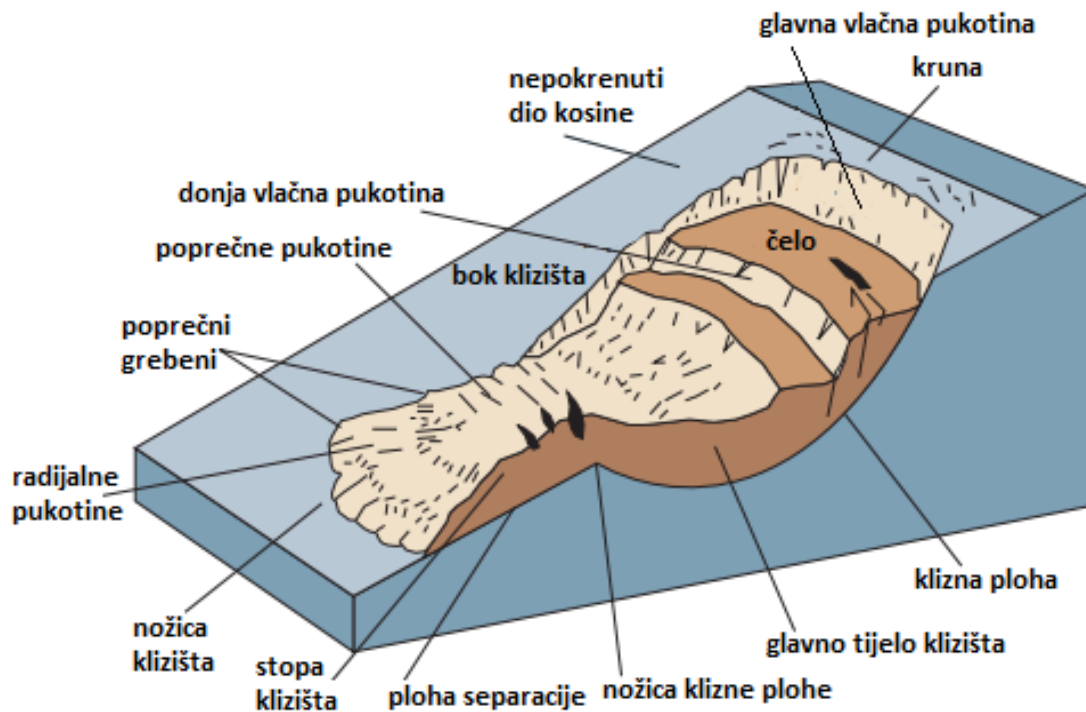
Prema definiciji (Cruden, 1977), klizište (nestabilnost) predstavlja "svaki pomak stijenske mase, nevezanog ili vezanog tla niz kosinu". Na slici 1 prikazani su elementi klizišta s kratkim opisom svakog elementa [2].



Slika 2. Elementi klizišta [2]

1. **Kruna klizišta** (eng. crown) - nepokrenuti materijal uz najviši dio iznad glavne vlačne pukotine.
2. **Glavna vlačna pukotina** (eng. main scarp) - vidljivi vrh klizne plohe u neporemećenom tlu u gornjem dijelu klizišta otvorene kretanjem klizne mase niz padinu.
3. **Vrh klizišta** (eng. top) - najviša točka kontakta pokrenute klizne mase i glavne vlačne pukotine.
4. **Čelo klizišta** (eng. head) - gornji dio kliznog tijela uz kontakt pokrenute klizne mase i glavne vlačne pukotine.
5. **Donja vlačna pukotina** (eng. minor scarp) - vlačna pukotina u pokrenutom materijalu klizišta nastala pomacima unutar pokrenute klizne mase.
6. **Glavno tijelo klizišta** (eng. main body) - dio pokrenutog materijala klizišta koji prekriva kliznu plohu između glavne vlačne pukotine i završetka klizne plohe.

7. **Stopa** (eng. *foot*) - dio klizišta koji je pokrenut dalje od završetka klizne plohe i naliježe direktno na izvornu površinu terena.
8. **Dno klizišta** (eng. *tip*) - najudaljenija točka u nožici klizišta.
9. **Nožica** (eng. *toe*) - donji rub pokrenutog materijala klizišta, obično zakrivljenog oblika, koji je najudaljeniji od glavne vlačne pukotine.
10. **Klizna ploha** (eng. *surface of rupture*) - ploha koja predstavlja donju granicu pokrenutog materijala, a nalazi se ispod izvorne površine terena.
11. **Nožica klizne plohe** (eng. *toe of surface of rupture*) - presječnica između donjeg dijela klizne plohe i izvorne površine terena.
12. **Ploha separacije** (eng. *surface of separation*) - dio izvorne površine terena prekriven stopom klizišta.
13. **Pokrenuti materijal** (eng. *displaced material*) - materijal pomaknut klizanjem iz svog prvobitnog položaja.
14. **Zona usjednutog materijala** (eng. *zone of depletion*) - područje klizišta unutar pokrenutog materijala koje je niže od izvorne površine terena.
15. **Zona akumulacije** (eng. *zone of accumulation*) - područje klizišta unutar pokrenutog materijala koje je više od izvorne površine terena.
16. **Usjedanje** (eng. *depletion*) volumen ograničen glavnom vlačnom pukotinom, usjednutom masom i izvornom površinom terena.
17. **Usjednuta masa** (eng. *depleted mass*) - volumen pokrenutog materijala koji leži na kliznoj plohi, ali ispod izvorne površine terena.
18. **Akumulacija** (eng. *accumulation*) - volumen pokrenutog materijala koji leži iznad izvorne površine terena.
19. **Bok** (eng. *flank*) - nepokrenuti materijal uz bočni dio plohe sloma.
20. **Izvorna površina terena** (eng. *original ground surface*) - površina kosine koja je postojala prije nego je došlo do klizanja.



Slika 3. Shematski prikaz elemenata klizišta [6]

Razumijevanje svih ovih elemenata koji su označeni na slici 3 ključno je za identifikaciju, prevenciju i zaštitu od klizišta. Adekvatan monitoring, pravilna drenaža i očuvanje vegetacije mogu značajno smanjiti rizik od pojave klizišta.

1.4. Tipovi klizišta

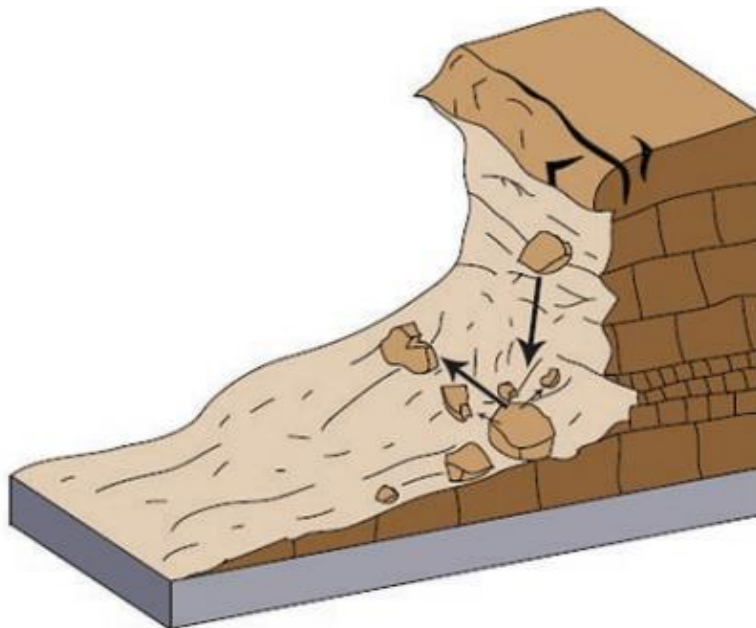
Prema Varnesu tipove klizišta dijelimo na:

- Odron,
- prevrtanje,
- klizanje,
- širenje tla i
- tok.

Tablica 1. Tipovi nestabilnosti [2]

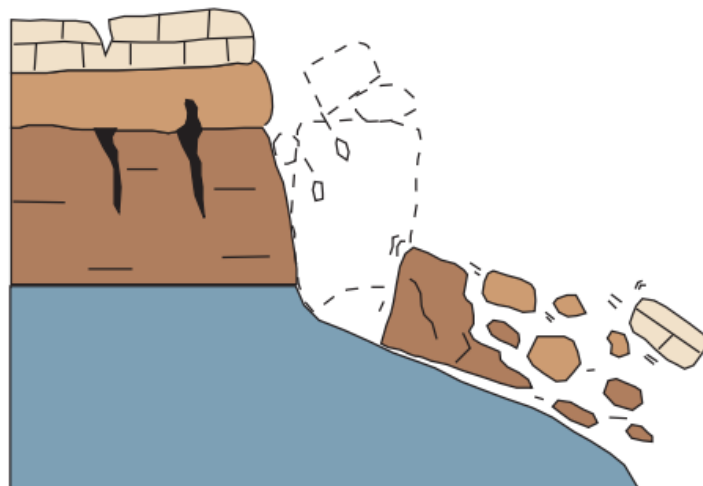
TIP KLIZANJA	TIP MATERIJALA		
	Stijenska podloga	Inženjersko tlo	
		Pretežno krupnozrnasto	Pretežno sitnozrnasto
Odron	Odron u stijeni	Odron nevezanog materijala	Odron tla
Prevrtanje	Prevrtanje stijene	Prevrtanje nevezanog materijala	Prevrtanje u tlu
Klizanje	Klizanje stijene	Klizanje nevezanog materijala	Klizanje tla
Širenje tla	Širenje stijene	Širenje nevezanog materijala	Širenje tla
Tok	Tečenje stijene	Tečenje nevezanog materijala	Blatni tok

Odron (*Rock fall* eng.) predstavlja brzo kretanje mase stijena, zemlje ili drugih materijala niz padinu koje se odvaja s kosina koje su strme i dolazi do slobodnog pada ili prevrtanja materijala jer na toj površini uopće nema smicanja. Odroni mogu biti izazvani različitim faktorima, kao što su prisustvo vode, odnosno oborina, procesi smrzavanja i otapanja, vibracije i slično [2].



Slika 4. Shematski prikaz odrona [6]

Prevrtanje (*Topple* eng.) je tip kretanja tla i stijena koji se događa kada se blokovi stijena rotiraju i kotrljaju niz padinu. Događa se rotacija prema naprijed oko osi (ili točke) na ili blizu podnožja bloka stijene. Može biti potaknuto gravitacijom, povremeno vodom ili ledom u pukotinama u stijeni [2].



Slika 5. Shematski prikaz prevrtanja [6]

Klizanje (*Landslide* eng.) je tip kretanja tla, stijena i drugih materijala niz padinu pod utjecajem gravitacije. Ovo kretanje može biti brzo ili sporo. Kretanjem manje ili veće mase vezanog ili nevezanog materijala niz kosinu prema jasno određenoj kliznoj plohi ili plohi sloma definira se klizanje. Prvi znakovi koji ukazuju na gibanje tla prepoznaju se kada se pojavi glavna vlačna pukotina [2]. Obzirom na geometriju klizne plohe klizanje se dijeli na:

- Rotacijsko klizanje,
- Translacijsko klizanje,
- Blokovsko klizanje.

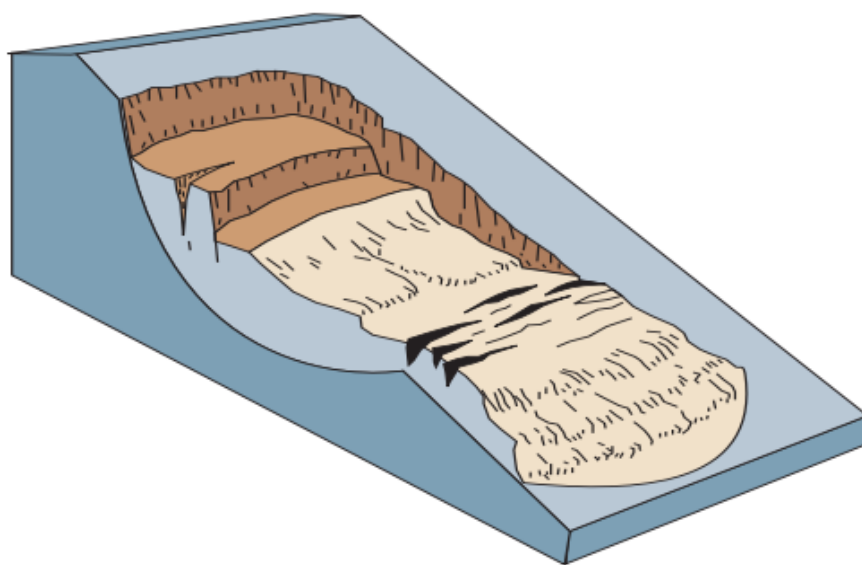


Figure 6. Shematski prikaz rotacijskog klizanja [6]

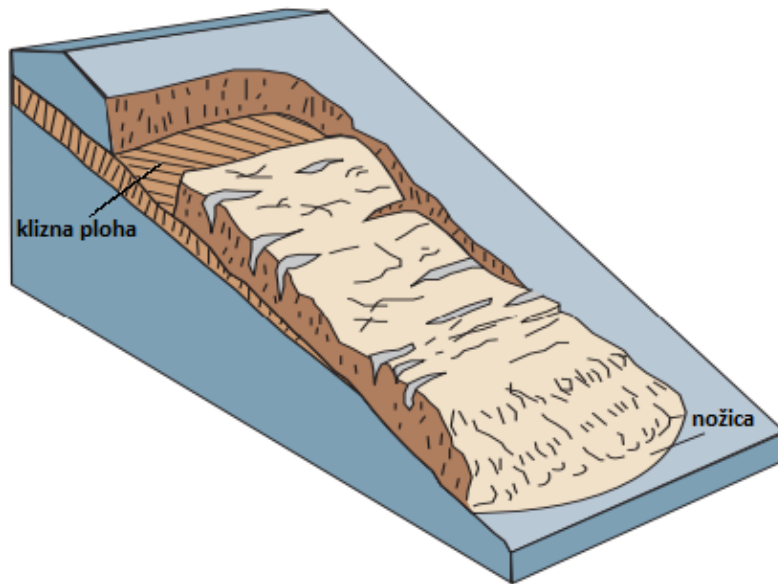
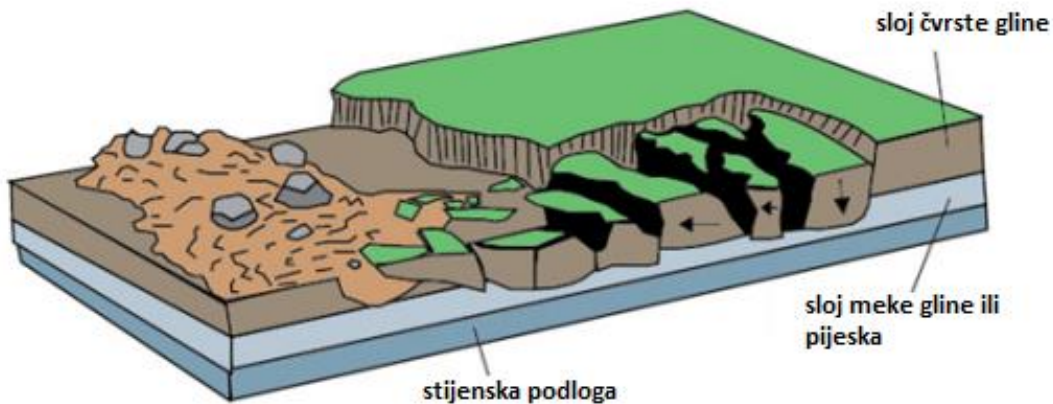


Figure 7. Shematski prikaz translacijskog klizanja [6]

Također, klizišta se uobičajeno klasificiraju prema svojoj aktivnosti. Njihova aktivnost uključuje stanje koje definira vrijeme u kojem se vrši aktivnost, a njihov proces aktivnosti opisuje smjer kretanja klizišta [2]. Stanja klizišta dijelimo na:

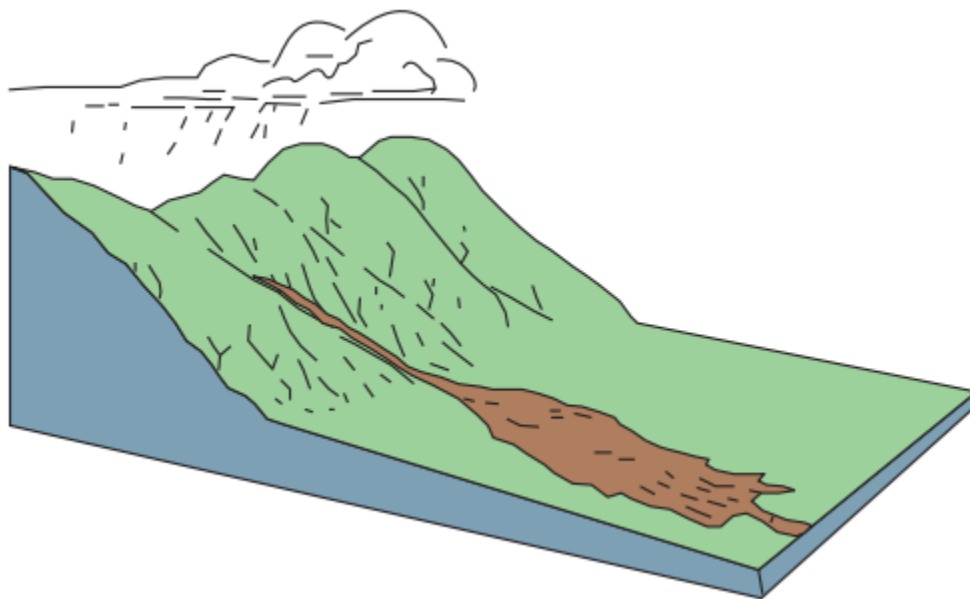
- Aktivno klizište – klizište koje je trenutno u pokretu,
- Reaktivno klizište – klizište koje je nekad bilo aktivno, ali je postalo neaktivno, ali se je opet aktiviralo,
- Trenutno neaktivno klizište – u posljednjih 12 mjeseci je bilo aktivno, ali trenutno nije,
- Neaktivno klizište – takvo klizište nije bilo aktivno u posljednjih 12 mjeseci, a njih još dijelimo na;
 - Privremeno umirena klizišta,
 - Trajno umirena klizišta,
 - Stabilizirana klizišta,
 - Reliktna (fosilna) klizišta.

Širenje tla (Soil spreading eng.) je geološki proces koji se dešava kada se površinski slojevi tla pomiču horizontalno ili tangencijalno, često zbog nestabilnosti u dubljim slojevima ili zbog promjena u opterećenju ili naprežanju tla. Točnije, dolazi do pomicanja dijelova s boljim karakteristikama tla po mekšoj podlozi [2].



Slika 8. Shematski prikaz širenja tla [6]

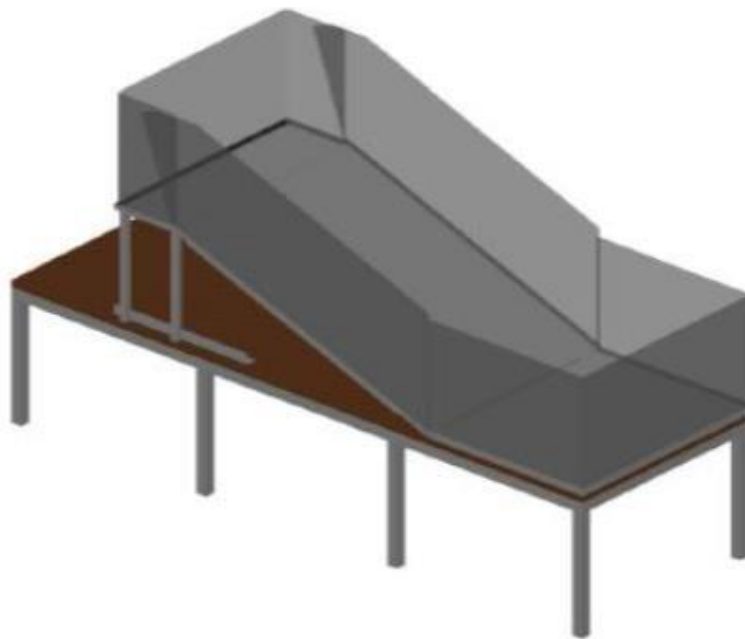
Tok (*Flow eng.*) je tip klizišta koji uključuje kretanje materijala niz padinu u obliku tekućine. Tokovi često za sobom ostavljaju prepoznatljive, naopako okrenute naslage u obliku lijevka gdje se materijal klizišta prestao kretati. Postoje različite vrste tokova: blato, krhotine i kamenje (kamene lavine). Mogu biti izazvani različitim faktorima, kao što su kiša, otapanje snijega, zemljotresi ili ljudske aktivnosti [2].



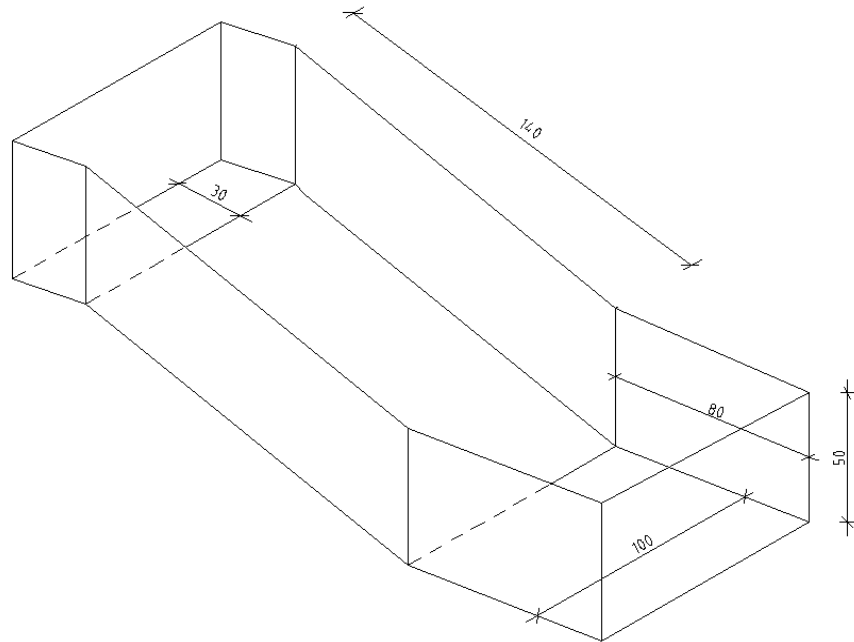
Slika 9. Shematski prikaz toka [6]

2. Opis modela kosine i ugradnja materijala

Pokus se izvodi na skaliranom fizičkom modelu čije su dimenzije donje plohe 80 x 100 cm, središnje plohe 140 x 100 cm i gornje plohe 30 x 100 cm, a prikaz 3D modela prikazan je na slici 10 s njegovim dimenzijama na slici 11. Model je osmišljen da omogući pokretanje klizišta uzrokovano kontroliranim umjetnim oborinama i opremljen je odgovarajućom opremom i sensorima na određenim dubinama pomoću kojih se mjeri vlažnost tla, pomaci i porni pritisci. Nosivi stol na kojem se nalazi model za pokus napravljen je od čeličnih elemenata i vodootporne ploče od blažujke. Okvir modela izrađen je od pleksiglasa, što omogućuje nesmetano promatranje promjena koje se događaju u modelu tijekom pokusa. Na rubovima gdje dolazi do promjene oblika, model je brtvljen da ne dođe do propuštanja tekućine i materijala. Moguće je prilagođavanje visine gornje ploče, a visina ovisi o kutu nagiba modela. Nagib modela može varirati od 20° do 45° , a prilikom ispitivanja nagib je bio 35° . Stanje modela prije početka ugradnje materijala prikazano je na slici 12. Dakle, unutrašnji dio modela treba biti čist, te ga je potrebno očistiti od eventualnih ostataka materijala od pokusa koji se izvodio prije. U nastavku rada detaljnije će se opisati priprema materijala i cijeli tijek ugradnje materijala, zatim opis senzora koji su se koristili i koja je njihova svrha [1, 7, 13].



Slika 10. Shematski prikaz skaliranog fizičkog modela [13]



Slika 11. Shematski prikaz umanjenog modela (dimenzijame su prikazane u cm)



Slika 12. Prazan model pripremljen za izradu pokusa s geomrežom pričvršćenom na donje čelične ploče i drenažnim elementima u donjem dijelu modela

2.1. Priprema i ugradnja materijala

Tlocrtna dimenzija umanjenog modela su 1,0 x 2,3 x 0,5 m. Prije početka ugradnje materijala u model, suhi materijal potrebno je pripremiti na vlažnost od $w = 2\%$. Prije ubacivanja suhog materijala u miješalicu koja je prikazana na slici 14, materijal se vagao te je na temelju njegove mase potrebno izračunati koliko je vode potrebno dodati kako bi se ostvarile odgovarajuće vrijednosti. U tablici 2 prikazane su vrijednosti mase mokrog materijala. Ugradnja materijala i zbijanje izvodili su se u slojevima radi postizanja jednolikih uvjeta po cijelom modelu. Za ovaj pokus bilo je potrebno pripremiti 45 vreća, od kojih je za donji dio modela L (*eng. low*) ugrađeno 15 vreća, središnji dio M (*eng. medium*) 25 vreća i za gornji dio U (*eng. upper*) 5 vreća.



Slika 13. Model kosine s nagibom od 35 stupnjeva izgrađen od čistog, jednoliko granuliranog, finog pijeska na početku ispitivanja

Za potrebe izrade pokusa, u model je ugrađen pijesak granulacije 0 - 1,0 mm. Ugrađeno je sveukupno 5 slojeva u svakom dijelu modela: gornji U, središnji M i donji L, a visina svakog sloja iznosi 6 cm. Postupak ugradnje materijala objašnjen je dalje u tekstu [12].

U uređaju za izravno smicanje određeni su parametri čvrstoće materijala s vrijednostima koje su zapisane u tablici 2, u kojoj su prikazane značajke čistog pijeska. Vrijednost sukcije pri vlažnosti od 2 % iznosi 6 – 8 kPa. Pri niskim normalnim napreznjima hidraulička vodljivost određena je u edometru, koja istodobno odgovara napreznjima u modelu, a vrijednost iznosi $k = 5 \times 10^{-5}$ m/s. Kut trenja iznosi 34,9 °. Model je izložen simuliranim oborinama iz ukupno tri grane sprinklera. Svaki sprinkler se nalazi na već prije određenom dijelu modela, a na slici 18 su prikazani sprinkleri koji se nalaze na središnjem dijelu modela [9, 12].



Slika 14. Miješalica u kojoj se miješao suhi materijal s vodom

Tablica 2. Svojstva čistog pijeska [8]

Parametar	Oznaka	Vrijednost	Mjerna jedinica
specifična gustoća	G_s	2,7	-
veličina zrna	D_{10}	0,19	mm
	D_{60}	0,37	mm
minimalni koeficijent pora	e_{min}	0,641	-
maksimalni koeficijent pora	e_{max}	0,911	-
koeficijent ujednačenosti	c_u	1,947	-
kut trenja	ϕ	34,9	°
kohezija	c	0	kPa
hidraulička konduktivnost	k_s	1,00E-05	m/s
inicijalni porozitet	n_i	0,44	-
inicijalna vlažnost	w_i	2	%
inicijalna relativna gustoća	D_i	0,5	%
inicijalni koeficijent pora	e_i	0,78	-

Jednako graduirani fini pijesak (S) korišten je u svim dijelovima modela, dakle, nema miješanja drugih vrsta materijala, već je korištena samo jedna. Kao što je već napomenuto, pijesak je postavljen na 50 % relativne gustoće i s 2 % početnog sadržaja vlage. U tablici 3 prikazane su otprilike ukupne količine materijala za svaki dio modela. Za gornji dio modela ukupna količina materijala koja je ugrađena iznosi otprilike 125 kg, odnosno ugrađeno je 5 vreća po 25 kg. U središnjem dijelu modela ukupna količina materijala koja je ugrađena iznosi otprilike 700 kg, ugrađeno se sveukupno 25 vreća, a za donji dio ukupna masa iznosi otprilike 405 kg, odnosno pripremljeno je 15 vreća za ugradnju.

Tablica 3. Ukupna količina materijala koji je ugrađen u model

	masa [kg]	vreće [kom]	ukupna masa [mtot]
Donji dio L	27,00	15	405
Središnji dio M	28,00	25	700
Gornji dio U	25,00	5	125
			1230

Ugradnja se započinje od donjeg dijela modela. Materijal je ugrađen u pet slojeva. Dakle, za donji dio ubačeno je po tri vreće koje su ravnomjerno raspodijeljene, a materijal se s pomoću ručnog nabijača koji je prikazan na slici 15 (lijevo), zbijao jednolikom jačinom. Kako bi se slojevi što bolje povezali, na kraju svakog zbijanja površinu materijala potrebno je izrezbariti s pomoću nazubljene špahtle koja je prikazana na slici 15 (desno).

Nakon ugradnje drugog sloja u donjem dijelu modela, paralelno kreće ugradnja prvog sloja na središnjem dijelu. Radi lakše ugradnje materijala između L i M dijela postavlja se plastična prepreka, prikazana na slici 16, koja omogućuje da se materijali ne miješaju, odnosno da se tijekom ugradnje materijala gornji dio modela ne osipava i ne pada prema dolje.

Prvi sloj gornjeg dijela kreće završetkom drugog sloja na središnjem dijelu. Postupak ugradnje je isti kao i kod donjeg i središnjeg dijela. Najprije se ubacuje materijal (po jedna vreća), zatim se ravnomjerno raspodijeli po modelu i ručnim nabijačem jednoliko zbija do određene zbijenosti, a nazubljenom špahtlom svaki završni sloj potrebno je lagano izrezbariti. Tijekom ugradnje materijala, pijesak se mjestimično na površini suši te je potrebno s vremena na vrijeme prskati ga vodom kako ne bi izgubio početnu vlažnost.



Slika 15. Alat koji se koristi tijekom ugradnje materijala: nabijači (lijevo) i nazubljena špahtla (desno)



Slika 16. Model kosine s prikazanim donjim dijelom modela sa u potpunosti ugrađen materijalom i središnji dio u kojem je materijal djelomično ugrađen

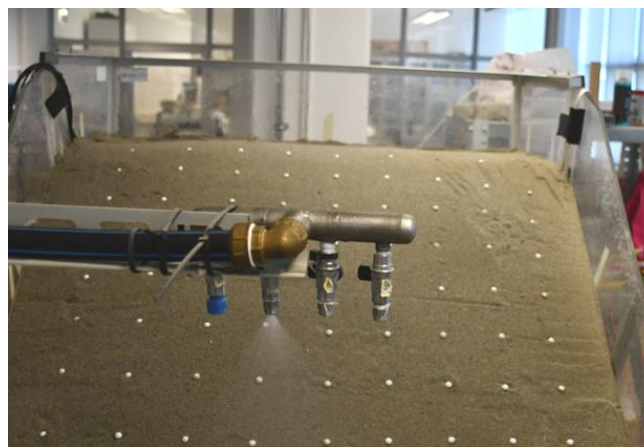
Nakon što je u potpunosti završen postupak ugradnje materijala u model, započinje postupak ugradnje mjerne opreme. Na već unaprijed određenim dubinama postavljaju se senzori koji su prikazani na slici 17. Senzori koji se koriste u pokusu su: Teros 10, Teros 12 i Teros 31, a oni služe za mjerenje pomaka, pornih pritisaka i vlažnosti (kasnije u tekstu će biti detaljnije objašnjeni). Ugrađuju se na kontaktu spojeva na dubinama od 6, 12, 18 i 24 cm. Sama ugradnja senzora nije komplicirana. Početak ugradnje kreće od donjeg dijela, a postupak je takav da se okomito, s pomoću špahtle, iskopa materijal te se u netaknuti dio ugradi senzor. Time se postiže preciznost i mjerodavne vrijednosti rezultata. Kako se završava ugradnja, tako se zasipava materijalom koji je

prije iskopan te se zbija na zbijenost koja je bila i na početku, kako bi se osigurali isti uvjeti koji su i na ostatku modela. Postupak ugradnje ponavlja se za središnji i gornji dio modela.



Slika 17. Prikaz senzora teros 10 (desni stupac, 4 komada) i teros 31 (lijevi stupac, 2 komada)

Na slici 18 prikazani su sprinkleri koji se koriste kao simulatori oborina. Postavljene su tri grane sprinklera po sredini modela kako bi ravnomjerno padala po modelu i simulirala oborinu, te otprilike na trećini svakog donjeg, središnjeg i gornjeg dijela, a svaka grana sprinklera sadrži još četiri mlaznice. Pozicionirani su na već određenoj visini, odnosno na 80 cm od ugrađenog materijala. Kut prskanja može varirati od 60° do 90° , a mlaz je oblikom stošca.

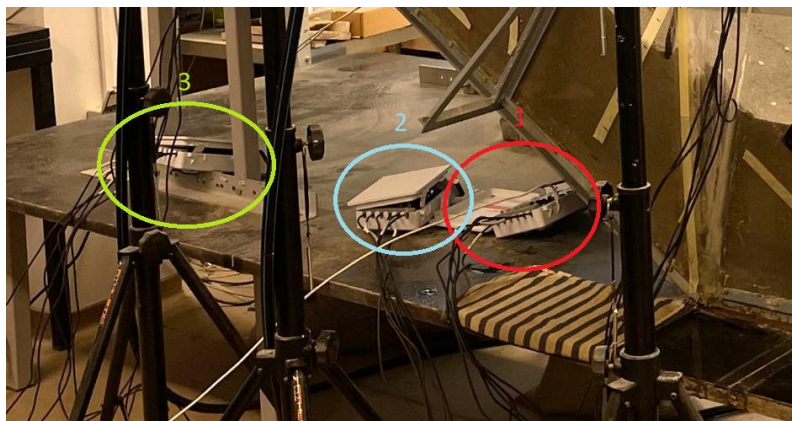


Slika 18. Sprinkleri koji se nalaze na središnjem dijelu modela

3. Oprema

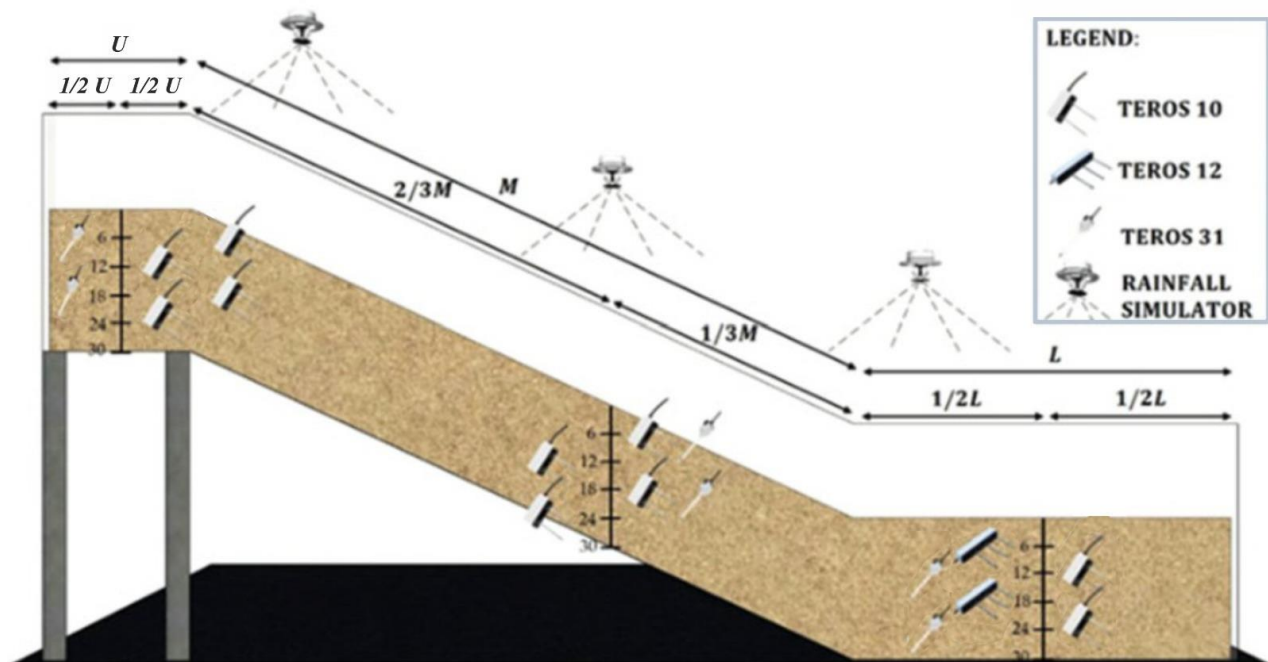
U nastavku će se opisivati oprema s pomoću koje se prati što se sve odvija u modelu tijekom pokusa. Vrlo važno pitanje kod svih vrsta skaliranih fizičkih modela je korištenje i ugradnja mjerne opreme potrebne za mjerenje kretanja, deformacija, tlaka, vlage i drugih parametara koji su potrebni za određivanje ponašanja kosine. Oprema koja se koristi prilikom izvođenja pokusa zapravo slijedi praksu praćenja kosina na stvarnim klizištima. U fizičkim modelima senzorski sustav dijeli se na geotehnički sustav motrenja i geodetski sustav motrenja. Geodetski sustav motrenja temelji se na fotogrametrijskoj opremi za višestruku analizu klizišta, ubrzanja i brzine mase tla tijekom klizanja po umjetnim padinama u fizičkim modelima. Prilikom istraživanja vrlo brzih pojava klizišta, moderne kamere (s velikom brzinom) su uređaji koji su omogućili dobivanje stereo sekvenci slika tijekom procesa klizanja. Za svrhu ovog diplomskog rada korišten je sustav za geotehničko praćenje koji se temelji na primjeni minijaturnih senzora ekvivalentnih opremi za geotehnička praćenja koja se koriste na terenu [1, 13].

Ovisno o eksperimentalnim uvjetima, informacije o sadržaju vlage u tlu, promjeni poroznog tlaka i podizanju razine vode trebaju biti dostupne u odgovarajućim vremenskim intervalima. Upotrebljavaju se digitalni senzori i pretvarači pritiska s odgovarajućim snimačima podataka čiji se intervali prikupljanja podataka mogu podesiti. Tijekom provođenja pokusa, senzori su povezani s uređajima za prikupljanje i pohranu podataka Zentra data logeri, ZL6. Svaki logger ima 6 portova za senzore, a ukupno su tri logera korištena za pokus te su oni prikazani na slici 19 [7, 13].



Slika 19: Prikaz uređaja za prikupljanje podataka i njihovu pohranu

Brzo prepoznavanje promjene vlage za različite poroznosti i gustoće tla omogućuju senzori za sadržaj vode u tlu. Takvi senzori upotrebljavaju kapacitivnu metodu za predviđanje volumetrijskog sadržaja vode u tlu. Tijekom izvođenja pokusa potrebno je bez prestanka istovremeno prikupljati podatke s različitih dubina i profila kako bi se dobile potpune informacije. Mjerači vlažnosti, Teros 10 i Teros 12 (kasnije u tekstu detaljnije objašnjeni), su senzori koji su ugrađeni paralelno sa slojevima na određenu visinu. Senzori su postavljeni na određenim lokacijama u modelu. U donjem dijelu modela postavljeni su na osi modela, na dubinama od 6, 12, 18 i 24 cm. Središnji dio ima drugačije vrijednosti dubina zbog kosine, a ugrađeni su na trećini modela na osi. U gornjem dijelu modela senzori su ugrađeni kao i prethodna dva, u osi modela. U gornjem dijelu, na visini 6 i 18 cm, ugrađen je senzor Teros 31, dok je Teros 10 ugrađen na svakoj visini. U središnjem dijelu modela Teros 10 ugrađen je na visinama 6, 12, 18 i 24 cm, a Teros 31 ugrađen je na visinama 6 i 18 cm. Mjerač vlažnosti tla, Teros 12, u donjem dijelu modela ugrađen je na visinama 6 i 18 cm, a Teros 10 na 12 i 24 cm, dok je mjerac pornih pritisaka Teros 31 ugrađen na visinama 12 i 24 cm. Pozicije i visine svih senzora i sprinklera prikazane su na slici 20.

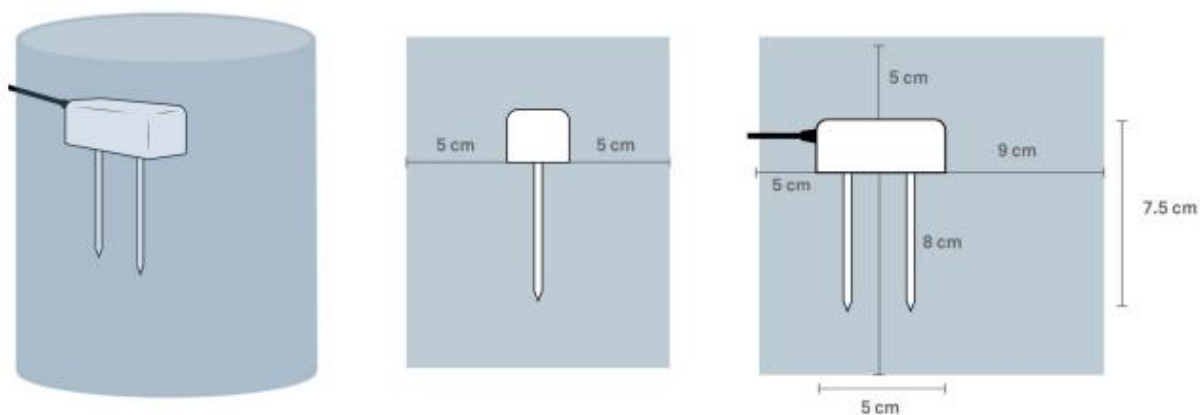


Slika 20. Shematski prikaz pozicija senzora i sprinklera [1]

3.1. Mjerači vlažnosti

Teros 10 i Teros 12 su senzori za neizravno mjerenje volumetrijskog sadržaja vode u tlima ili drugim poroznim materijalima. I jedan i drugi sensor temelje se na metodi kapacitivnosti za predviđanje količine vode u tlu na temelju električnih svojstava tla i kalibracije.

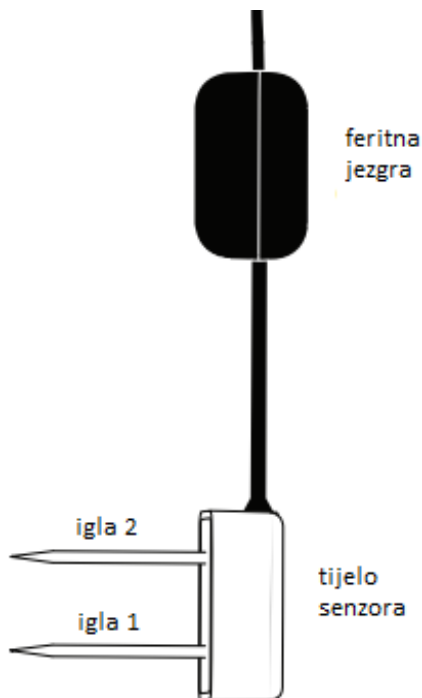
Na slici 21 prikazane su dimenzije senzora Teros 10, a dijelovi na slici 22. Ukupna visina iznosi 7,5 cm. Sastoji se od dvije igle koje su duge 5,4 cm i tijela senzora čija širina iznosi 2,4 cm, a duljina 5,1 cm. Vlažnost u tlu mjeri upravo s pomoću igala, a materijal od kojeg su one napravljene je nehrđajući čelik. Zbog točnosti i preciznosti rezultata, feritna jezgra povezana je kabelom na udaljenosti od 7,6 cm od tijela senzora te služi za izolaciju senzora od smetnji u sustavu [9].



Slika 21. Dimenzije senzora TEROS 10 [9]

Za mjerenje prividne dielektrične permitivnosti vanjskog medija, senzori Teros 10 upotrebljavaju elektromagnetsko polje. Igle senzora napajaju se titrajućim valom u iznosu od 70 MHz, a one se pune prema dielektričnosti materijala. Vrijeme punjenja proporcionalno je vlažnosti u tlu i dielektričnosti tla. Vrijeme punjenja mjeri mikroprocesor i on daje neobrađenu vrijednost koja se temelji na prividnoj dielektričnoj permitivnosti tla. Vrijednost koja nije obrađena pretvara se u volumni udio vode jednadžbom kalibracije koja je specifična za tlo. Senzor nije osjetljiv na promjene u teksturi tla i elektromagnetsku vodljivost zato što radi na izrazito visokoj frekvenciji mjerenja. Općenita jednadžba kalibracije trebala bi rezultirati apsolutnom točnošću. Vrijednost apsolutne točnosti za veliki dio mineralnih tala iznosi od $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ do 8 dS/m saturiranog tla; ako je potrebno izvesti dodatnu točnost, onda se zahtijeva izvesti kalibracije specifične za to tlo.

Minimalna radna temperatura iznosi između - 40° i 60°, a 10 ms predstavlja vrijeme koje je potrebno za mjerenje [9].

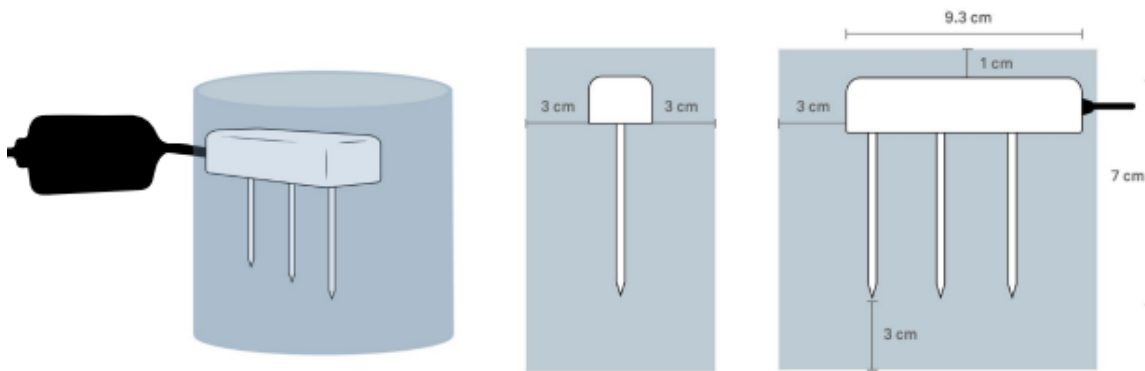


Slika 22. Dijelovi senzora TEROS 10 [9]

Tablica 4. Specifikacija senzora TEROS 10 [9]

Volumetrijski sadržaj vode (VWC)	
Raspon	
Kalibracija mineralnog tla	od 0,00 do 64 m ³ /m ³
Kalibracija medija bez tla	od 0,00 do 0,70 m ³ /m ³
Prividna dielektrična permitivnost [ϵ_a]	1 (zrak) do 80 (voda)
NAPOMENA: Raspon VWC ovisi o mediju na koji je senzor kalibriran. Prilagođena kalibracija će zadovoljiti potrebne raspone za većinu podloga.	
Rezolucija	0,001 m ³ /m ³
Točnost	
Kalibracija mineralnog tla	$\pm 0,03$ m ³ /m ³ tipično za mineralna tla koja imaju otpoinu EC < 8 dS/m
Kalibracija medija bez tla	$\pm 0,05$ m ³ /m ³ tipično za medije koji imaju otpoinu EC < 8 dS/m
Srednja specifična kalibracija	$\pm 0,01$ do - 0,002 m ³ /m ³ u bilo kojem poroznom mediju
Prividna dielektrična permitivnost [ϵ_a]	1 – 40 (raspon tla), $\pm \epsilon_a$ (bez jedinice) 40 – 80 , 15% mjerenja

Terros 12 je sličan Terosu 10, razlika je u broju igala; Teros 12 ima iglu više, a ovaj senzor uz vlažnost mjeri temperaturu tla i električnu provodljivost. Između prve i druge igle mjeri se vlažnost tla (EC), a između druge i treće igle mjeri se električna provodljivost (VWC). Ukupna visina senzora je 7,5 cm. Igle su iste duljine od 5,5 cm, a dimenzije tijela senzora su: širina 2,4 cm, a duljina 9,4 cm. Isto kao i kod Terosa 10, feritna jezgra povezana je kabelom na udaljenosti od 7,6 cm od tijela senzora te služi za izolaciju senzora od smetnji u sustavu. Sve dimenzije su prikazane na slici 23, a dijelovi na slici 24 [10].

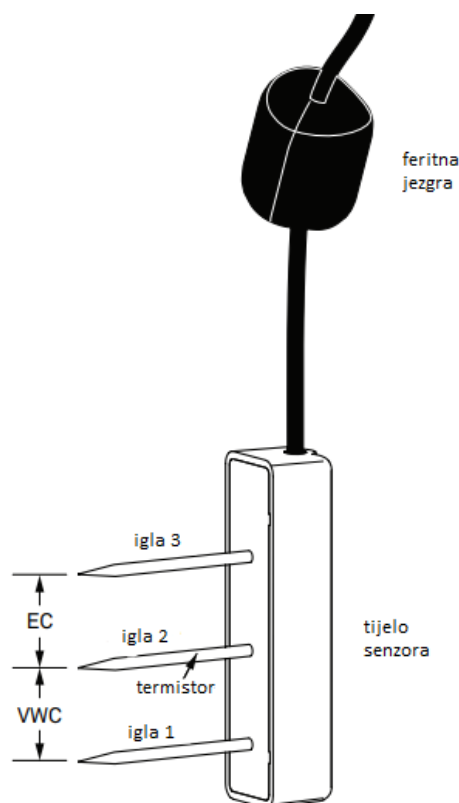


Slika 23. Dimenzije senzora TEROS 12 [10]

U igli 2 ugrađen je termistor i njime se mjeri temperatura, a to je bitno kada se mjerenja izvode u blizini površine gdje su promjene temperature osjetno brže. Idealni su za trajno ugrađivanje u tlo i kontinuirano očitavanje s data loggerima ili ručnim čitačima jer zahtijevaju malu snagu. Kao i kod Terosa 10, igle senzora napajaju se oscilirajućim valom u iznosu od 70 MHz, a one se pune prema dielektričnosti materijala. Minimalna radna temperatura iznosi između -40° i 60° , a 10 ms iznosi vrijeme koje je potrebno za mjerenje [10].

Tablica 5. Specifikacija senzora TEROS 12 [10]

Volumetrijski sadržaj vode (VWC)	
Raspon	
Kalibracija mineralnog tla	od 0,00 do 0,70 m^3/m^3
Kalibracija medija bez tla	od 0,00 do 1,0, m^3/m^3
Prividna dielektrična permitivnost [ϵ_a]	1 (zrak) do 80 (voda)
NAPOMENA: Raspon VWC ovisi o mediju na koji je senzor kalibriran. Prilagođena kalibracija će zadovoljiti potrebne raspone za većinu podloga.	
Rezolucija	0,001 m^3/m^3
Točnost	
Generička kalibracija	$\pm 0,03 m^3/m^3$ tipično za mineralna tla koja imaju otpoinu EC < 8 dS/m
Srednja specifična kalibracija	\pm od 0,01 do - 0,002 m^3/m^3 u bilo kojem poroznom mediju
Prividna dielektrična permitivnost [ϵ_a]	1 – 40 (raspon tla), $\pm \epsilon_a$ (bez jedinice) 40 – 80 , 15% mjerenja

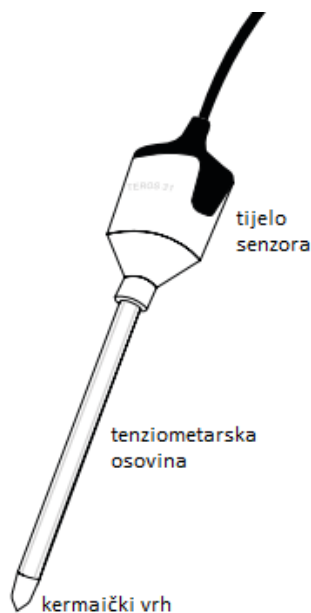


Slika 24. Dijelovi senzora TEROS 12 [10]

3.2. Mjerač pornih pritisaka

Teros 31 je senzor koji mjeri potencijal i temperaturu vode. Promjer tenziometarske osovine iznosi svega 5 mm te zbog tako malih dimenzija postavljanje senzora moguće je u raznim pozicijama bez

brige hoće li utjecati na rezultate mjerenja. Potencijal vode u tlu mjeri se pomoću osovine koja je ispunjena vodom i poroznim keramičkim vrhom koji se nalazi na samom vrhu senzora te ide dalje sve do pretvarača apsolutnog tlaka unutar senzora. Potencijal vode u tlu i potencijal vode u senzoru dolaze u ravnotežu kada keramički vrh koji se ponaša kao polupropusna dijafragma s jako visokom vodljivošću dođe u kontakt s tlom. Zbog prilično niske potrošnje energije senzor je prikladan za dugotrajno ukopavanje u tlo. Pomoću uređaja za bilježenje podataka ili ručnim čitačem mogu se iščitati rezultati mjerenja. Dijelovi senzora prikazani su na slici 25 [11].



Slika 25. Dijelovi senzora TEROS 31 [11]

Tablica 6. Specifikacija senzora TEROS31 [11]

Potencijal	
Rang [kPa]	od -85 do +50
Rezolucija [kPa]	±0,0012
Točnost [kPa]	±0,15
Temperatura	
Rang [°C]	od -30 do +60
Rezolucija [°C]	±0,01
Točnost [°C]	±0,5

4. Rezultati pokusa

U prethodnim poglavljima opisan je postupak ugradnje materijala u model i oprema koja se ugrađivala u model, a u ovom poglavlju opisat će se provođenje ispitivanja pokusa. Nakon ugradnje materijala i postavljanja opreme za motrenje, model kosine izložen je simuliranim oborinama iz tri sprinklera, po jedan sprinkler u svakom dijelu kosine - donjem, srednjem i gornjem. Prije nego što se započne s pokusom, potrebno je omogućiti protok vode na mlaznicama koji se definira prije početka pokusa. Potrebno je ujednačiti pritisak u svim mlaznicama, stoga se ispušta manja količina vode i na taj način se uklanja sav zrak koji je eventualno ostao, čime se dobiva ravnomjeran protok na svim mlaznicama. Kako bi cijeli model bio ravnomjerno izložen simuliranim oborinama, potrebno je mlaznice postaviti na pravilnu lokaciju. Neizostavna stavka prije početka pokusa je kalibracija mjernih uređaja i logerima definiranje intervala snimanja. Logeri su resetirani i spremni za preuzimanje novih podataka. Pokus je počeo 20.06.2024. u 12 sati i 37 minuta. Model nakon jedne minute od početka pokusa prikazan je na slici 26.



Slika 26. Model na početku pokusa $t = 1$ min

Mlaznice se za donji i gornji dio modela nalaze na središnjoj osi i na visini od 80 cm, a za središnji dio pozicija mlaznica je na 1/3 kosine modela, također na visini od 80 cm. Kut prskanja iznosi 60° , tlak od 2 bara i intenzitet iznosi 160 l/h, odnosno 2,67 l/min, stoga je u prosjeku na 1 m^2 protok 80 l/h/m^2 .



Slika 27. Prva pukotina pojavila se nakon 59 minuta od početka pokusa

Prva pukotina uočena je nakon 59 minuta od početka pokusa i prikazana je na slici 27, a ubrzo nakon prve pukotine dolazi do još više pukotina. Također, na istoj slici oborinska voda počela se sakupljati na površini materijala, a to znači da je došlo do povećanja podzemne vode.

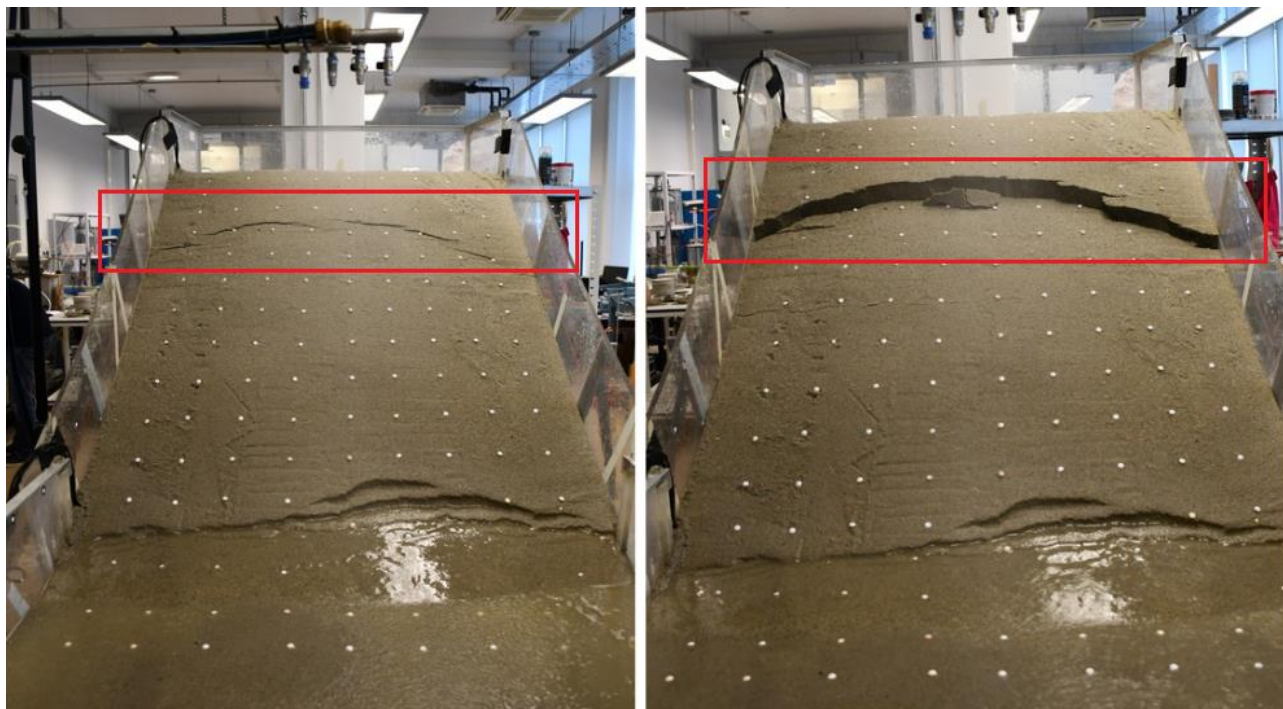


Figure 28. Lijevo slika prikazuje trenutak prije nastanka kružne klizne plohe, a desno slika prikazuje kružnu kliznu plohu

Zatim, na slici 28 lijevo prikazana je pukotina, a samo nekoliko sekundi poslije na slici 28 desno prikazana je ploha sloma. Razina podzemne vode formira se zbog povećanja vlažnosti uslijed infiltracije vode, gdje dolazi do zasićenja u najdubljem dijelu kosine. Oborinska voda koja teče po kosini i koja se nakuplja u donjem dijelu kosine uzrokuje nagli porast podzemne vode. Tako velika količina vode koja se nakuplja na jednom mjestu dovodi do smanjenja posmične čvrstoće tla, što dalje vodi do smanjenja sukcije i razvoja retrogresivnog klizišta od nožice do vrha kosine. [8] U 13 sati i 40 minuta dolazi do pojave rotacijskog klizišta. U nožici modela vidljivo je i dalje nakupljanje vode koja će kasnije u potpunosti potopiti nožicu kosine, vidljivo na slici 29. Nakon pokretanja klizišta razvoj nestabilnosti je retrogradan sa nastajanjem novih škarpi koje su vidljive na slici 29.



Slika 29. Stanje modela nakon 80 minuta pokusa

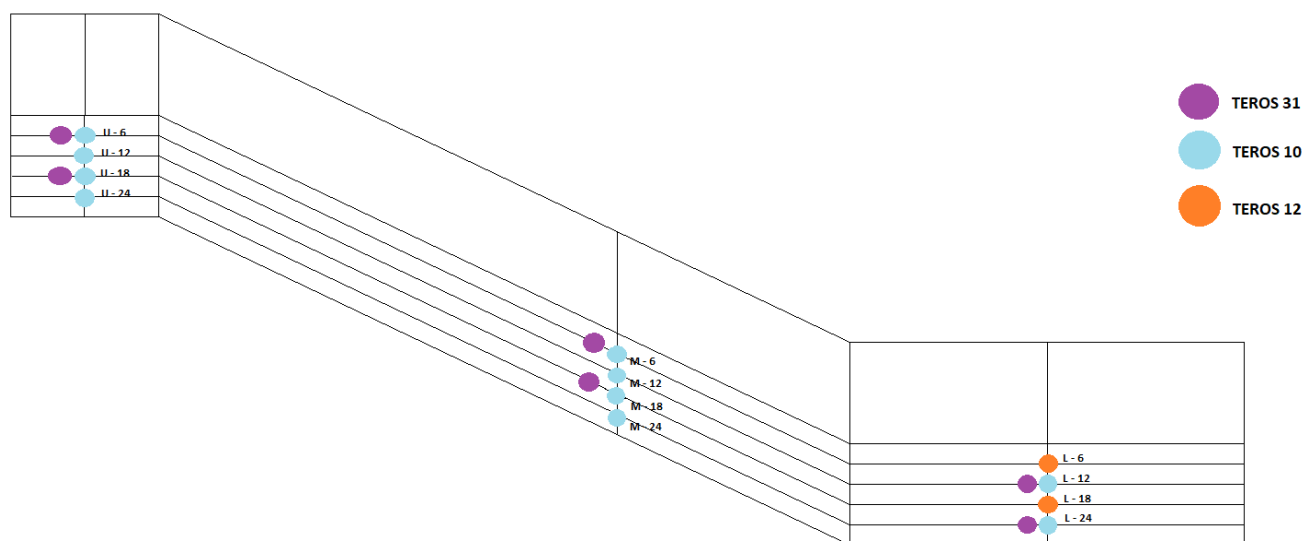
Gašenje donje mlaznice nastupilo je u 13 sati i 57 minuta, te se samim time mijenja intenzitet oborina. Pojave pukotina i kretanje materijala su sve češće i intenzivnije. Uočeno je ispiranje materijala na dnu nožice. U ovom trenutku, 153 minute od početka pokusa, oborine su zaustavljene što ujedno utječe na zaustavljanje aktivnosti klizišta. Urušavanje vrha kosine vidljivo je na slici 30.



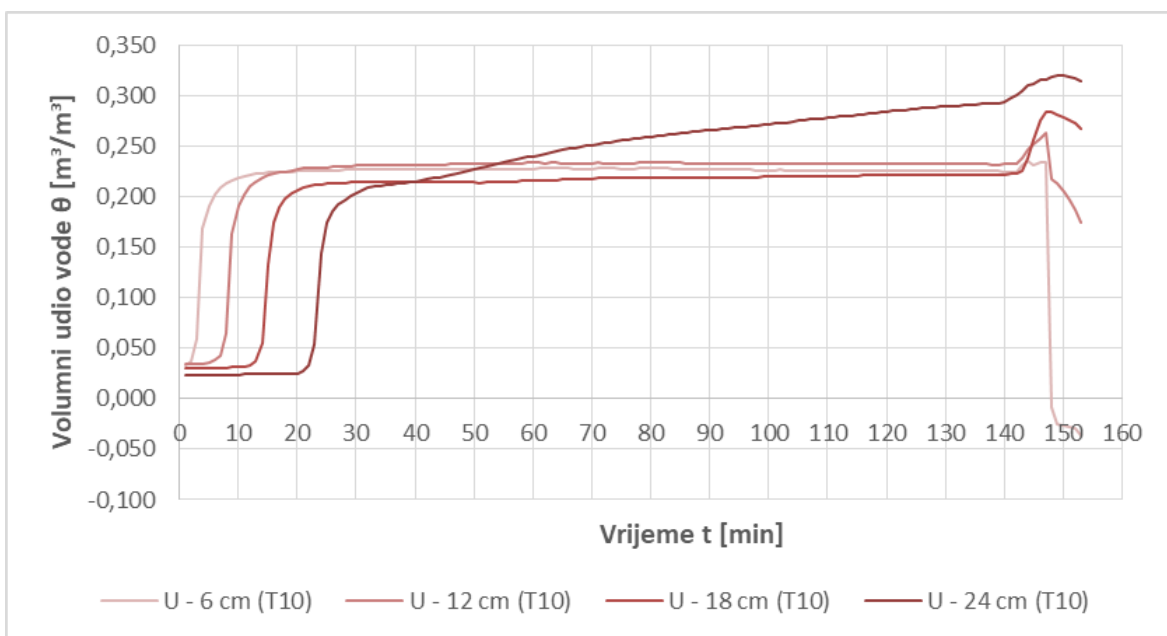
Slika 30. Završetak pokusa, prikaz stanja modela s gornjeg i donjeg dijela

5. Analiza rezultata pokusa

Pomoću rezultata pokusa omogućen je uvid u kompletan tijek filtracije simulirane oborine u model, sadržaj vode u tlu, razvoj nestabilnosti u kosini te smanjenje čvrstoće tla na određenim mjernim pozicijama koje su prikazane na slici 31. Dijagrami prezentiraju izmjerene vrijednosti na dubinama od 6, 12, 18 i 24 cm, ovisno na kojoj je visini senzor ugrađen. Intenzitet oborina isti je tijekom pokusa do 80 minute kada se gasi sprinkler koji se nalazi u donjem dijelu modela. Ponovno podešavanje i paljenje svih sprinklera događa se u 15 sati odnosno nakon što je prošlo 140 minuta od početka pokusa te potpuno urušavanje nastupa 10 minuta od toga i to stanje prikazano je na slici 31. Oborine izazivaju porast vlažnosti i zbog toga dolazi do preraspodjele mase materijala. Uz to dolazi i do porasta pornih pritisaka, a oni smanjuju efektivno naprežanje i čvrstoću i samim tim prouzročuju pojavu klizanja. Dijagrami na slikama 32., 33., i 34. prikazuju rezultate mjerenja senzora Teros 10. Sva tri dijagrama prikazuju promjene u početku pokusa, točnije na visini od 6 cm gdje dolazi do naglog porasta zbog blizine površine i lakšeg dolaska vode do senzora. Kako vrijeme odmiče, krivulje se mijenjaju ovisno o dubini modela. Na temelju prikazanih dijagrama evidentan je porast vlažnosti koji se događa unutar 30 minuta od početka pokusa na svim pozicijama senzora. Kod senzora koji su na većim dubinama podrazumijeva se da će ce kasnije prikazati taj porast upravo zbog materijala u kojem se ispituje jer je vodi potrebno neko vrijeme da dođe do senzora. U gornjem i donjem dijelu modela krivulja je u većini slučajeva horizontalna što ukazuje na to da je materijal na toj lokaciji potpuno saturiran.

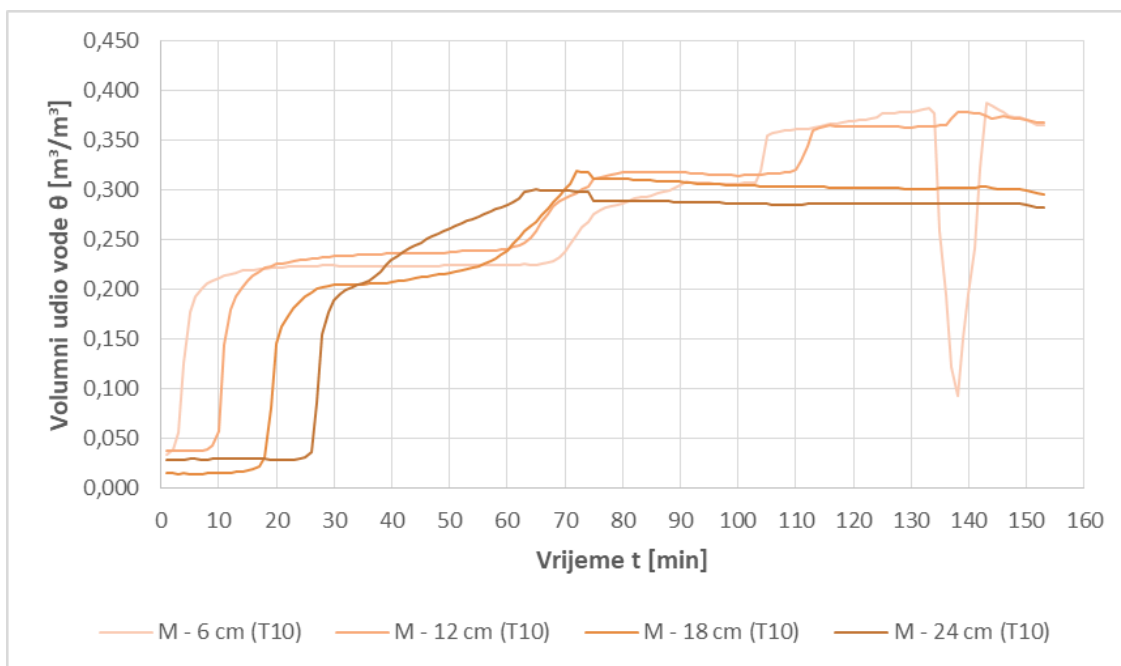


Slika 31. Shematski prikaz pozicije senzora u modelu



Slika 32. Grafički prikaz mjerenja senzora Teros 10 – gornji dio (U)

Dijagram prikazan na slici 32. prikazuje promjenu volumnog udjela vode θ kroz vrijeme t na različitim dubinama od 6, 12, 18 i 24 cm na gornjem L dijelu modela. Krivulja koja pokazuje najbrži rast volumnog udjela vode je $U - 6$ i penje se do vrijednosti od otprilike $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^3$ unutar 10 minuta od početka pokusa. Površinski sloj puno prije upija vodu, stoga je bilo za očekivati ovakvo ponašanje linije u dijagramu. Ostale krivulje ponašaju se vrlo slično. Jedina razlika je u dubinama i vremenskoj razlici koja je potrebna vodi da dođe do senzora. Oko 40. minute, sloj tla na 24 cm dubine počinje s naglim zasićenjem vode, što ukazuje da je tek tada voda uspjela doći do zadnjeg sloja, a svi slojevi oko 140. minute imaju malo povećanje jer su se tada upalili svi sprinkleri kako bi doveli kosinu do potpunog urušavanja.



Slika 33. Grafički prikaz mjerenja senzora Teros 10 – središnji dio (M)

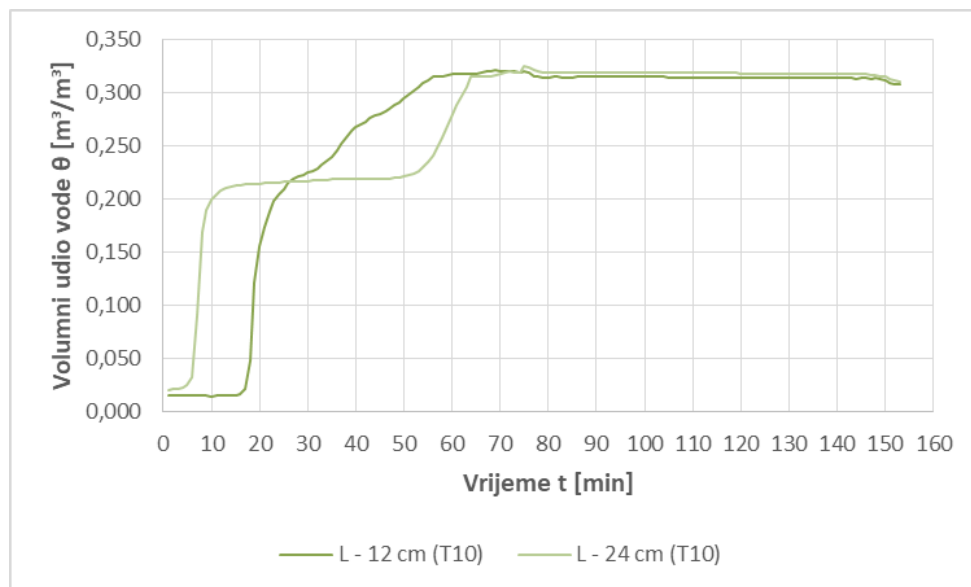
Dijagram prikazan na slici 33. prikazuje promjenu volumnog udjela vode θ kroz vrijeme t na različitim dubinama od 6, 12, 18 i 24 cm na središnjem M dijelu modela. Krivulja prva dva sloja u početku pokusa je vrlo slična i rast im započinje unutar 15 - ak minuta. Nakon 30. minute od početka pokusa, druge dvije krivulje prikazuju rast. Maksimalna vrijednost volumnog udjela vode iznosi oko $0,35 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Što je veća vrijednost volumnog udjela vode to je više vode u tlu. Nakon određenog vremena, tlo doseže svoj maksimum zasićenja. To je trenutak kada krivulje na dubini od 18 i 24 cm postaju horizontalne, između 60. i 100. minute ili kada krivulje na visini od 6 i 12 cm postaju horizontalne u vremenu između 10. i 50. minute. Ono što je primjetno na kraju dijagrama je nagli pad krivulje koja se nalazi najbliže površini tla u vremenu od 130. do otprilike 143. minute. Interpretira se kao da je došlo do nagle promjene uvjeta na tom mjestu, odnosno da je izgubljena voda koja se gravitacijski povlači u dublje slojeve (spušta se prema donjem dijelu modela) ili je jednostavno došlo do odrona koji je povukao sa sobom sensor te se zaustavio negdje gdje je opet bio u doticaju sa vodom.

Na slici 34. prikazano je stanje modela u vremenu između 130. i 140. minute od početka pokusa. Pojačane oborine vidljive su na slici 34 pod b). Dijagram na slici 33 prikazuje stanje u modelu pomoću senzora koji su ugrađeni. Najzanimljiviji dio dijagrama je nagli pad, a na slici 34 pod a), b) i c) prikazano je stvarno stanje u tom trenutku. Vremenska razlika na slikama je unutar 15-ak

minuta. Izgledi krivulja u dijagramima poistovjećuju se s slikama koje su snimljene u tim trenucima. Na primjer, skupljanje vode u nožici koje je vidljivo na slici 34, a u dijagramu je to prikazano kao horizontalna linija. Senzori koji su potopljeni nalaze se na dubini od 18 i 24 cm. Pod c) je najbolje prikazan razvoj klizišta do vrha nepoduprijete kosine.

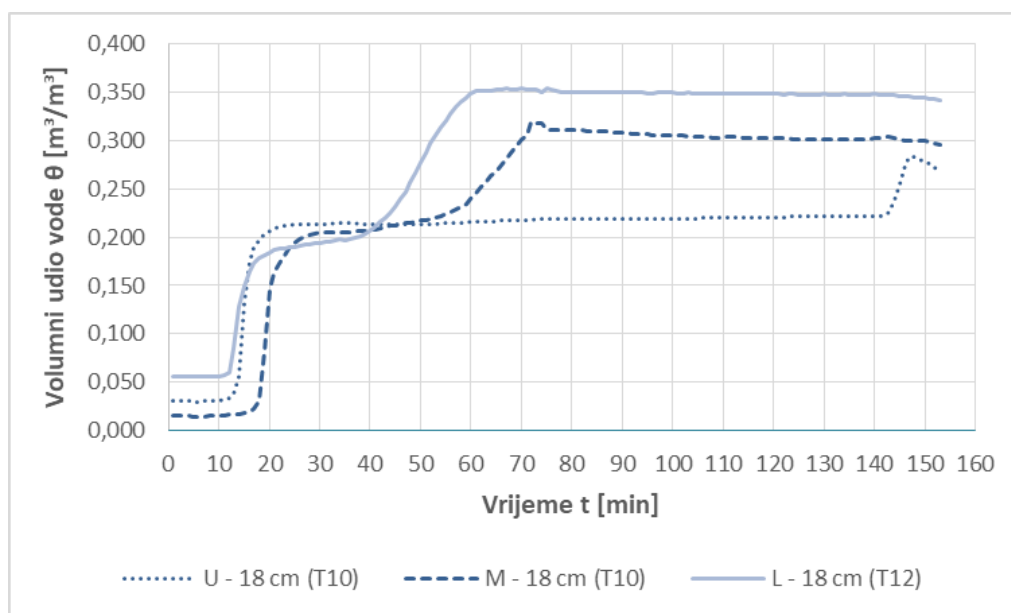


Slika 34. Prikaz što se odvija u modelu u vremenu između 130. i 140. minute



Slika 35. Grafički prikaz mjerenja senzora teros 10 – donji dio (L)

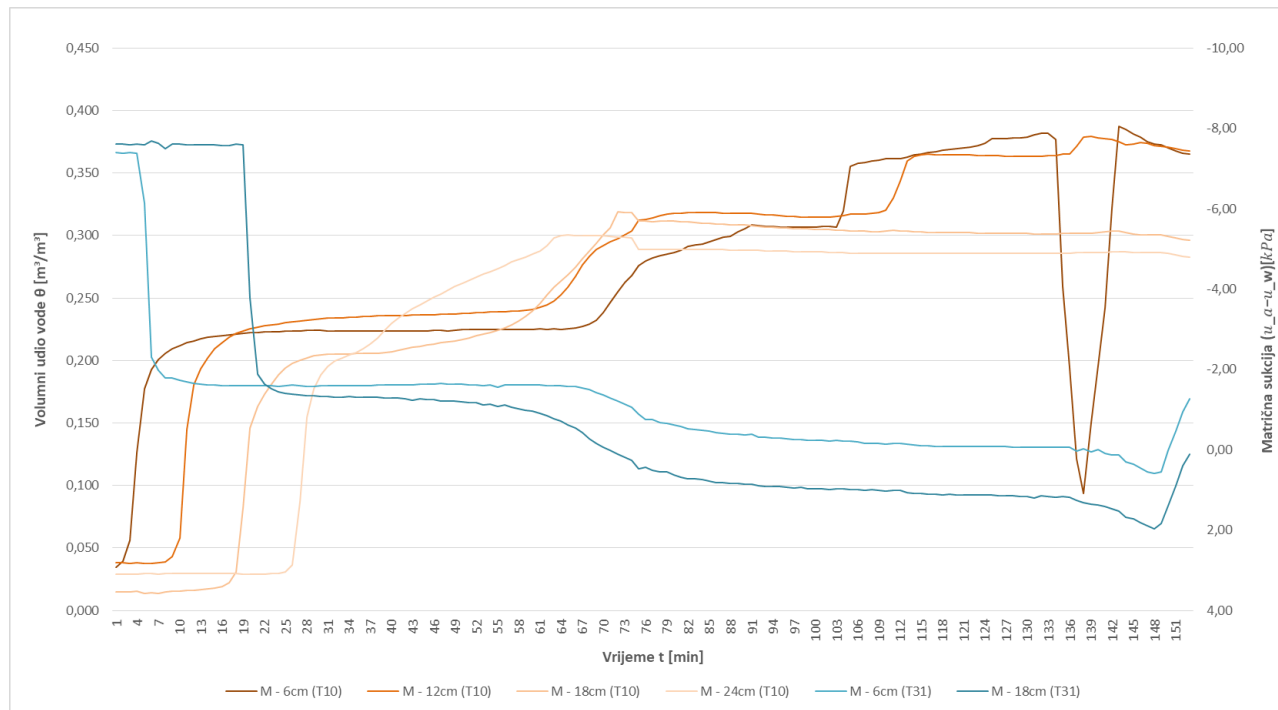
Slika 35. prikazuje dijagram s dvije krivulje. Krivulja koja se nalazi bliže površini tla na dubini od 12 cm prikazuje nagli porast volumnog udjela vode koji se događa u razdoblju između 10. i 20. minute. Kada je prošlo 50 minuta od početka pokusa, događa se opet rast krivulje do vrijednosti od $0,32 \text{ m}^3/\text{m}^3$ i ostaje relativno stabilna do kraja pokusa. Vrlo sličan oblik ima i krivulja koja pokazuje vrijednosti na dubini od 24 cm. Njezin rast počinje oko 20. minute i traje do otprilike 60. minute, a vrijednost je ista kao i kod krivulje *L - 12*. Tu prestaje rasti i do kraja pokusa ostaje relativno stabilna kao i prva krivulja. Nakon što oba sloja dosegnu određenu zasićenost, volumni udio vode ostaje konstantan, što može značiti da je tlo u oba sloja postiglo maksimalnu sposobnost zadržavanja vode.



Slika 36. Grafički prikaz senzora teros 10 i 12 ugrađeni na dubini od 18 cm

Dijagram prikazan na slici 36. prikazuje rezultate senzora koji mjere volumni udio vode u tlu na dubini od 18 cm. S obzirom na to da se ovi senzori nalaze na većoj dubini u modelu, vrijeme koje je potrebno vodi da dođe do senzora je duže. Ovaj dijagram prikazuje promjene volumetrijskog udjela vode kroz vrijeme za tri različite pozicije u modelu na istoj visini od 18 cm. Svaka linija predstavlja različitu poziciju. Točkasta linija prikazuje lagani porast, a nagli rast se događa između 10. i 20. minute i doseže vrijednost od $0,22 \text{ m}^3/\text{m}^3$, nakon čega se stabilizira do 141. minute, gdje je vidljiv porast, a oko 145. minute pokazuje pad. Linija koja je isprekidana doseže najveću vrijednost od $0,32 \text{ m}^3/\text{m}^3$ u vremenu između 40. i 70. minute. Puna linija koja definira stanje u

donjem dijelu modela prikazuje da od gornje i donje pozicije doseže najveću vrijednost volumnog udjela vode od 0,35 m³/m³ i zadržava tu vrijednost do kraja pokusa.



Slika 37. Grafički prikaz sadržaja vode i pornih pritisaka na vertikali na M dijelu modela

Dijagram na slici 37. prikazuje volumni udio vode i matričnu sukciju na središnjem dijelu modela. Senzor teros 31 je ugrađen na dubini od 6 i 18 cm, a teros 10 ugrađen je na svim dubinama modela. Što se točno događa s narančastim krivuljama objašnjeno je posebno ispod slike 33. Plave krivulje u dijagramu prikazuju promjenu matrične sukcije na dubinama od 6 i 18 cm, a nalaze se u središnjem dijelu modela. Kada tlo upija vodu, tada sukcijska u tlu pada, a raste kada tlo gubi vodu, što se može iščitati iz dijagrama. Dakle, skupljanjem podzemne vode sukcijska skroz nestaje i vrijednost joj pada na nulu. Pozitivna vrijednost matrične sukcije ukazuje na to da je tada senzor potopljen vodom, dok negativna vrijednost ukazuje na to da materijal nije saturiran. Zbog blizine površine tla, gornji sloj brže reagira na promjene vlažnosti, dok je kod dubljeg sloja to ipak sporije. Kako raste vlažnost u materijalu, tako raste i zapremninska težina; analogno tome, pada čvrstoća i raste opterećenje.

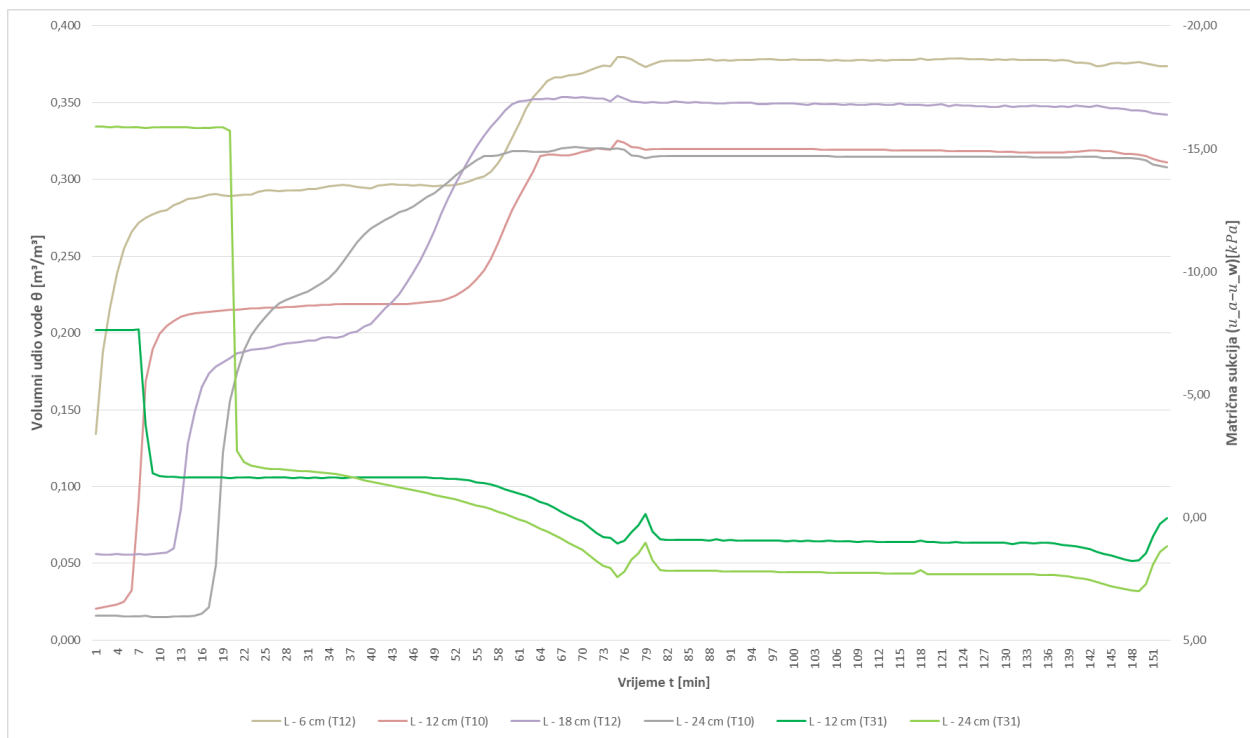
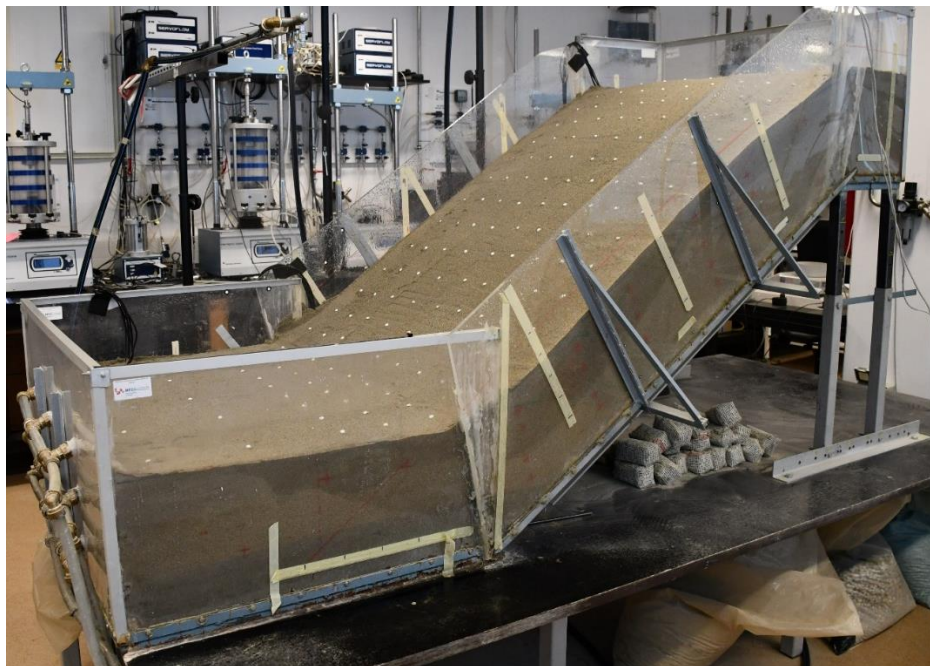


Figure 38. Grafički prikaz sadržaja vode i pornih pritisaka na vertikali na donjem dijelu modela

Kao i na prethodnoj stranici, dijagram 38. prikazuje volumni udio vode i matričnu sukciju na donjem dijelu modela. Svi senzori koji su korišteni u pokusu su na ovom dijelu ugrađeni. Senzor koji mjeri matričnu sukciju (T31) ugrađen je na dubinama od 12 i 24 cm. Senzori (T10 i T12) koji mjere volumni udio vode ugrađeni su na dubinama od 6, 12, 18 i 24 cm. Kada voda dođe do senzora, tada u dijagramu vidimo promjene u krivuljama. Promjene u volumnom udjelu vode stagniraju nakon otprilike 82. minute od početka pokusa. Zapravo, na tom dijelu senzori su potpuno potopljeni vodom, a kada je tlo skroz potopljeno vodom, nema sukcije; njezina vrijednost teži prema nuli. Početne vrijednosti koje su prikazane od krivulja L – 12 i L – 24 su negativne jer tada još nisu u doticaju sa simuliranom kišom. Senzor na dubini od 24 cm nakon 22 minute sa vrijednosti od – 15,89 kPa raste do vrijednosti – 2,24 kPa, a onaj koji je ugrađen na dubini od 12 cm raste od – 7,62 kPa do – 1,66 kPa unutar 10 minuta.

Postoje dva razloga zašto se voda skuplja u nožici modela i međusobno su povezani. Jedan od razloga je otjecanje oborine iz viših dijelova modela koja se još dodatno infiltrira u model. Kako se kiša filtrira kroz materijal, u jednom trenutku dolazi do krajnje točke, odnosno podloge modela, te se tu počinje odizati prema gore. Drugi razlog je infiltracija vode kroz materijal. U donjem dijelu

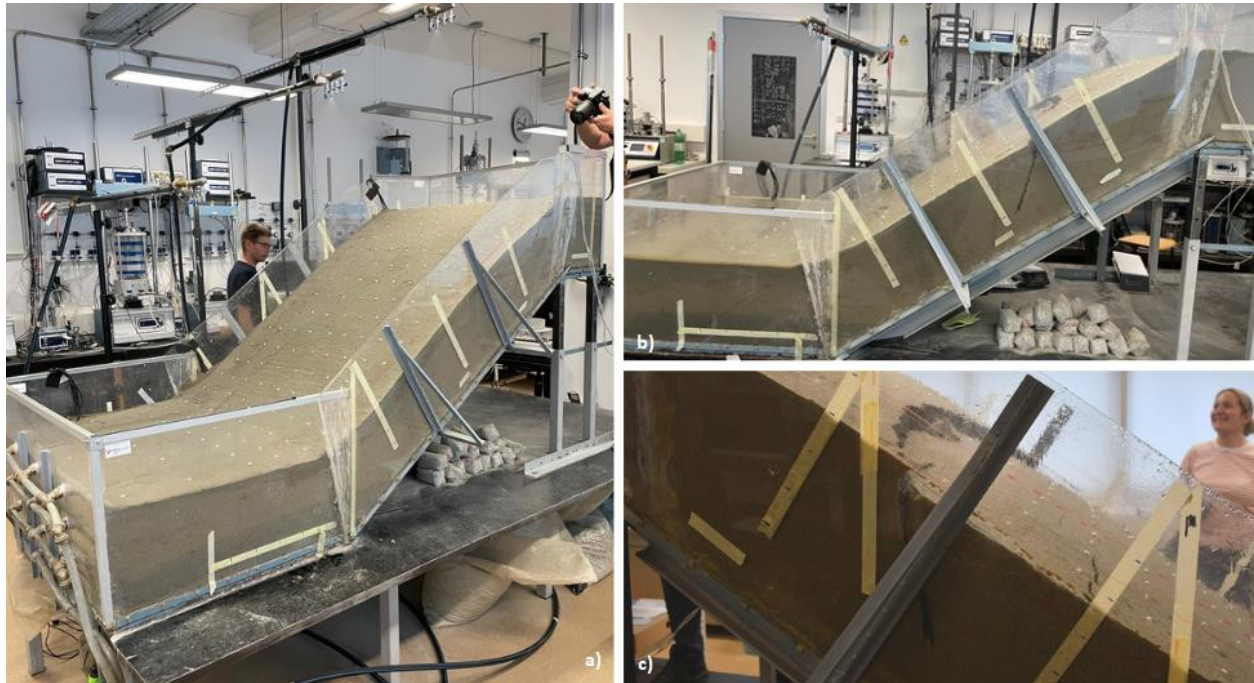
modela pojavljuje se voda koja je iznad površine tla, a to je zbog otjecanja vode i zato što je materijal tla takav da je vodi nemoguće da se potpuno filtrira kroz njega, te se počinje nakupljati na površini iako taj dio nije u potpunosti saturiran. Najmanje promjena i odstupanja zapažene su na gornjem dijelu modela. Na tom dijelu količina oborina i voda koja se filtrira u tlo je puno manja u odnosu na središnji ili donji dio. Negativan porni pritisak ima tlo koje nije u potpunosti saturirano. Kada se iznad ispitane točke podigne razina vode, tada je vrijednost pornog pritiska očitana kao pozitivna, a to ukazuje na potpuno saturirano tlo. Rast volumnog udjela vode prikazan je pomoću dijagrama, a na slikama 36 i 37 posebno je zanimljivo jer se uspoređuje sa sukcijom. Tamo gdje se krivulja vlažnosti i sukcije siječe, na tom mjestu se voda nalazi u ravnini senzora. Na primjer, na slici 37 tamnozeleno krivulja $L - 12$ označava poziciju i dubinu senzora Teros 31 čija je namjena mjerenje pornih pritisaka, a siva krivulja $L - 24$ označava poziciju i dubinu senzora Teros 10 čija je namjena mjerenje vlažnosti. Nakon 20-ak minuta od pokusa, voda se nalazi u ravnini senzora.



Slika 39. Prikaz modela nakon što je prošlo 42 minute od početka pokusa

Na slici 39. prikazan je model na kojem još nisu uočene neke velike promjene. Jedino što je vidljivo je prodiranje vode kroz materijal. Vidljivo je kako se voda najviše skuplja u donjem dijelu, a najmanje u gornjem. Također, vidljivo je da je u donjem dijelu modela u svim slojevima došla

voda, dok je u središnjem dijelu došla do polovice visine, a u gornjem do otprilike trećine visine materijala.



Slika 40. Prikaz klizne plohe i stanje modela nakon 10-ak minuta od početka pokusa

Slika 40 pod a) uslikana je 10 minuta od početka pokusa. Vidljivo je prodiranje vode u materijal. Slika 40 b) uslikana je nakon otprilike 10 minuta od nastanka klizne plohe, a slika pod c) prikazuje kliznu plohu uslikanu nakon 85 minuta. Nakon pokretanja klizišta, daljnje njegovo napredovanje bilo je retrogresivno s razvojem dodatnih škarpi, što je prikazano na slikama 29 i 34.

6. Zaključak

Tema ovog diplomskog rada je *analiza razvoja klizišta u umanjenom fizičkom modelu izazvanog oborinama*, a cilj ovim diplomskim radom je prikazati i opisati rezultate ispitivanja na umanjenom modelu kosine u kojem su se simulirale umjetne oborine u Laboratoriju za geotehniku na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Pojmovi koji se odnose na stabilnost kosina su ukratko opisani na početku rada. U model su ugrađeni senzori koji daju rezultate vezane za porne pritiske, vlažnost tla i pomake, a njihove vrijednosti i značenje su prikazani i objašnjeni pomoću grafova. Kada se gleda iz perspektive geotehničkog inženjerstva, klizišta su složena i opasna pojava koja zahtijeva pažljivu procjenu rizika i odgovarajuće mjere zaštite, posebno u područjima koja su podložna takvim pojavama. Zbog klimatskih promjena pojava klizišta je sve učestalija. Intenzivne i učestale oborine su također jedan od primarnih problema kao i uklanjanje šumskog pokrova ili gradnja na područjima koja su sklona klizanju. Filtracija oborina u tlo i samim time podizanje razine podzemne vode prikazano je ovim radom i dokazano da su oborine veliki problem u geotehnici i razlog zbog kojeg dolazi do pojava nestabilnosti i razvoja klizišta.

Razlog povećanja pornih pritisaka u tlu je skupljanje velike količine oborine u nožici kosine koju nije moguće u kratkom vremenu izbaciti, odnosno sniziti joj razinu. Kada se oborina više ne filtrira u tlo, nego se počinje podizati razina podzemne vode, to ukazuje da su uvjeti u kliznom tijelu saturirani, točnije, sve pore u tlu su ispunjene vodom. Jedno od rješenja stabilizacije kosine bilo bi svakako smanjenje razine podzemne vode, koje se može izvesti izradom drenova u kosini ili ugradnjom drugog materijala, na primjer, krupnozrnastog koji ne zadržava vodu, već se ona dalje procjeđuje kroz slojeve, i ugradnjom potpornog zida u nožici, pa se na taj način ona dodatno stabilizira. Postoji još puno varijanti mjera sanacije, ali najbitnije je da je pristup ozbiljan i da se provedu sva potrebna ispitivanja te na temelju rezultata izvede sanacija koja je ekonomski i funkcionalno prihvatljiva. Upravo zbog svojih malih dimenzija koje odgovaraju više - manje svakom prostoru, umanjeni model pruža praktičnije i ekonomski pogodnije pohranjivanje podataka u odnosu na postupak pohranjivanja podataka u prirodi. Prednost ovakvih modela je u tome što su moguća ponavljanja pokusa, mogućnost procjenjivanja kako će se ponašati neki od procesa, a uvjeti u kojima se nalaze mogu se kontrolirati.

Ovim radom opisan je utjecaj filtracije oborine u tlo i samim time podizanje razine podzemne vode, koje ima posljedični utjecaj na stabilnost kosine. Pokusom se potvrdilo da je primarni uzrok pojave nestabilnosti i razvoja klizišta visoka razina podzemne vode, što ujedno utječe na nožicu klizišta, odnosno njezino potpuno potapanje zbog procjeđivanja umjetne simulirane oborine. U umanjenom modelu oponašaju se stvarne pojave koje se događaju u prirodi, te su zbog toga važni rezultati ispitivanja. Senzori koji su ugrađeni u model daju rezultate koji prikazuju što se događa u dubini modela, a kasnije, analizom rezultata, ako su uvjeti slični, ponašanje kosine ili materijala može se predvidjeti. Zbog toga je vrlo važno biti precizan prilikom ugradnje materijala i postavljanja mjernih uređaja u model, kako bi se rezultati budućih ili prijašnjih pokusa mogli uspoređivati. Iz pokusa i dijagrama koji su analizirani, rezultati upućuju na to kako velika količina kiše utječe na skupljanje vode u nožici kosine, zbog čega dolazi do smanjenja kohezije i pojave pukotina, odnosno škarpi, što dovodi do nestabilnosti.

7. Literatura

- [1] Arbanas Ž., Peranić J., Vivoda Prodan M., Jagodnik V., Čeh N. *Remedial Measures Impact on Slope Stability and Landslide Occurrence in Small-Scale Slope Physical Model in 1 g Conditions. Progress in Landslide Research and Technology*, Volume 2 Issue 2, Springer, Heidelberg, pp. 197 - 220, 2023.
- [2] Arbanas Ž., *Tipovi i procesi nastanka nestabilnosti u kosinama*, predavanje iz kolegija Stablnost kosina, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet; 2023./2024.
- [3] Pajalić S., Arbanas Ž., Peranić J., Jagodnik V., Čeh N., Maksimović S., *Monitoring and Data Analysis in Small-Scale Landslide Physical Mode, Applied sciences (Basel)*, 11 (11), str. 1 – 26, 2021.
- [4] U.S. Geological Survey, <https://www.usgs.gov/faqs/what-a-landslide-and-what-causes-one> (pristupljeno: 01.07.2024.)
- [5] Benac Č., *Riječnik pojmova u općoj i primjenjenoj geologiji*, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, riječnik, str. 66, 2016.
- [6] Highland, L., Bobrowsky, P.T. (2008), *The landslide handbook - A guide to understanding landslides*, U.S. Geological Survey, Reston, 2008. (pristupljeno: 10.09.2024.) https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325_508.pdf
- [7] Arbanas Ž., Peranić J., Čeh N., *The Use of Soil Moisture and Pore-Water Pressure Sensors for the Interpretation of Landslide Behavior in Small-Scale Physical Models, Sensors*, vol. 22, br. 19, 7337, str. 1 – 26, 2022.
- [8] Peranić J., Jagodnik V., Čeh N., Pajalić S., Arbanas Ž., Vivoda Prodan M., *Small – scale physical landslide models under 1g infiltration conditions and the role of hydrological monitoring, Landslide Modelling & Applications*, Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci i Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, str. 171 – 178, 2022.
- [9] METER Group Teros 10, (pristupljeno 01.07.2024.) https://publications.metergroup.com/Manuals/20788_TEROS10_Manual_Web.pdf

[10] METER Group Teros 12, (pristupljeno 01.07.2024.)

https://publications.metergroup.com/Manuals/20587_TEROS11-12_Manual_Web.pdf

[11] METER Group Teros 31, (pristupljeno 01.07.2024.)

https://library.metergroup.com/Manuals/20799_TEROS%2031_Manual_Web.pdf

[12] Galić, G.; *Analiza utjecaja potporne konstrukcije na stabilnost kosine u umanjenom modelu*; diplomski rad; Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2022.

[13] Škuflić R., *Hidraulički odziv fizičkog modela kosine pri različitim intenzitetima kiše*; diplomski rad, Građevinski fakultet u Rijeci, 2023.