

Analiza utjecaja potporne konstrukcije na stabilnost kosine u umanjenom modelu

Galić, Gorana

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:157:169168>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



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**

Gorana Galić

**ANALIZA UTJECAJA POTPORNE KONSTRUKCIJE NA STABILNOST
KOSINE U UMANJENOM MODELU**

Diplomski rad

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij
Geotehnika
Stabilnost kosina**

**Gorana Galić
JMBAG: 0114030084**

**ANALIZA UTJECAJA POTPORNE KONSTRUKCIJE NA STABILNOST
KOSINE U UMANJENOM MODELU**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2022.

IZJAVA

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

Gorana Galić

U Rijeci, 19. rujan 2022.

Naziv studija: Diplomski studij Građevinarstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

IZJAVA

Diplomski rad izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: **Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja (ModLandRemSS)**

Voditelj projekta: Prof.dr.sc. Željko Arbanas

Šifra projekta: IP-2018-01-1503

Financijer projekta: Hrvatska naklada za znanost

Pravna nadležnost: Građevinski fakultet Sveučilište u Rijeci

U Rijeci, 14. rujan 2022.

Mentor:

Prof.dr.sc. Željko Arbanas

SAŽETAK

Stabilnost prirodnih i umjetnih kosina predstavlja jedan od glavnih problema u geotehnici. Najčešći uzroci pojava klizišta su infiltracija oborinske vode i posljedično podizanje razine podzemne vode. Analize stabilnosti kosina provode se zbog utvrđivanja pojava i uzroka nestabilnosti, te dimenzioniranja mjera sanacije. U radu su prikazana dva ispitivanja provedena u laboratoriju za geotehniku na Građevinskom fakultetu u Rijeci u sklopu znanstveno istraživačkog projekta Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja (ModLandRemSS), financiranog od strane Hrvatske zaklade za znanost. Prvi model je model kosine izgrađene od sitnozrnastog pijeska u nagibu od 35° i bez mjere sanacije, a u drugi model je ugrađen gravitacijski potporni zid kao mjera sanacije. Oba modela podvrgnuta su sličnim uvjetima umjetne oborine te su tijekom pokusa prikupljeni podaci o promjenama pornih pritiska i vlažnosti tla u modelu pomoću ugrađenih senzora. Dok su za osnovni model bez ugrađenih mjera sanacije zabilježena klizanja i razvoj nestabilnosti od nožice prema vrhu modela, gotovo nikakve značajnije promjene nisu bile vidljive u kosini s ugrađenim potpornim zidom za iste uvjete opterećenja. Rezultati ispitivanja detaljno prikazani u ovom radu korišteni su za provedbu analiza stabilnosti modela.

KLJUČNE RIJEČI:

Stabilnost kosina, fizikalni modeli, ModLandRemSS, mjere sanacije, porni pritisci, vlažnost tla

ABSTRACT

The stability of natural and artificial slopes is one of the main problems in geotechnics. The most common causes of landslides are the infiltration of rainwater and the consequent rise in the groundwater level. The analyzes of the slope stability are carried out to determine the occurrences and causes of instability, and dimensioning of remedial measures. The paper presents two tests carried out in the geotechnical laboratory at the Faculty of Civil Engineering in Rijeka as a part of the scientific research project Physical modelling of landslide remediation constructions behavior under static and seismic actions (ModLandRemSS), financed by the Croatian Science Foundation. The first model is a model of a slope built from fine-grained clean sand at a slope angle of 35° without remedial measures and in the second model has a gravity retaining wall incorporated as a remedial measure. Both models were subjected to similar conditions of artificial precipitation, and data on changes in the pore pressures and soil moisture in the model were collected during the experiment using the built-in sensors. While the basic model without built-in remedial measures, where slide and the development of instability were recorded from the foot towards the top of the model, showed almost no significant changes with respect the model of the slope tested with the retaining wall for the same load conditions. The test results are presented in detail in this paper and are used to perform model stability analyses.

KEY WORDS:

slope stability, physical models, ModLandRemSS, remediation measures, pore pressures, soil moisture

SADRŽAJ

| | |
|--|----|
| 1. UVOD | 10 |
| 2. OPĆENITO O KLIZIŠTIMA | 5 |
| 2.1. Dimenzije i elementi klizišta | 6 |
| 2.2. Tipovi nestabilnosti klizišta | 9 |
| 3. PROVOĐENJE ISPITIVANJA | 12 |
| 3.1. Mjerna oprema | 14 |
| 4. ISPITIVANJA MODELA KOSINE SA I BEZ POTPORNOG ZIDA | 22 |
| 4.1. Ispitivanje modela kosine bez potpornog zida | 23 |
| 4.2. Ispitivanje s postavljenim gravitacijskim potpornim zidom | 27 |
| 4.3. Analiza rezultata pokusa | 33 |
| 5. ANALIZE STABILNOSTI KORIŠTENJEM PROGRAMA SLIDE2 (Rocscience Inc.) | 39 |
| 6. ZAKLJUČAK | 47 |
| 7. LITERATURA | 48 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1: Značajke čistog pijeska [7]..... | 13 |
| Tablica 2: Vrijednosti potencijala i temperature za Teros31 [10]..... | 19 |
| Tablica 3: Parametri čistog pijeska numeričkog modela..... | 39 |
| Tablica 4: Materijalne značajke čistog pijeska i zasipa od šljunka u numeričkom modelu s potpornim zidom | 43 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1: Dimenzije klizišta [4]..... | 6 |
| Slika 2: Elementi klizišta [4]..... | 8 |
| Slika 3: Prikaz odrona [4]..... | 9 |
| Slika 4: Prikaz prevrtanja [4]..... | 9 |
| Slika 5: Prikaz klizanja [4]..... | 10 |
| Slika 6: Tipovi klizanja: rotacijsko, translacijsko i blokovsko klizanje [5]..... | 10 |
| Slika 7: Prikaz širenja tla [4]..... | 11 |
| Slika 8: Prikaz tečenja tla [4]..... | 11 |
| Slika 9: Dimenzije senzora Teros10 [8]..... | 15 |
| Slika 10: Dijelovi senzora Teros10 [8]..... | 16 |
| Slika 11: Senzor Teros12 [9]..... | 17 |
| Slika 12: Dimenzije senzora Teros12 [9]..... | 18 |
| Slika 13: Senzor Teros31..... | 18 |
| Slika 14: Prikaz mjernih pozicija u kosini bez potpornog zida..... | 20 |
| Slika 15: Prikaz mjernih pozicija u kosini s ugrađenim potpornim zidom..... | 20 |
| Slika 16: Model nosive konstrukcije od čelika i pleksiglasa na nosivom stolu..... | 22 |
| Slika 17: Umanjeni model kosine od čistog pijeska..... | 23 |
| Slika 18: Početak ispitivanja - izlaganje modela umjetnim oborinama iz tri mlaznice..... | 24 |
| Slika 19: Potopljena nožica..... | 25 |
| Slika 20: Pojava prve pukotine..... | 26 |
| Slika 21: Retrogresivni razvoj klizišta..... | 26 |
| Slika 22: Dimenzije potpornog zida..... | 27 |
| Slika 23: Granulometrijska krivulja čistog pijeska i šljunka[7]..... | 28 |
| Slika 24: Prikaz modela s ugrađenim potpornim zidom..... | 29 |
| Slika 25: Zasip od šljunka..... | 29 |
| Slika 26: Potopljena nožica ispred potpornog zida..... | 30 |
| Slika 27: Tečenje pijeska uslijed velikog intenziteta oborina..... | 31 |
| Slika 28: Uzdužna deformacija potpornog zida i izdignuti materijal u nožici..... | 32 |
| Slika 29: Preklopljeni dijagrami vlažnosti tla na dijelu H..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Slika 30: Preklopljeni dijagrami vlažnosti tla na dijelu M..... | 34 |
| Slika 31: Preklopljeni dijagrami vlažnosti tla na dijelu L..... | 34 |
| Slika 32: Trenutak potpunog zasićenja tla na 6 cm na H dijelu | 35 |
| Slika 33: Trenutak potpunog zasićenja tla na 18 cm na H dijelu..... | 36 |
| Slika 34: Trenutak potpunog zasićenja tla na 6 cm na M dijelu..... | 36 |
| Slika 35: Trenutak potpunog zasićenja tla na 18 cm na M dijelu | 37 |
| Slika 36: Trenutak potpunog zasićenja tla na 12 cm na L dijelu | 37 |
| Slika 37: Trenutak potpunog zasićenja tla na 24 cm na L dijelu | 38 |
| Slika 38: Kosina od čistog pijeska u suhim uvjetima..... | 40 |
| Slika 39: Klizna ploha nakon cca 70 min od početka ispitivanja..... | 41 |
| Slika 40: Veličina klizne plohe | 41 |
| Slika 41: Retrogresivno klizanje | 42 |
| Slika 42: Retrogresivno klizanje u modelu | 42 |
| Slika 43: Model kosine s ugrađenim potpornim zidom u suhim uvjetima | 44 |
| Slika 44: Klizna ploha nakon cca 70 min od početka ispitivanja..... | 45 |
| Slika 45: Klizne plohe nakon više od 120 minuta od početka pokusa | 46 |

1. UVOD

Najčešće prirodne katastrofe su pojave klizišta. Čimbenici koji utječu na pokretanje klizišta su oborine, procjeđivanje tj. infiltracija i variranje razine podzemne vode. Materijal u kosini se saturira zbog porasta razine podzemne vode što utječe na povećanje mase materijala, smanjenja trenja i faktora sigurnosti odnosno povećanja nestabilnosti. Ukoliko su poznati parametri materijala i uzroci klizanja može se pristupiti kvalitetnom projektiranju mjera sanacije.

U ovom diplomskom radu opisana su i uspoređena dva provedena ispitivanja na umanjenom modelu klizišta. Klizište je simulirano umjetnom oborinom, odnosno kišom. Prvo ispitivanje provedeno je na čistom pijesku, pod nagibom kosine od 35° , a drugo ispitivanje provedeno je na kosini od čistog pijeska pod nagibom od 35° s ugrađenim potpornim zidom kao mjerom sanacije. Tijekom pokusa opažaju se promjene vlažnosti materijala i pronađena unutar modela kosine korištenjem senzora ugrađenih u model tijekom njegove izgradnje. Vizualno su praćene pojave deformacija i trenuci u kojima je nožica klizišta potopljena, te pojava prve pukotine. Ispitivanje modela s ugrađenim potpornim zidom trajalo je vremenski duže od ispitivanja modela bez potpornog zida radi ispitivanja granica i uvjeta pod kojima će zid ostati i dalje stabilan.

Kroz ovaj diplomski rad najprije je bitno upoznati se sa samim pojmom klizišta, s njegovim dimenzijama, elementima i tipovima nestabilnosti. Najčešći problem nestabilnosti i sloma prirodnih i umjetnih kosina je porast razine podzemne vode uslijed procjeđivanja vode zbog obilnih oborina.

U radu su opisani modeli umanjenih klizišta na kojima su ispitivanja provedena te sama procedura gradnje modela, parametri materijala čistog pijeska i zasipa od šljunka i način ugradnje mjerne opreme i osnovne karakteristike korištenih senzora. Na kraju rada prikazani su i analizirani prikupljeni podaci s mjernih uređaja koji mjere volumni udio vode u materijalu, odnosno vlažnost tla. Prikazana je razlika ponašanja materijala prilikom nestabilnosti bez i sa mjerom sanacije – gravitacijskim potpornim zidom u različitim dijelovima modela.

Također, razlika ponašanja potkrijepljena je numeričkim modelima izrađenim u softveru Slide2 paketa Rocscience Inc. koji prikazuju ponašanje kosine u točno određenim

trenucima od početka ispitivanja. Provedene su analize stabilnosti i za svaki model su naznačeni faktori sigurnosti kritičnih kliznih ploha. Na kraju je opisana razlika mjerenja vlažnosti na istim dubinama s različitim senzorima.

2. OPĆENITO O KLIZIŠTIMA

Pojam klizište označava kretanje stijenske mase, krhotina ili tla niz padinu [1]. Klizišta spadaju među najrazornije i najraširenije prirodne katastrofe u svijetu. Voda je jedan od glavnih i najčešćih pokretača prirodnih i umjetnih klizišta. Voda može imati različite učinke na stabilnost kosine kao što su smanjenje sukcije, podizanje razine podzemne vode s posljedičnim porastom pornog tlaka, eksfiltracija podzemne vode iz čvrste podloge, erozija izazvana tečenjem po površini kosine, sile uzgona, smanjenje čvrstoće tla i dr. Geološke i hidrogeološke karakteristike kao što su propusnost i saturacija klizišta i materijala u podlozi u velikoj mjeri određuju koji će od tih procesa biti dominantni u izazivanju pokretanja [2].

Povećana interakcija ljudi, urbanizacija, nekontrolirano korištenje zemljišta i pojačano krčenje šuma povećavaju rizik od preosjetljivosti površinskog tla prema nestabilnostima. Također, česte i dugotrajne padaline visokog intenziteta i veće zimske oborine mogu povećati rizik od klizanja. Padaline, infiltracija i protok podzemne vode neki su od najvažnijih čimbenika koji izazivaju klizanje. Povećanje tlaka vode u porama smanjuje čvrstoću tla na smicanje što može dovesti do sloma kosine [2]. Ukoliko je posmična čvrstoća veća od posmičnog naprezanja tlo će u području kosine biti u ravnoteži. Kada su posmična naprezanja veća od posmične čvrstoće zbog pojave poremećaja koji izazove promjenu u prirodnoj ravnoteži, u kosini dolazi do sloma tla i klizanja tog područja [3].

U prirodi su kosine od materijala koji imaju veću čvrstoću npr. pijesak, šljunak, sipari i dr. strmije, dok su kosine od glinovitih i prašinstih materijala blažeg nagiba. Kako bi se utvrdilo uvjete i mjere osiguranja za trajnu stabilnost nekog područja, stabilnost kosina je potrebno konstantno proučavati [3].

Kompleksno je pratiti podrijetlo i tokove podzemnih voda u klizištima jer svako klizište ima jedinstveni uzorak toka podzemne vode. Razlog tome je što se hidrogeološki procesi djelomično odvijaju u podzemlju i teško su dostupni za praćenje. Propusnost tla ili stijena klizišta u velikoj mjeri kontrolira protok podzemne vode i može biti vrlo heterogena. Uzorak protoka podzemne vode može se promijeniti s vremenom zbog aktivnosti klizišta, stvaranja pukotina i povećanja propusnosti zbog zasićenja tla [2].

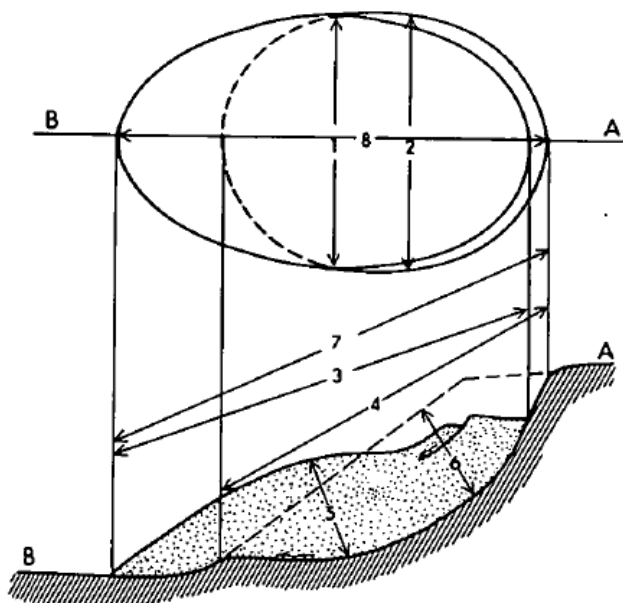
Prilikom proučavanja klizišta bitno je utvrditi tri važna činioca [3]:

1. prepoznavanje i klasifikacija tipova pokretanja mase, morfološke osobine, geološke uvjete sredine, brzine i veličine pokretanja, te uzročnike
2. klasifikacija mora sadržavati što točniji opis vrsta materijala obuhvaćenih kretanjem, čvrstoću na smicanje i deformacijske osobine pri promjeni opterećenja
3. proučiti stabilnost kosine ovisno o tipu klizanja i osobinama materijala.

2.1. Dimenzije i elementi klizišta

Slika 1 prikazuje dimenzije klizišta. Elementi su popisani redom brojevima i označeni na slici u nastavku [4].

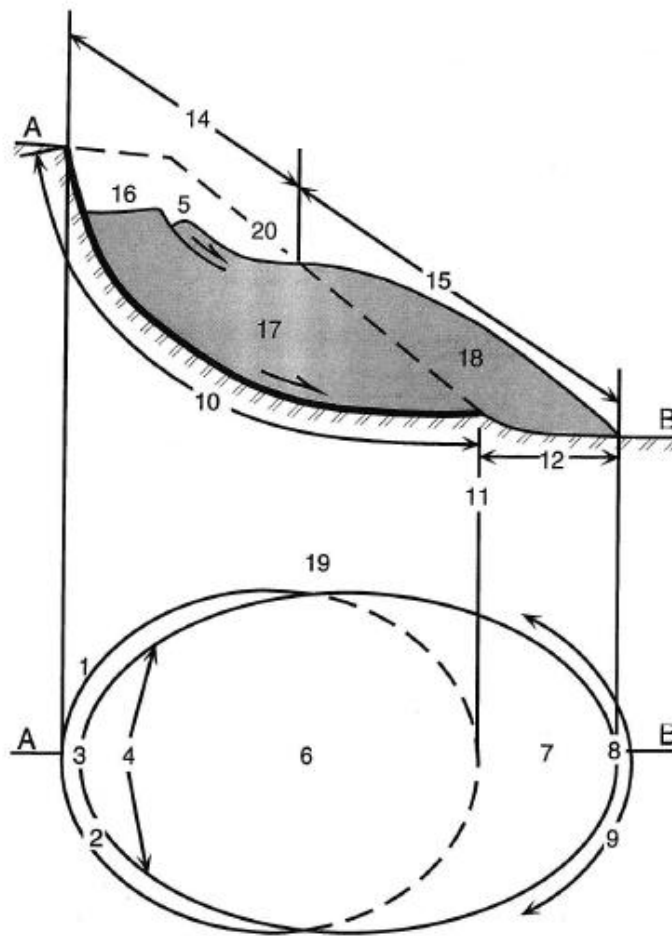
1. Širina pomaknute mase
2. Širina površine klizne plohe
3. Duljina pomaknute mase
4. Duljina površine klizne plohe
5. Dubina pomaknute mase
6. Dubina klizne plohe
7. Ukupna duljina klizišta
8. Duljina središnje linije



Slika 1: Dimenzije klizišta [4]

Zatim slijedi prikaz elemenata klizišta. Elementi su prikazani na slici 2 u nastavku i popisani redom brojevima [4].

1. Kruna klizišta
2. Glavna vlačna pukotina ili škarpa
3. Vrh klizišta
4. Čelo klizišta
5. Donja (niža) vlačna pukotina ili škarpa
6. Glavno tijelo klizišta
7. Stopa ili podnožje klizišta
8. Dno klizišta
9. Nožica ili završetak klizišta
10. Klizna ploha ili ploha sloma
11. Nožica klizne plohe
12. Ploha separacije
13. Pokrenuti materijal
14. Zona usjednutog materijala
15. Zona akumulacije
16. Usijedanje
17. Usjednuta masa
18. Akumulacija
19. Bok
20. Izvorna površina terena



Slika 2: Elementi klizišta [4]

2.2. Tipovi nestabilnosti klizišta

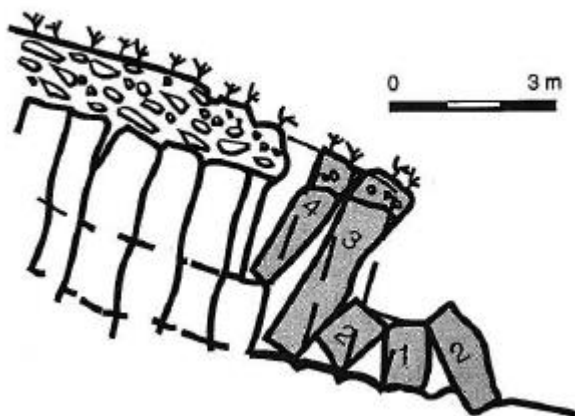
Najčešće korištena klasifikacija je prema D.J. Varnesu (1978.). Postoji pet osnovnih tipova nestabilnosti prema tipu kretanja, a to su odron, prevrtanje, klizanje, širenje tla i tok tla [5].

Odron započinje odvajanjem tla ili stijene sa strme kosine duž površine na kojoj ne postoji nikakvo smicanje ili je zanemarivo maleno. Dolazi do slobodnog pada materijala niz kosinu, prevrtanja ili kotrljanja. Na slici 3 je prikazan odron [4].



Slika 3: Prikaz odrona [4]

Prevrtanje označava rotaciju mase tla ili stijene izvan kosine. Rotacija se odvija oko osi koja se nalazi u nožici. Postoji mogućnost da prevrtanje slijedi ili prethodi odronjavanju ili klizanju. Slika 4 prikazuje prevrtanje [5].

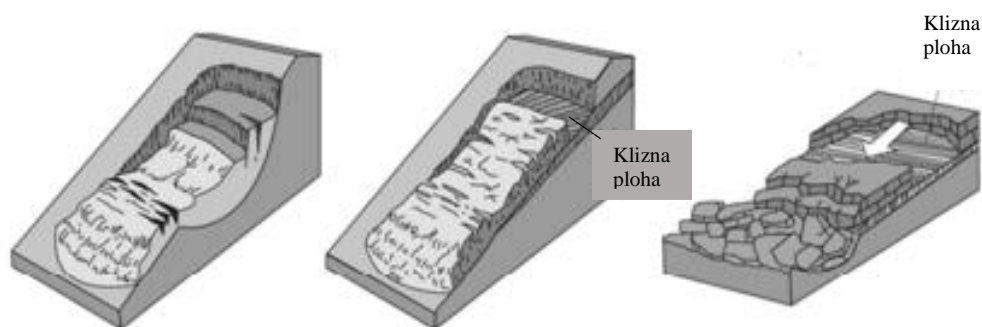


Slika 4: Prikaz prevrtanja [4]

Klizanje je kretanje tla ili stijenske mase niz kosinu. Javlja se dominantno na površinama s vidljivim pukotinama ili u relativno plitkim zonama intenzivnog smicanja. Takvo kretanje mase se može dogoditi po jednoj ili više jasno definiranih kliznih ploha kao što je vidljivo na slici 5 [5]. Poznata su tri tipa klizanja: rotacijsko, translacijsko i blokovsko klizanje, slika 6 [4]. Rotacijsko klizanje je klizanje oko osi paralelno s konturom kosine. Do pokretanja dolazi zbog intenzivne kiše ili otapanja snijega uslijed čega se povećava razina podzemne vode. Još neki pokretači su brzo snižavanje razine vode nakon velikih poplava, porast razne podzemne vode zbog porasta razine vode u potocima, rijekama i jezerima. Također, može nastati kao posljedica potresa. Translacijsko klizanje je najčešći tip klizanja u svijetu. Masa se giba plitko uzduž relativno ravne površine. Pokretači isti kao prethodno navedeni [6].



Slika 5: Prikaz klizanja [4]



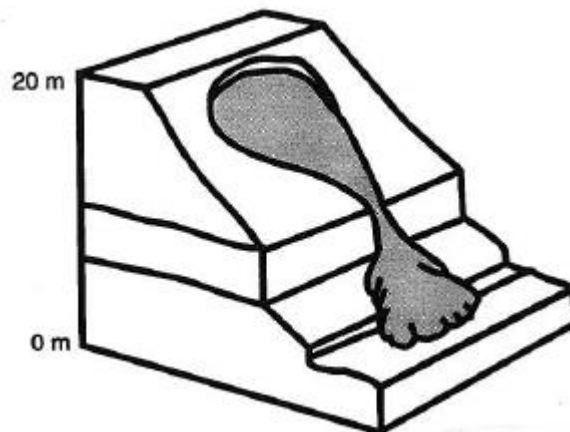
Slika 6: Tipovi klizanja: rotacijsko, translacijsko i blokovsko klizanje [5]

Širenje tla opisano je kao bočno razmicanje kohezivnog tla ili stijenske mase, slika 7. Kao rezultat širenja tla nastaju smičuće i/ili vlačne pukotine tla. Također, rezultat širenja tla može biti likvefakcija ili tok (istiskivanje) mekšeg materijala [4].



Slika 7: Prikaz širenja tla [4]

Tok (tečenje) je prostorno kontinuirano kretanje mase tla u kojem su površine smicanja kratkotrajne, usko raspoređene i nisu očuvane. Tok tla je prikazan na slici 8. Izražene su varijacije brzine, sadržaja vode i granulometrijskog sastava [4][5].



Slika 8: Prikaz tečenja tla [4]

3. PROVOĐENJE ISPITIVANJA

Fizičko modeliranje u umanjenim modelima kosina uvedeno je kao prirodno rješenje za bolju simulaciju stanja u kosini prije, tijekom i nakon pokretanja klizišta. Takvo modeliranje pronašlo je široku primjenu diljem svijeta u različitim aspektima istraživanja klizišta, analiziranju različitih tipova klizišta kao i različitih vrsta tala i stijena te kretanja klizišta. Glavna zadaća fizičkog modeliranja klizišta je istraživanje pokretanja, gibanja i akumulacije brzih tokova uzrokovanih infiltracijom površinske vode u kosinu i fluidifikacijom [7].

Ključnu ulogu u projektiranju i analiziranju podataka umanjenog modela kosine igra zakon skaliranja. Nužan preduvjet za uspješno modeliranje klizišta u umanjenom mjerilu jest točno skaliranje dimenzija modela, rubnih uvjeta, značajki materijala, intenziteta padalina i parametara trešnje kao pokretačkih čimbenika, te izmjerenih podataka kao što su pomaci, brzine, ubrzanja, itd. Simulacija stvarnog klizišta u umanjenom modelu ograničena je na primjenu najvažnijih elemenata koji utječu na nestabilnosti, a svi ostali elementi se prilagođavaju oponašanju stvarnog procesa klizanja. Ograničenje postoji zbog toga što je proces klizanja složen geomorfološki proces, stoga bi nastale dodatne nepoznanice i komplikacije prilikom projektiranja i prikupljanja i analiziranja podataka. Razvoj nestabilnosti modela kosine u umanjenom mjerilu praćen je pomoću terestričkog laserskog skenera (TLS) koji služi za promatranje površinskih pomaka i parom brzih kamera, te promatranjem kretanja unutar mase modela pomoću akcelometara. Za promatranje hidrauličkog odziva kosine korišteni su različiti senzori opisani u nastavku rada [7].

U ovom radu opisana su dva pokusa, te su analizirani rezultati ponašanja umanjene kosine od čistog pijeska sa i bez potporne konstrukcije – gravitacijskog potpornog zida. Model kosine napravljen je od prozirnog pleksiglasa, postavljen je na čeličnom fiksnom stolu s mogućnošću podešavanja nagiba kosine pomoću gornje ploče. Oba ispitivanja izložena su jednakim intenzitetima oborina. Također, u oba pokusa pokretanje klizišta uzrokovano je kontroliranim umjetnim oborinama. Glavni zahtjev za pravilnim ispitivanjem je da se sva oborinska voda s površine modela infiltrira bez stvaranja površinskog otjecanja. Odabir intenziteta oborina temeljen je na uvjetima infiltracije.

Ispitivanja se provode na modelu kosine izgrađene od sitnozrnastog čistog pijeska. Materijal čistog pijeska pripremljen je u laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci. Značajke materijala prikazane su u tablici 1 u nastavku.

Tablica 1: Značajke čistog pijeska [7]

| Parametar | Oznaka | Čisti pijesak |
|------------------------------|---|----------------------|
| Specifična gustoća | G_s | 2,70 |
| Suha gustoća | ρ_d (g/cm³) | 1,52 |
| Ukupna gustoća | ρ_t(g/cm³) | 1,55 |
| Effektivna veličina zrna | D₁₀ (mm) | 0,19 |
| Effektivna veličina zrna | D₆₀ (mm) | 0,37 |
| Koeficijent uniformnosti | C_u | 1,947 |
| Minimalni koeficijent pora | e_{min} | 0,641 |
| Maksimalni koeficijent pora | e_{max} | 0,911 |
| Hidraulička konduktivnost | k_s (m/s) | 1E-05 |
| Kut trenja | Φ(°) | 34,9 |
| Kohezija | c (kPa) | 0 |
| Inicijalni porozitet | n_i | 0,44 |
| Inicijalni koeficijent pora | e_i | 0,78 |
| Inicijalna relativna gustoća | D_r_i | 0,5 |
| Inicijalna vlažnost | w_i (%) | 2 |

3.1. Mjerna oprema

Sustav za praćenje pomaka uspostavljen u umanjenom modelu slijedi principe koji se koriste u promatranju stvarnih klizišta i sastoji se od geodetskog i geotehničkog sustava za monitoring. Geodetski sustav monitoringa temelji se na fotogrametrijskoj opremi za multi-temporalnu analizu klizišta pomoću niza slika dobivenih parom brzih stereo kamera. Terestričko lasersko skeniranje i fotogrametrijska SfM („Structure from motion“) metoda omogućuju određivanje površine modela kosine u fazama prije i nakon klizanja. Geotehnički sustav monitoringa sastoji se od složene mreže senzora ekvivalentnih geotehničkim mjernim uređajima koji se koriste na terenu. Svi senzori korišteni u modelima su konstantno povezani s uređajima za prikupljanje i pohranu podataka (data loggerima) tijekom trajanja ispitivanja [7].

Uređaji za prikupljanje i pohranu podataka (eng. data logger) korišteni u ispitivanjima su Zentra data logeri, ZL6 (METER Group, Inc.). Svaki logger ima 6 portova za senzore.

U ovom radu analizirani su podaci s uređaja za mjerenje volumnog udjela vode, odnosno vlažnosti u tlu, te su prikupljeni podatci grafički prikazani u kasnijim poglavljima. Jednadžba 1 opisuje omjer volumena vode u odnosu na ukupni volumen materijala što onda označava volumni udio vode u materijalu. U pravilu svi su uređaji Teros ugrađeni horizontalno na slojeve. Sloj se ugradi, lagano kompaktira ručnim nabijačem, pa se postavi uređaj horizontalno i pokrije sljedećim slojem materijala. Na kosini su uređaji postavljeni paralelno s kosinom na isti način. Korišteni uređaji su opisani u nastavku teksta.

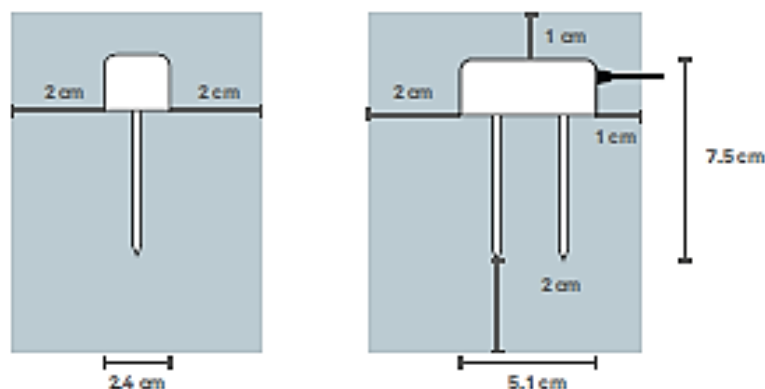
$$\theta = \frac{V_w}{V_{TOT}} \left[\frac{m^3}{m^3} \cdot / \right] \quad (1)$$

Tijekom oba pokusa, pri istom nagibu kosine i debljini materijala oprema za praćenje postavljena je na istim pozicijama na kosini kako bi se omogućilo mjerenje promjena volumnog udjela vode, odnosno vlažnosti na isti način. Senzori za mjerenje

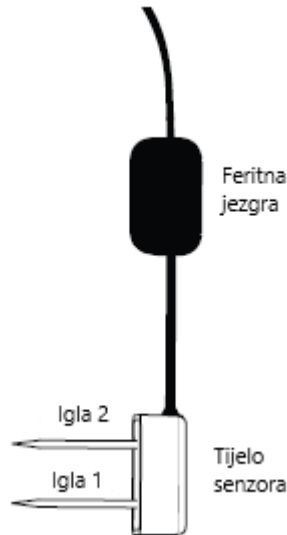
vlažnosti ugrađeni su na četiri različite dubine (6 cm, 12 cm, 18 cm i 24 cm ispod površine) u donjem (L), srednjem (M) i gornjem (H) dijelu kosine.

Teros10 (METER Group, Inc.) senzor mjeri vlažnost u tlu pomoću igala od nehrđajućeg čelika. Igle su duge 5,4 cm, a senzor je dugačak 5,1 cm, širine 2,4 cm i ukupne visine 7,5 cm. Dimenzije senzora su prikazane na slici 9. Feritna jezgra pozicionirana je na kabel 7,6 cm od glave senzora te služi za izolaciju senzora od bilo kakvih smetnji u sustavu. Njome se sprječava pojava potencijalnih šumova sustava na izmjerenim podacima. Senzori Teros10 koriste elektromagnetsko polje za mjerenje prividne dielektrične permitivnosti okolnog medija. Tijelo senzora opskrbljuje igle senzora oscilirajućim valom od 70 MHz, koje se pune s obzirom na dielektričnost materijala. Vrijeme punjenja proporcionalno je dielektričnosti tla i vlažnosti u tlu [8].

Mikroprocesor mjeri vrijeme punjenja i daje neobrađenu vrijednost na temelju prividne dielektrične permitivnosti tla. Neobrađena vrijednost se zatim pretvara u volumni udio vode kalibracijskom jednadžbom specifičnom za tlo. Na slici 10 su prikazani dijelovi senzora Teros10 [8].



Slika 9: Dimenzije senzora Teros10 [8]



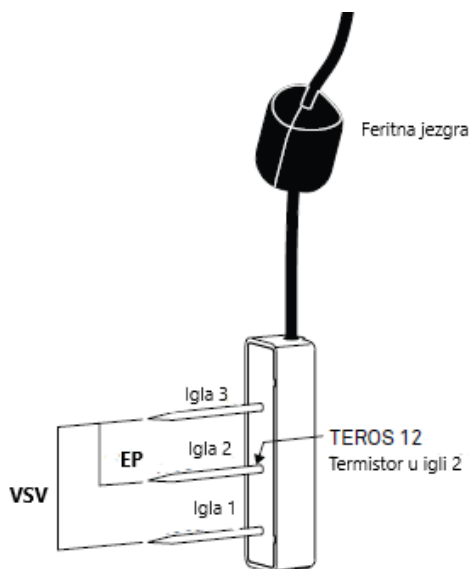
Slika 10: Dijelovi senzora Teros10 [8]

Senzor nije osjetljiv na varijacije u teksturi tla i elektromagnetsku vodljivost jer radi na visokoj frekvenciji mjerenja. Generička jednadžba kalibracije trebala bi rezultirati apsolutnom točnošću od $0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$, a za većinu mineralnih tala do 8 dS/m saturiranog tla. Za visoku točnost potrebno je izvršiti kalibracije specifične za tlo. Minimalna radna temperatura za senzor Teros10 kreće se u rangu od -40° do 60° C . Vrijeme potrebno da senzor izmjeri vrijednost iznosi 10 ms [8].

Slično kao i Teros 10, senzor Teros 12 (METER Group, Inc.) precizan je uređaj za mjerenje vlažnosti u tlu, temperature i električne provodljivosti tla. Senzor koristi frekvenciju od 70 MHz zbog minimaliziranja učinaka teksture i saliniteta stoga je pogodan za korištenje u mineralnim tlima. Vlažnost tla mjeri na igli 1, a igle 2 i 3 služe kao reference za mjerenje. Pomoću termistora u središnjoj igli senzor mjeri temperaturu, a izlazni podatak izražen je u Celzijevim stupnjevima. Električnu provodljivost mjeri pomoću niza elektroda od nehrđajućeg čelika. Električna provodljivost mjeri se na mjestu između igle 2 i 3. Mjesta mjerenja vlažnosti i električne provodljivosti prikazana su na slici 11 [9].

Senzori zahtijevaju malu potrošnju energije, stoga su idealni za trajno ukopavanje u tlo i kontinuirano očitavanje podataka pomoću data logera ili povremeno pomoću ručnog čitača [9].

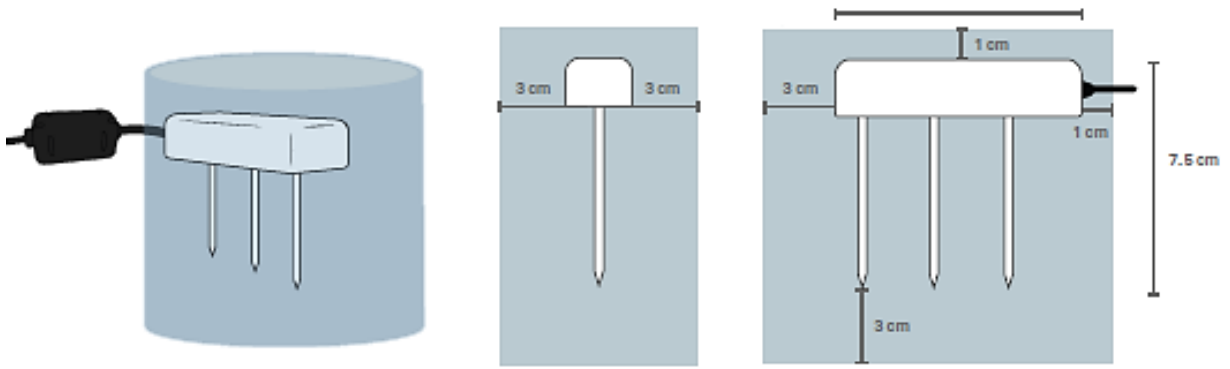
Feritna jezgra prikazana na slici 11 postavljena je na kabel senzora i 7,6 cm je udaljena od glave senzora. Koristi za izolaciju senzora od bilo kakvih smetnji u sustavu. Izolacijom se ublažava svaki potencijalni šum sustava na izmjerenim podacima. Važno je ništa ne spajati na dio kabela između glave senzora i feritne jezgre jer to može utjecati na mjerenja [9].



Slika 11: Senzor Teros12 [9]

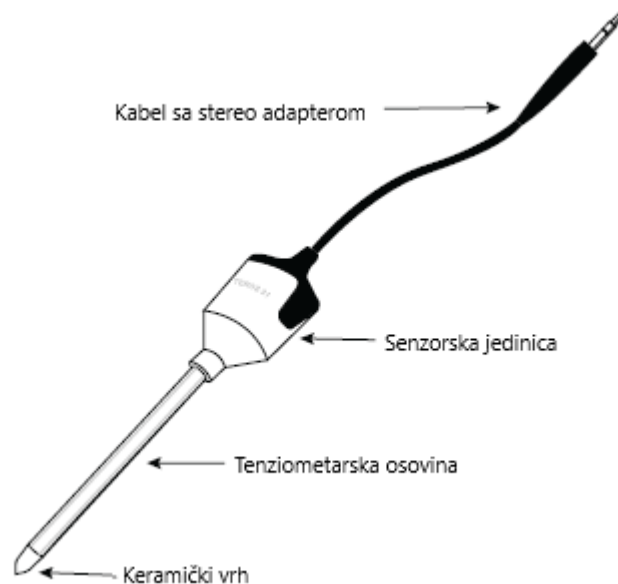
Senzori Teros12 koriste elektromagnetsko polje za mjerenje prividne dielektrične permitivnosti okolnog medija. Tijelo senzora opskrbljuje igle senzora oscilirajućim valom od 70 MHz, koje se pune s obzirom na dielektričnost materijala. Vrijeme punjenja proporcionalno je dielektričnosti tla i volumnom udjelu vode u tlu [9].

Na slici 12 su prikazane dimenzije senzora Teros 12. Njegova duljina je 9,4 cm, širine je 2,4 cm i ukupne visine 7,5 cm. Igle su dugačke 5,5 cm. Minimalna radna temperatura za senzor Teros12 kreće se u rangu od -40°C do 60°C . Vrijeme potrebno da senzor izmjeri vrijednost podatka iznosi 10 ms [9].



Slika 12: Dimenzije senzora Teros12 [9]

Zadnji korišteni senzor je senzor Teros31 (METER Group, Inc.). Senzor Teros31 mjeri potencijal i temperaturu vode u tlu. Senzor je dizajniran za točkasto mjerenje s aktivnom površinom od samo 0,5 cm² i promjerom od 5 mm. Keramički vrh prikazan na slici 13 ima razne prednosti s obzirom na tako malu dimenziju. Neke od prednosti su vrlo maleno ili skoro nikakvo poremećenje tla, selektivno skupljanje i brz odziv. Tanak i fleksibilan kabel prenosi minimalnu silu na senzorsku jedinicu i osovinu tenziometra. Također, velika prednost Teros31 senzora je što se može postaviti gotovo u svaki položaj bez utjecaja na mjerenje [10].



Slika 13: Senzor Teros31

Potencijal vode mjeri se pomoću osovine ispunjene vodom s poroznim keramičkim vrhom na kraju koja vodi do pretvarača apsolutnog tlaka unutar senzorske jedinice. Temperatura tla se također mjeri pretvaračem tlaka unutar senzorske jedinice [10].

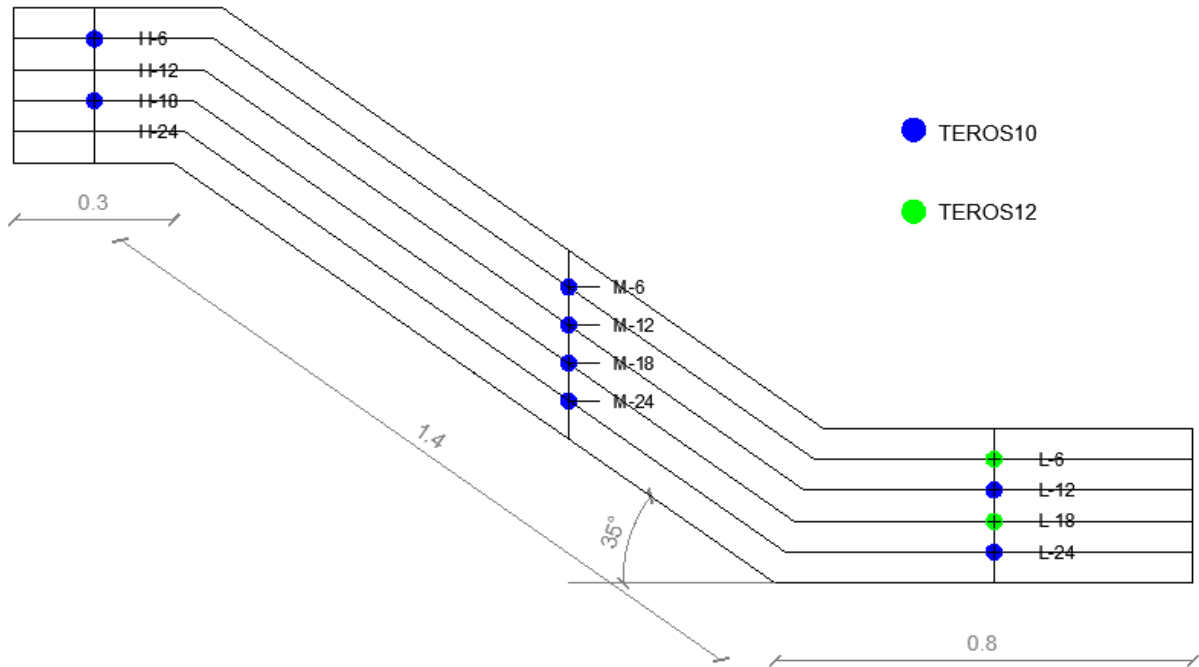
Senzor je ukupne duljine 23,5 mm, dubina seže do 17,5 mm, a visina 49 mm. Promjer osovine senzora iznosi 5 mm [10].

Tablica 2: Vrijednosti potencijala i temperature za Teros31 [10]

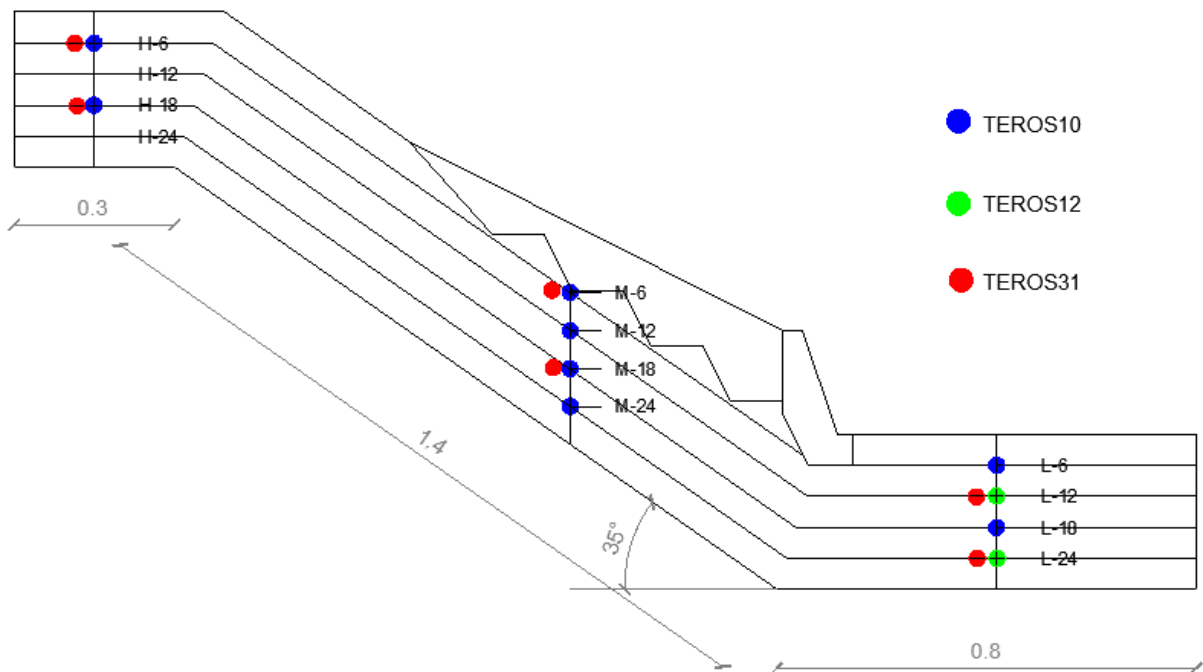
| Potencijal | |
|--------------------|----------------|
| Rang | -85 to +50 kPa |
| Rezolucija | ±0.0012 kPa |
| Točnost | ±0.15 kPa |
| Temperatura | |
| Rang | -30 to +60 °C |
| Rezolucija | ±0.01 °C |
| Točnost | ±0.5 °C |

Zbog niske potrošnje energije Teros31 je idealan za dugotrajno ukopavanje u tlo. Podatci se mogu očitavati kontinuirano pomoću dana logera ili povremeno pomoću ručnog čitača [10].

Mjerni uređaji postavljeni su u oba modela na iste pozicije. Mjere vlažnosti na 6 cm, 12 cm, 18 cm i 24 cm na svakom dijelu modela zasebno. Slika 14 i slika 15 u nastavku prikazuju dubine i pozicije na kojima je postavljena mjerna oprema za oba pokusa. Plavi kružići označavaju pozicije na kojima se nalazi senzor Teros10, zeleni kružići označavaju pozicije na kojima se nalazi senzor Teros12, a crveni kružići prikazuju pozicije na kojima je postavljen senzor Teros31. Na gornjem dijelu H senzori su postavljeni u središtu modela, odnosno na sredini dužine. U srednjem dijelu M postavljeni su na jednoj trećini dužine mjereno s desne strane i na donjem dijelu L su postavljeni u središtu modela, također na sredini dužine.



Slika 14: Prikaz mjernih pozicija u kosini bez potpornog zida

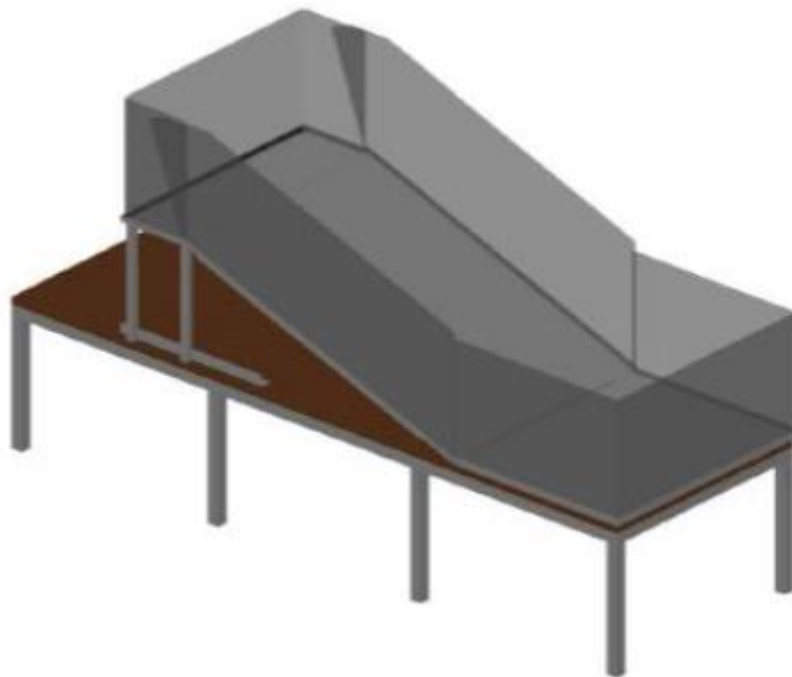


Slika 15: Prikaz mjernih pozicija u kosini s ugrađenim potpornim zidom

Simulator oborina korišten u ovom istraživanju sastoji se od tri grane sprinklera. Svaka grana opremljena je s četiri različite mlaznice s mlazom oblika punog stošca i kutom prskanja od 45° ili 60°. Grane su postavljene na određenim visinama kako bi voda mogla dosegnuti krajnje rubove modela. Takvo rješenje postavljanja grana pokriva širok raspon intenziteta oborina. Raspon od 30 l/h/m² do više od 140 l/h/m² pri referentnom tlaku od 2 bara. Mogućnost podešavanja i kontrole intenziteta, uzorka i uniformnosti simulirane oborine je zahtjevan izazov u modelima umanjenog mjerila [7].

4. ISPITIVANJA MODELA KOSINE SA I BEZ POTPORNOG ZIDA

Nosivi stol na kojem se nalazi model platforme napravljen je od čeličnih elemenata i ploče vodootporne blažujke. Služi za stabilizaciju kompletnog modela, te kako bi se platforma lakše rastavljala i sastavljala po potrebi. Model platforme konstruiran je za ispitivanja u statičkim uvjetima. Napravljen je od nosive konstrukcije od čelika i pleksiglasa. Ukupno sadrži 8 pleksiglas stijenki kojima je model omeđen. Kompletnan model je prikazan na slici 16. Gornji stol platforme može se podešavati u visinu pa je time omogućeno prilagođavanje visine s obzirom na željeni kut nagiba modela. Dimenzije donje ploče su 800 mm x 1000 mm, središnje plohe 1400 mm x 1000 mm, te gornjeg stola 300 mm x 1000 mm [6]. Modeli ispitivani u ovom radu nalaze se pod kutom nagiba od 35°.



Slika 16: Model nosive konstrukcije od čelika i pleksiglasa na nosivom stolu

4.1. Ispitivanje modela kosine bez potpornog zida

Dimenzije umanjenog modela kosine su 1,0 m x 2,3 m x 0,5 m (širina x dužina x visina). Umanjeni model je prikazan na slici 17. Maksimalna dubina materijala čistog pijeska u kosini iznosi 30 cm. Kosina se nalazi pod nagibom od 35°. Na maksimalnoj dubini modela postavljena je geomreža kako bi se spriječili neželjeni pomaci na bazi modela te iz istog razloga povećalo trenje [7].



Slika 17: Umanjeni model kosine od čistog pijeska

Za ispitivanje kosine bez potpornog zida u model je ugrađen sitnozrnasti čisti pijesak fine (uniformne) gradacije od 0 – 1,0 mm. Čisti pijesak u model je ugrađen u sveukupno 5 slojeva, svaki debljine 6 cm. Slojevi su ugrađeni na način da se nakon ugradnje svakih 6 cm materijala svaki sloj zbijao ručnim nabijačem. Ukupna debljina ugrađenog materijala čistog pijeska iznosi 30 cm. Materijal čistog pijeska ugrađivao se na način da se svaki segment ugrađivao zasebno od podnožja prema vrhu kosine. A kako bi se postigla ujednačenost ispitivanja i homogenost materijala u nagibu i ostalim dijelovima

modela, model je podijeljen na tri segmenta – donji, L (low), središnji, M (medium) i gornji, H (high) [7].

Parametri čvrstoće materijala određeni su u uređaju za izravno smicanje pri istim parametrima navedenim u tablici 1 i niskim normalnim napreznjima istim kao u modelu. Kut trenja čistog pijeska iznosi $\Phi=34,9^\circ$. Hidraulička vodljivost određena je u edometru pri niskim normalnim napreznjima koja također odgovaraju napreznjima u modelu $k = 5 \times 10^{-5}$ m/s. Izmjerena sukucija pri vlažnosti od $w = 2\%$ varira od 6 kPa do 8 kPa [7].

Nakon ugradnje materijala i opreme model je izložen umjetnim oborinama iz tri mlaznice – po jedna mlaznica u svakom dijelu kosine. Na slici 18 su prikazane pozicije i prskanje iz mlaznica.



Slika 18: Početak ispitivanja - izlaganje modela umjetnim oborinama iz tri mlaznice

Ispitivanje započinje u 11:00 sati. U početku je uspostavljen konstantan intenzitet oborina i stabilan proces infiltracije. Intenzitet od 72,6 mm/h na sve tri mlaznice održavao se do 70-te minute. U 11:48 sati podiže se razina podzemne vode do površine tla te je nakon toga nožica klizišta potopljena. Potopljena nožica prikazana je na slici 19. U 12:00 sati otvara se najviša drenažna cijev kako bi se razina podzemne vode održavala konstantna.



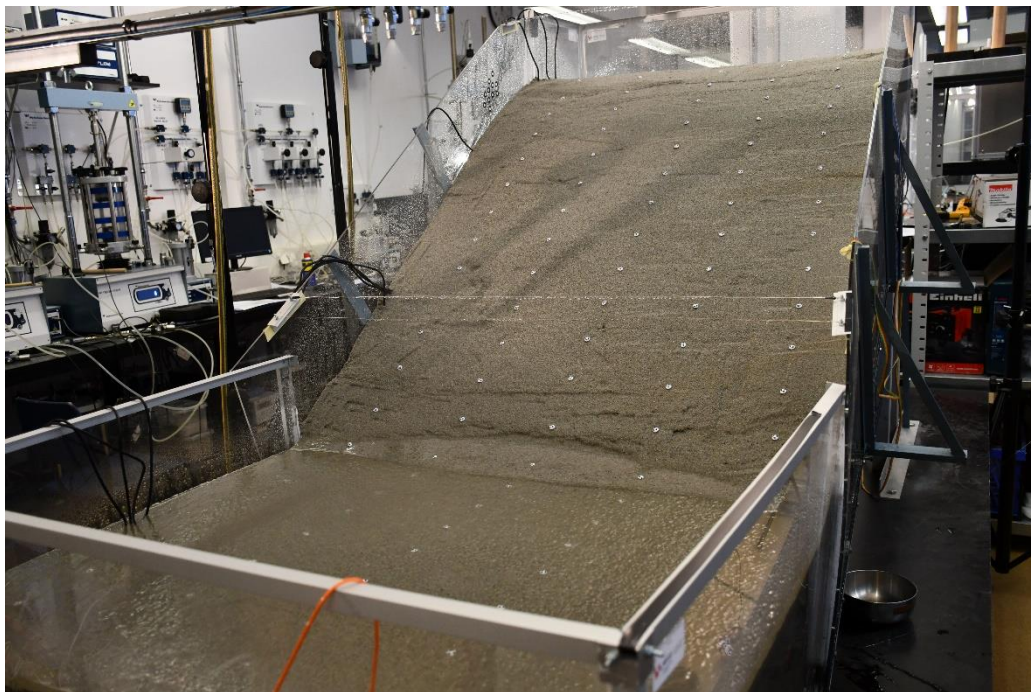
Slika 19: Potopljena nožica

Prva pukotina u modelu pojavila se u 12:02 sati, cca 70 minuta nakon što je razina podzemne vode dosegla površinu tla u donjem dijelu modela. Slika 20 prikazuje pojavu prve pukotine. Razina podzemne vode u donjem dijelu održavana je do kraja pokusa tako što je mlaznica koja se nalazila iznad tog dijela zatvorena. Intenziteti su potom smanjeni na 36,3 mm/h i 41,9 mm/h i tako održavani sljedećih 45 minuta. U tom vremenskom periodu klizište u kosini se retrogresivno razvilo do vrha kosine kao što je prikazano na slici 21. Nakon što je retrogresivni razvoj klizišta došao do vrha kosine intenzitet oborina se povećao na 83,7 mm/h u sljedećih 10 minuta, te se konačno povećao na 302,8 mm/h do

konačnog sloma nakon 128 minuta od početka ispitivanja. Ispitivanje je završeno u 13:07 sati [7].



Slika 20: Pojava prve pukotine



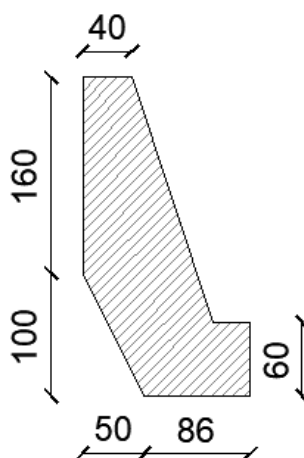
Slika 21: Retrogresivni razvoj klizišta

Površinski znakovi pokretanja klizišta i uzroci njihovih pojava objašnjeni su interpretacijom podataka o promjenama vlažnosti u modelu tijekom pokusa prikazanih pod podnaslovom 4.3. *Analiza rezultata pokusa*. Proces inicijacije i razvoja klizišta opisan je povećanjem vlažnosti uslijed infiltracije do zasićenja u najdubljem dijelu kosine čime se zatim formira razina podzemne vode. Nakon što oborinska voda počne teći niz kosinu, te se akumulira, ona uzrokuje nagli porast podzemne vode u donjem dijelu kosine. To dovodi do smanjenja posmične čvrstoće tla s potpunim smanjenjem sukcije, sloma i daljnjeg retrogresivnog razvoja klizišta do vrha kosine [7].

4.2. Ispitivanje s postavljenim gravitacijskim potpornim zidom

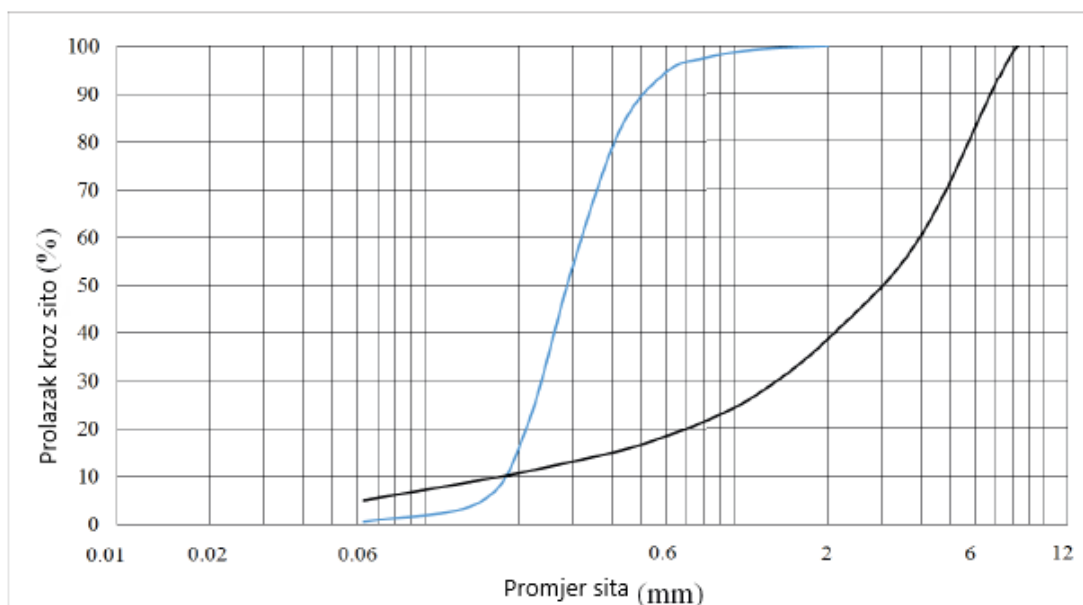
Kao i kod prethodnog pokusa, dimenzije umanjenog modela kosine su 1,0 m x 2,3 m x 0,5 m. Kosina se nalazi pod nagibom od 35°, a na maksimalnoj dubini modela postavljena je geomreža. Materijal je u kosinu nanovo ugrađen istom metodom, te pri istim uvjetima kao u ispitivanju bez potpornog zida. Nakon ugradnje materijala postavljen je potporni zid u model.

Potporni zid sastoji se od pet istih elemenata visine $h=26$ cm. Elementi su isprintani pomoću 3D printera te su međusobno povezani zglobnom vezom. Kroz potporni zid ugrađene su procjednice, odnosno drenovi. Visina zida određena je na temelju geometrijske sličnosti u omjeru 1:20. Dimenzije potpornog zida prikazane su na slici 22 u centimetrima.



Slika 22: Dimenzije potpornog zida

Materijal korišten za ispunu potpornog zida je krupnozrnasti drobljeni kamen. Materijal korišten za zasipavanje iza potpornog zida je šljunak granulometrijskog sastava prikazanog na slici 23. Granulometrijski sastav šljunka za zasipavanje određen je iz geometrijske sličnosti s krupnozrnastim drobljenim kamenim materijalom ispune potpornog zida, u omjeru 1:20. Parametri čvrstoće zasipnog materijala nisu predmet istraživanja. Značaj zasipnog materijala je u hidrauličkoj propusnosti koja je znatno veća nego kod čistog pijeska pa tako nema utjecaja na proces infiltracije vode [7].

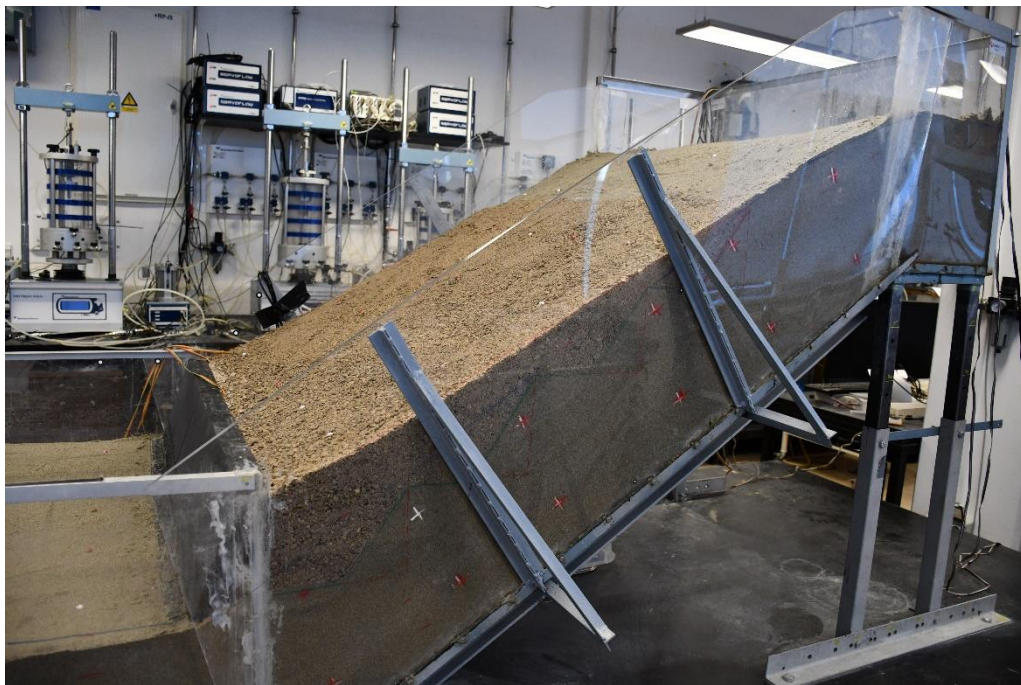


Slika 23: Granulometrijska krivulja čistog pijeska i šljunka[7]

Ugrađeni potporni zid prikazan je na slici 24, a ugrađivao se na način da se nakon izvedbe osnovnog modela kosine od čistog pijeska u nožici kosine iskopao rov za ugradnju potpornog zida. Zatim su se ugrađivali senzori te je potom nastavljeno zasipavanje šljunčanim materijalom. Površina kosine iskopana je stepenasto radi boljeg prijanjanja između pjeskovite kosine i šljunčanog nasipa što je vidljivo na slici 25. Pjeskoviti materijal modela i šljunčani materijal zasipa odvojeni su geotekstilom i zbijani ručnim nabijačem.



Slika 24: Prikaz modela s ugrađenim potpornim zidom



Slika 25: Zasip od šljunka

Ispitivanje započinje u 13:25 sati. Kao i kod ispitivanja modela bez mjere sanacije u početku je uspostavljen konstantan intenzitet oborina i stabilan proces infiltracije. Intenzitet od 72,6 mm/h održavao se sat vremena. U 14:25 sati nožica klizišta je potpuno saturirana, te se najviši (gornji) red drenova potaplja. Na slici 26 primjećuje se potopljena nožica i razina podzemne vode iznad površine materijala. Odmah nakon jedne minute počinje izlaziti voda na gornjem dijelu iz najvišeg reda drenova. 10-ak minuta kasnije zatvorena je donja mlaznica te se protok smanjuje i potom otvara drenažna cijev. U modelu u cijelom tom razdoblju nije došlo do pokretanja klizišta. Ispitivanje modela završeno je nakon 128 minuta otvaranjem mlaznice intenziteta 122,8 mm/h na gornjem dijelu kosine. Taj intenzitet veći je od kapaciteta infiltracije pjeskovitog materijala. S obzirom da nije došlo do procesa klizanja dokazano je da su primijenjene mjere sanacije u vidu gravitacijskog potpornog zida i zasipa od šljunka pravilan izbor te da mogu zadržati stabilnost kosine od pjeskovitog materijala. Slika 26 također prikazuje model kosine nakon 128 minuta ispitivanja [7].



Slika 26: Potopljena nožica ispred potpornog zida

Nakon 128 minuta trajanja ispitivanja uslijedila je primjena velikog intenziteta oborina na gornjem dijelu kosine od 122,8 mm/h koji je veći od infiltracijske sposobnosti pjeskovitog materijala. Takvo stanje utječe na povećano površinsko otjecanje vode niz kosinu. U 15:29 sati došlo je do naglog razvoja bočnih pukotina, procesa erozije i globalne nestabilnosti kosine što je uzrokovalo prekoračenje nosivosti tla ispod temelja potpornog zida. Također, kombinacijom površinske erozije i zasićenja površinskog sloja kosine vodom dolazi do pokretanja pješčanog toka kao što je vidljivo na slici 27.



Slika 27: Tečenje pijeska uslijed velikog intenziteta oborina

Iako potporni zid nije u potpunosti urušen niti prevrnut, horizontalni pomak omogućen lokalnim slomom ispod temelja potpornog zida i horizontalno zbijanje tla u podnožju kosine omogućili su globalno urušavanje kosine. Na slici 28 je prikazano stanje nakon prekoračenja nosivosti tla ispod temelja potpornog zida, vidljiva je uzdužna deformacija potpornog zida uslijed lokalnog posmičnog sloma ispred temelja zida. Ispred potpornog zida aktivirao se pasivni otpor tla uslijed pomaka materijala s kosine prema dnu čime se izdignuo materijal u nožici. Uočena su dva efekta nakon pojačavanja intenziteta umjetne oborine. Prvi efekt je redistribucija mase materijala niz kosinu zbog

povećanja mase. Velika količina vode se infiltrirala i potpuno saturirala materijal, stoga se voda podignula čime se smanjilo trenje na kontaktu materijala zasipa i čistog pijeska. Drugi efekt je smanjenje efektivnih naprezanja što reducira čvrstoću materijala. No, uzimajući u obzir skalirano mjerilo umanjenog modela primijenjeni intenzitet od 122,8 mm/h u stvarnosti bi predstavljao rijetke ekstremne oborine. Stoga je jasno da je gravitacijski potporni zid značajno poboljšao stabilnost kosine što je svakako dokazano ovim ispitivanjem [7].



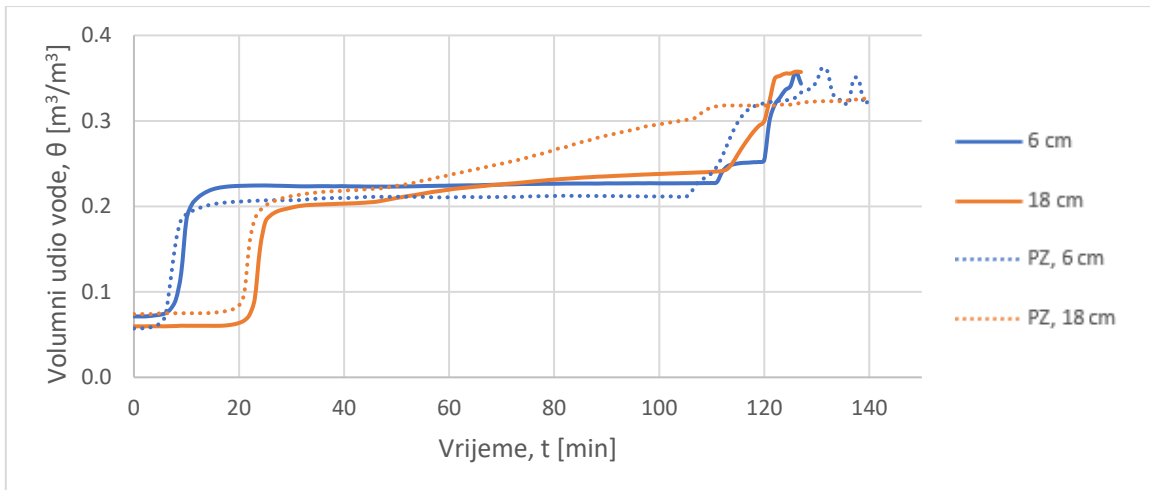
Slika 28: Uzdužna deformacija potpornog zida i izdignuti materijal u nožici

4.3. Analiza rezultata pokusa

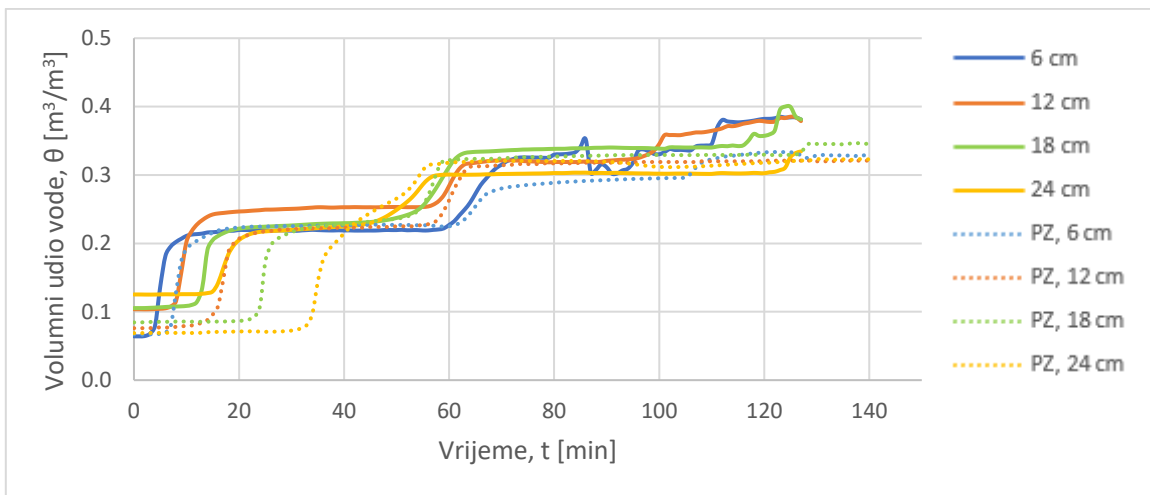
Rezultati mjerenja omogućili su uvid u cjelokupan proces infiltracije oborina, saturacije tla i posljedično smanjenje čvrstoće tla i razvoj nestabilnosti u kosini za oba ispitivanja u određenim trenutcima na određenim mjernim pozicijama.

Mjerni uređaji postavljeni su u oba modela na iste pozicije, na način prikazan na slikama 14 i 15. Analizom podataka s uređaja za prikupljanje i pohranu podataka dobiveni su dijagrami koji prikazuju izmjerene vlažnosti na 6 cm, 12 cm, 18 cm i 24 cm na svakom dijelu modela zasebno. Puna linija označava pokus bez potpornog zida, dok točkasta linija prikazuje pokus s primijenjenom mjerom sanacije – gravitacijskog potpornog zida. Kao što je vidljivo iz prikazanih dijagrama infiltracijom i formiranjem razine podzemne vode duž kosine u oba modela nisu utvrđena značajna odstupanja u rezultatima mjerenja. Razlike u početnom i testnom sadržaju vode su zanemarive.

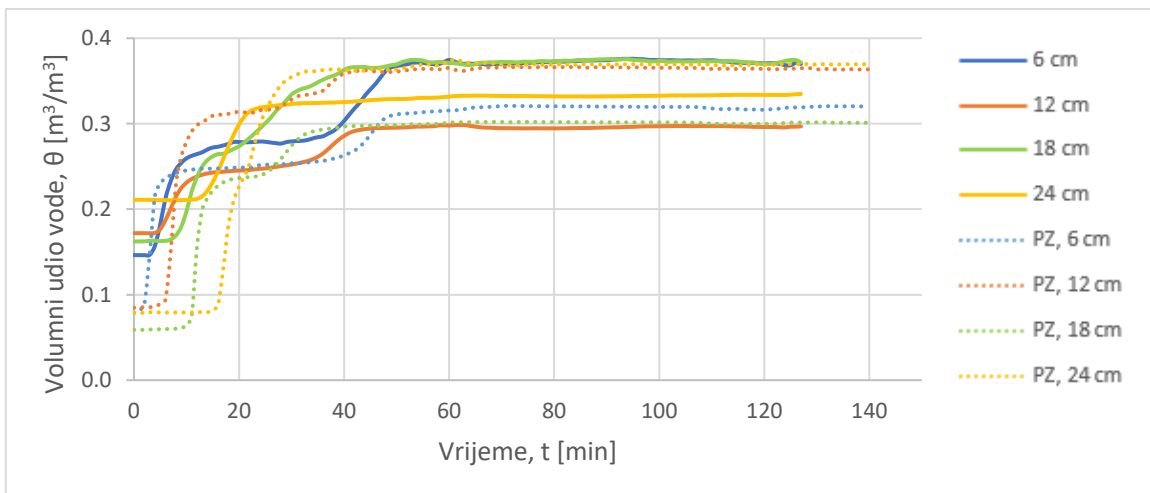
Najprije su prikazani preklapljeni dijagrami modela sa i bez potpornog zida za svaki dio kosine posebno. Na temelju dijagrama uočeno je da vlažnost brže raste u modelu bez potpornog zida. Iz prikazanih dijagrama vidljiv je kasniji porast vlažnosti saniranog modela naspram modela bez gravitacijskog potpornog zida na srednjem dijelu M. Odmak porasta vlažnosti sve je veći s dubinom što jasno utječe na stabilnost kosine. U početku je prikazano kako vlažnost raste do određenog trenutka i zatim postaje horizontalna. Horizontalna linija označava da je materijal na toj dubini potpuno saturiran. Potom je nakon 60 minuta jasno vidljiv trenutak otvaranja ventila i daljnji porast vlažnosti. Dijagrami prikazuju razvoj vlažnosti u modelima i imaju slične trendove u sličnom vremenskom razdoblju. Stoga se zaključuje da je glavna uloga primjene gravitacijskog potpornog zida i zasipnog materijala iza zida u povećanju čvrstoće tla u podnožju kosine i sprječavanje erozije na kosini bez primjene dodatnih mjera sanacije.



Slika 29: Preklopljeni dijagrami vlažnosti tla na dijelu H



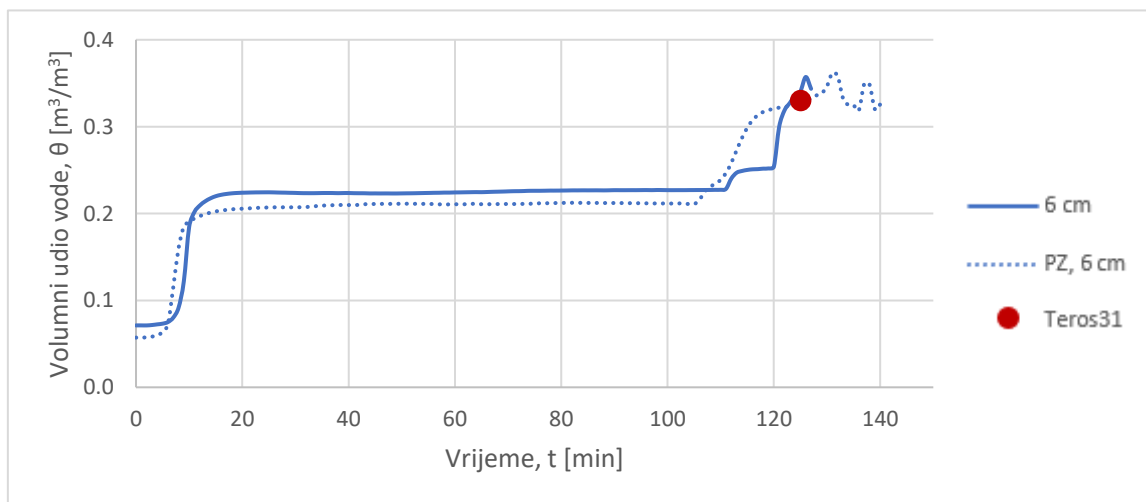
Slika 30: Preklopljeni dijagrami vlažnosti tla na dijelu M



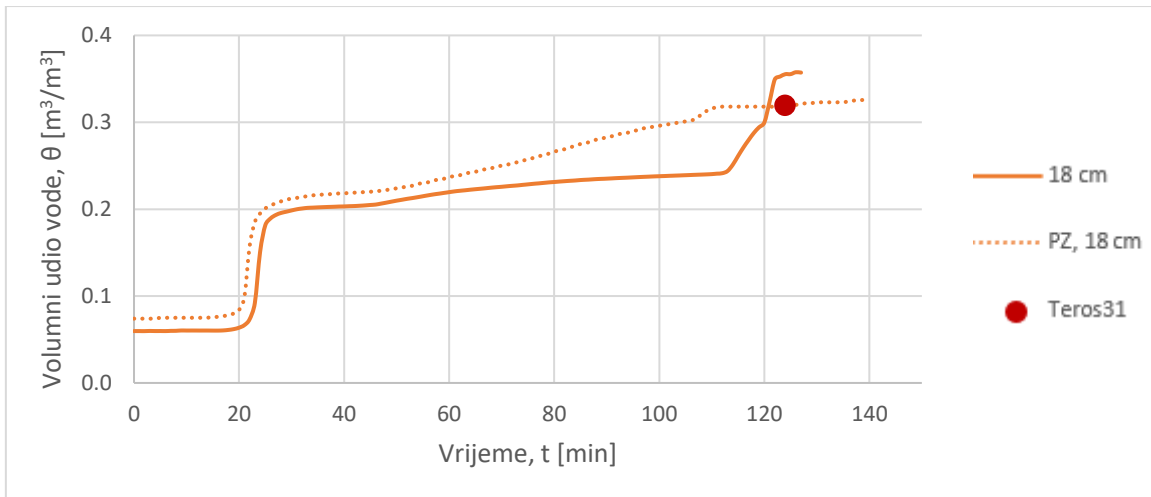
Slika 31: Preklopljeni dijagrami vlažnosti tla na dijelu L

Na sljedećim dijagramima prikaz je dijelova modela i dubina na kojima je postavljan senzor Teros31. Teros31 postavljen je samo u modelu s ugrađenim potpornim zidom. Podaci dobiveni sa senzora zapravo dokazuju u kojem trenutku se voda podignula do senzora. To bi značilo da nakon tog trenutka materijal postaje potpuno saturiran. Također, pomoću senzora se može odrediti i koja je visina vode iznad senzora s obzirom na izmjereni porni tlak u točki gdje je postavljen. U ovom radu senzori Teros31 služe kao potvrda podacima dobivenih sa senzora Teros10 i Teros12. Crvenom točkom je na dijagramima prikazan trenutak u kojemu negativan porni tlak prelazi u pozitivan porni tlak, odnosno trenutak u kojemu je porni tlak jednak nuli ($u_w = 0$).

Na gornjem dijelu H senzori su postavljeni na 6 cm i 18cm mjereno od vrha površine materijala. U 123. minuti senzor Teros31 bilježi da se razina vode dignula na 18 cm. Malo je vjerojatno da će materijal biti potpuno zasićen na 6 cm od površine iako je senzor na toj dubini zabilježio porast razine vode u 125. minuti. Najvjerojatniji događaj je da se voda procjeđivala kroz pukotine nastale pomicanjem materijala prema nožici s obzirom da je intenzitet oborine u tom trenutku bio ekstremno velik.

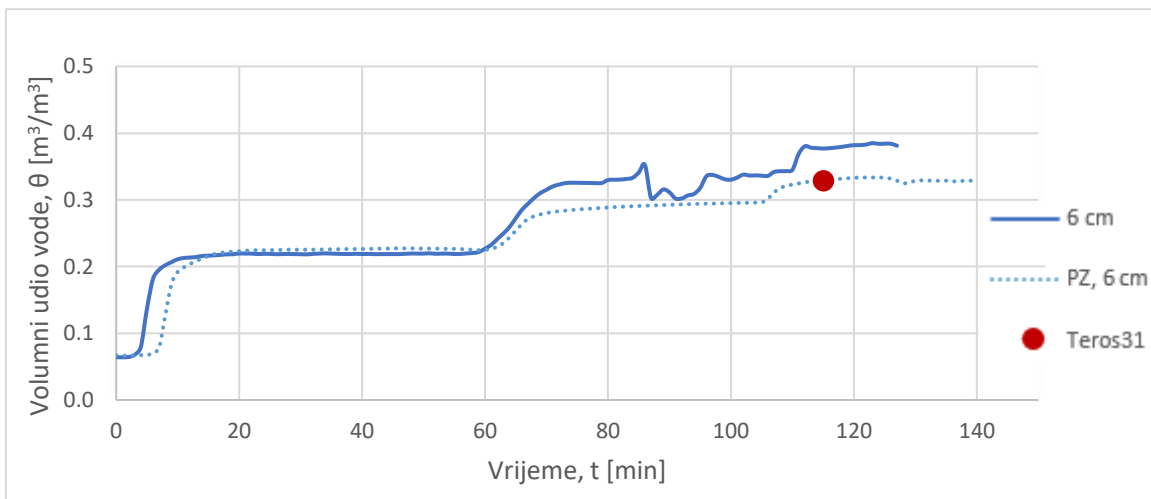


Slika 32: Trenutak potpunog zasićenja tla na 6 cm na H dijelu

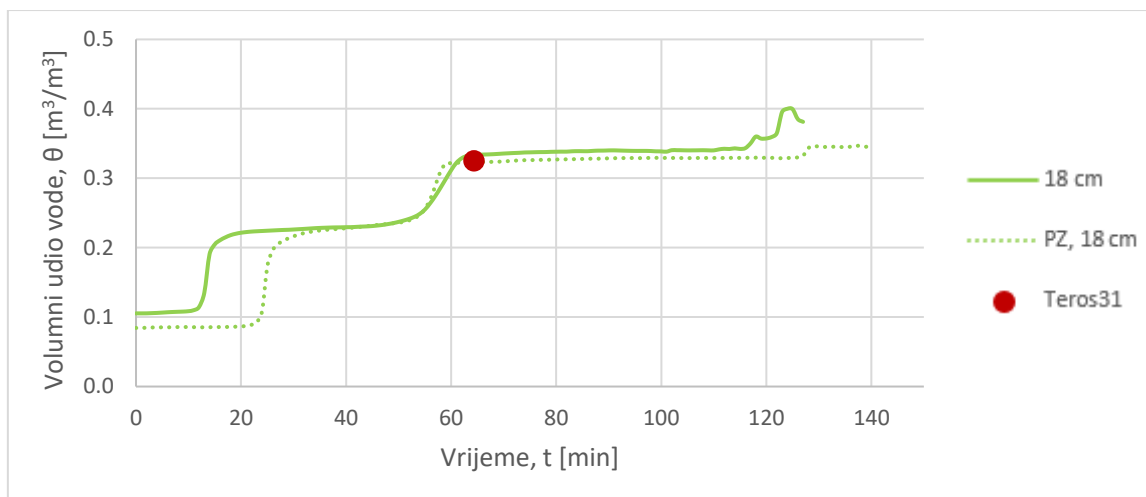


Slika 33: Trenutak potpunog zasićenja tla na 18 cm na H dijelu

Zatim je prikaz trenutaka u kojima je na dijelu M senzor prikupio podatak o potpunom zasićenju vodom. U dijelu M senzori su postavljeni na dubinama od 6 cm i 18 cm. Na 18 cm očitano je da je voda došla u 65. minuti. Teros10 je na toj dubini zabilježio konstantnu vlažnost oko 62. minute što se poklapa s podatkom sa senzora Teroso31. Na 6 cm od površine tla Teros31 je zabilježio potpuno zasićenje vodom u 115. minuti. Također kao i u prethodnom slučaju teško je moguće da se razina vode podignula tako visoko, stoga se najvjerojatnije radi o procjeđivanju velike količine vode zbog velikog intenziteta oborine.

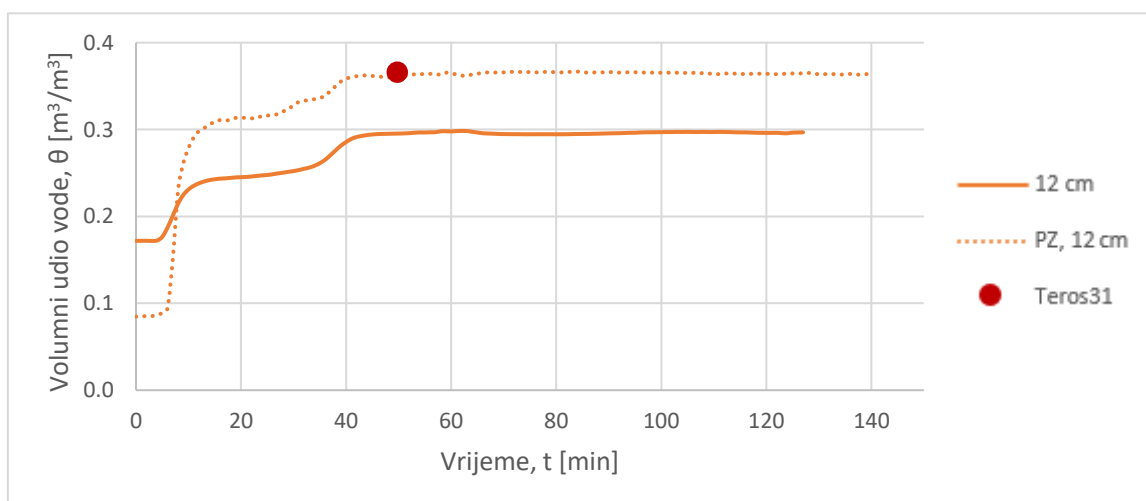


Slika 34: Trenutak potpunog zasićenja tla na 6 cm na M dijelu

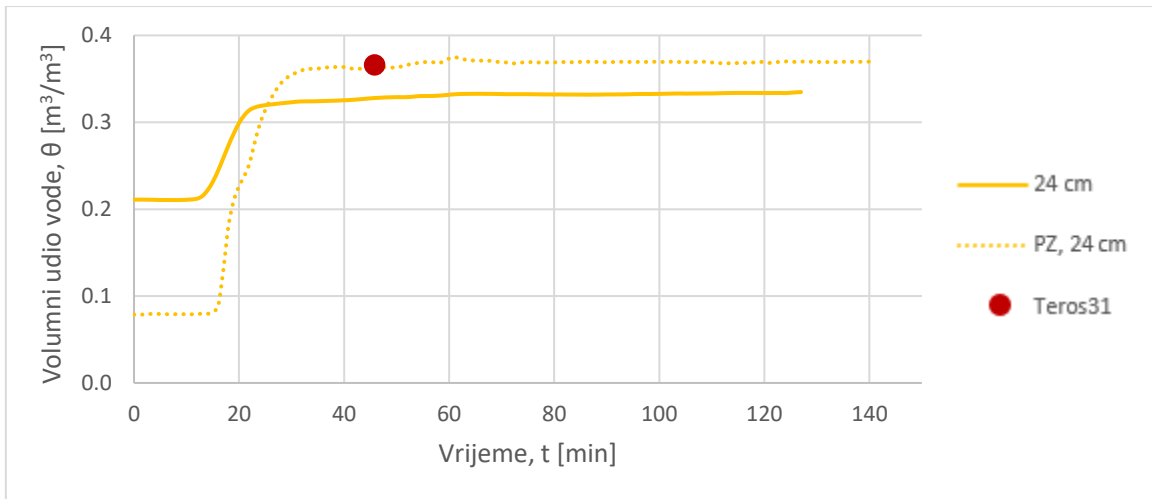


Slika 35: Trenutak potpunog zasićenja tla na 18 cm na M dijelu

Na donjem dijelu L senzori Teros31 su postavljeni na dubinama od 12 cm i 24 cm. Teros31 bilježi potpuno zasićenje vodom na dubini od 24 cm u 47. minuti. Na istoj mjernoj poziciji postavljen je i senzor Teros12 koji je zabilježio konstantnu vlažnost nakon cca 33 minute od početka ispitivanja. U ovom slučaju odstupanje je značajnije jer se radi o razlici od skoro 15 minuta. Na dubini od 12 cm senzor Teros31 bilježi porast razine vode u 52. minuti dok je očitana konstantna vlažnost sa senzora Teros12 na istoj dubini u 42. minuti. Također, radi se o odstupanju od 10-ak minuta. Iz tog razloga senzor Teros31 zapravo služi kao potvrda dobivenog podatka s drugog senzora,



Slika 36: Trenutak potpunog zasićenja tla na 12 cm na L dijelu



Slika 37: Trenutak potpunog zasićenja tla na 24 cm na L dijelu

5. ANALIZE STABILNOSTI KORIŠTENJEM PROGRAMA SLIDE2 (Rocscience Inc.)

Numeričko modeliranje provedeno je pomoću programa Slide2 (Rocscience Inc.) metodom granične ravnoteže. Prikazani su rezultati modeliranja za modele sa i bez potpornog zida. U tablici 3 su prikazani parametri za oba modela koji su korišteni za proračun zapremninske težine materijala. Poanta modeliranja je bila uhvatiti trenutak u kojem je do klizanja došlo.

Tablica 3: Parametri čistog pijeska numeričkog modela

| Parametar | Oznaka | Čisti pijesak |
|----------------------|--------|---------------|
| Specifična gustoća | Gs (/) | 2,70 |
| Inicijalni porozitet | N (/) | 0,44 |
| Stupanj saturacije | S (/) | 1 |

Prije svega potrebno je bilo izračunati zapremninsku težinu materijala. To je prvi parametar koji se unosi kao svojstvo materijala u model. Proračun je prikazan u nastavku.

$$\gamma_s = G_s * \gamma_w$$

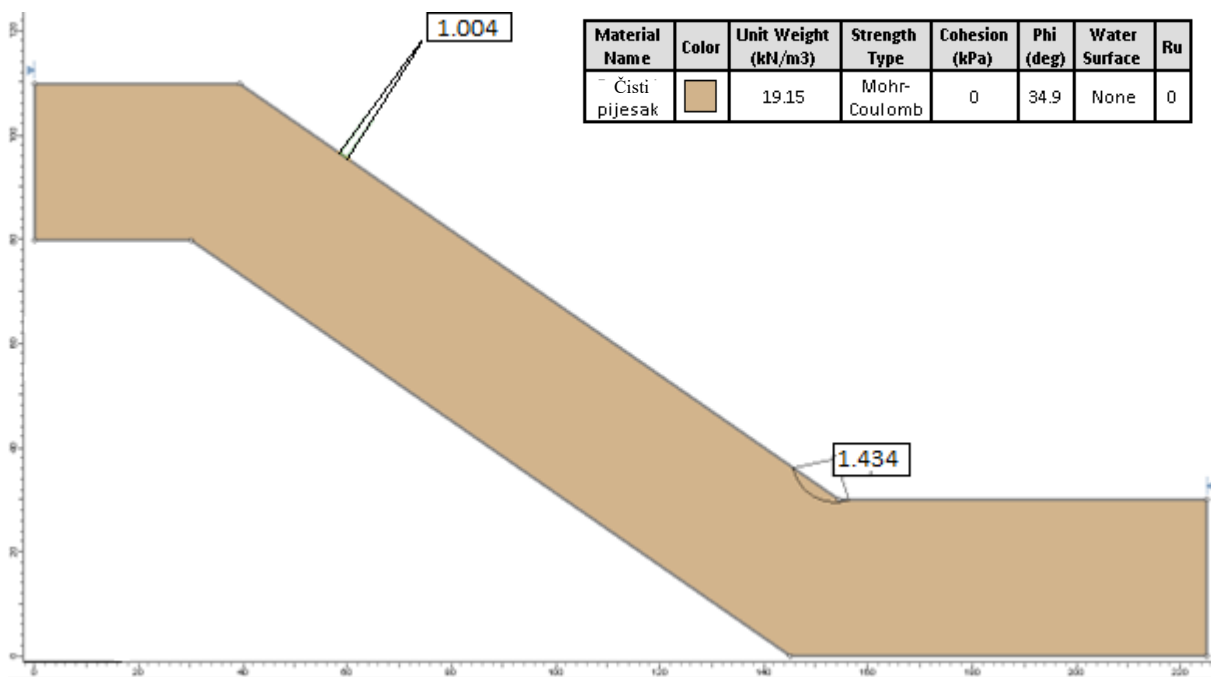
$$\gamma_s = 2,70 * 9,81 = 26,49 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma = (1 - n) * \gamma_s + n * S * \gamma_w$$

$$\gamma = (1 - 0,44) * 26,49 + 0,44 * 1 * 9,81$$

$$\gamma = 19,15 \text{ kN/m}^3$$

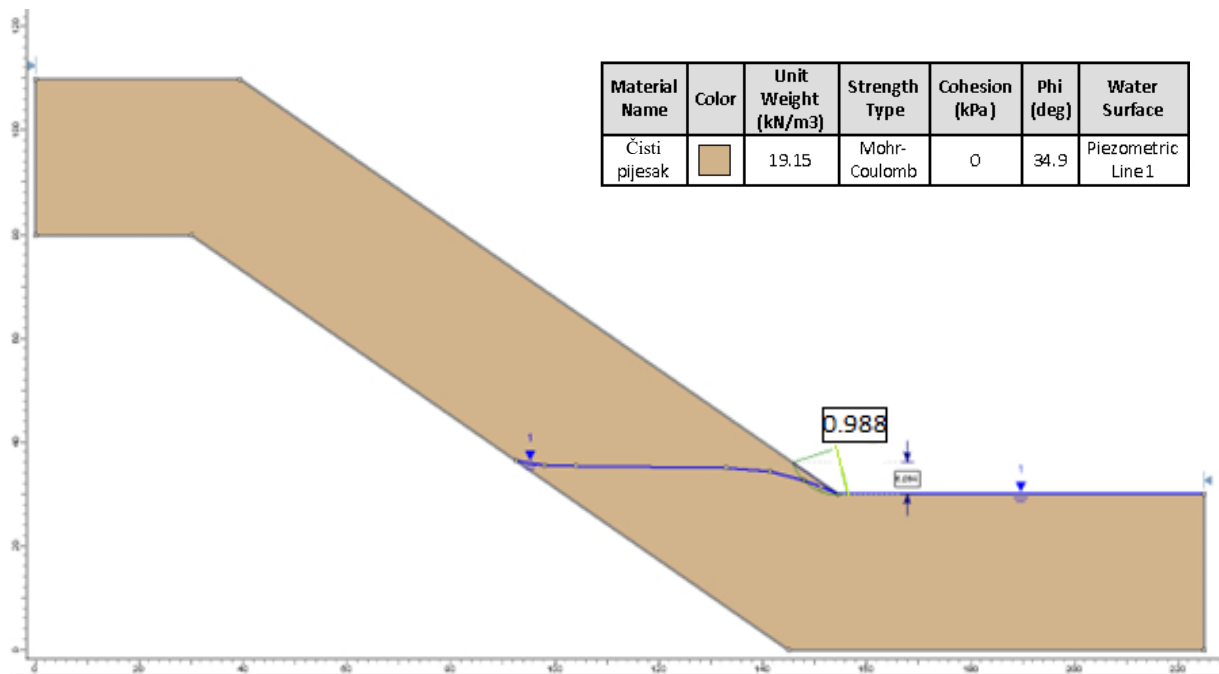
Prvi model prikazan na slici 38 prikazuje model kosine od čistog čistog pijeska u suhim uvjetima. Zbog vrlo malen razlike između kuta nagiba od 35° i kuta trenja materijala od $34,9^\circ$ duž kosine se pojavljuju plitke nestabilnosti. Dolazi do eventualnog osipavanja pijeska ili plitke erozije. Faktor sigurnosti iznosi 1,004 i na granici je nestabilnosti upravo zbog skoro iste vrijednosti kuta nagiba kosine i kuta trenja materijala. Na dnu kosine prikazana je klizna ploha koja se aktivira nakon potapanja nožice u idućem modelu. U ovom slučaju faktor sigurnosti te klizne plohe je veći od 1 – klizište je stabilno.



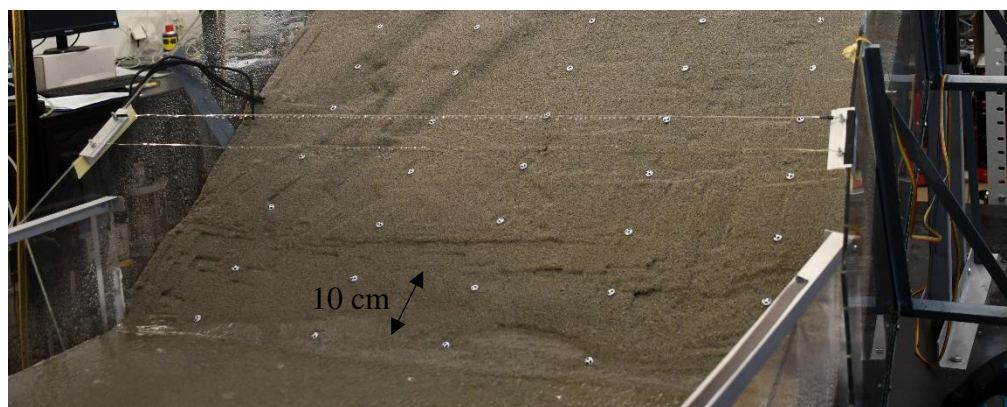
Slika 38: Kosina od čistog pijeska u suhim uvjetima

U idućem modelu promatrano je ponašanje kosine u trenutku kada je nožica kompletno potopljena, a senzor Teros10 ugrađen na 24 cm na srednjem dijelu očitava potpunu saturaciju materijala na toj dubini. Nožica je potopljena nakon cca 51 minute od početka ispitivanja. Površina podzemne vode rekonstruirana je na način prikazan na slici 39. Pomoću senzora vlažnosti Teros10 očitano je da se podzemna voda na dubini od 24 cm u srednjem dijelu podignula nakon 57 minuta od početka ispitivanja. Zabilježeno je da se prva pukotina pojavila nakon cca 70 minuta. Pomoću tih činjenica rekonstruiran je model u trenutku pojave prve pukotine. Faktor sigurnosti iznosi 0,988 – u tom trenutku

pojavi se prva pukotina. Visina na kojoj se pojavila pukotina mjerena od površine nožice klizišta iznosi oko 6 cm što otprilike odgovara visini prikazanoj na slici 40 iz laboratorija.

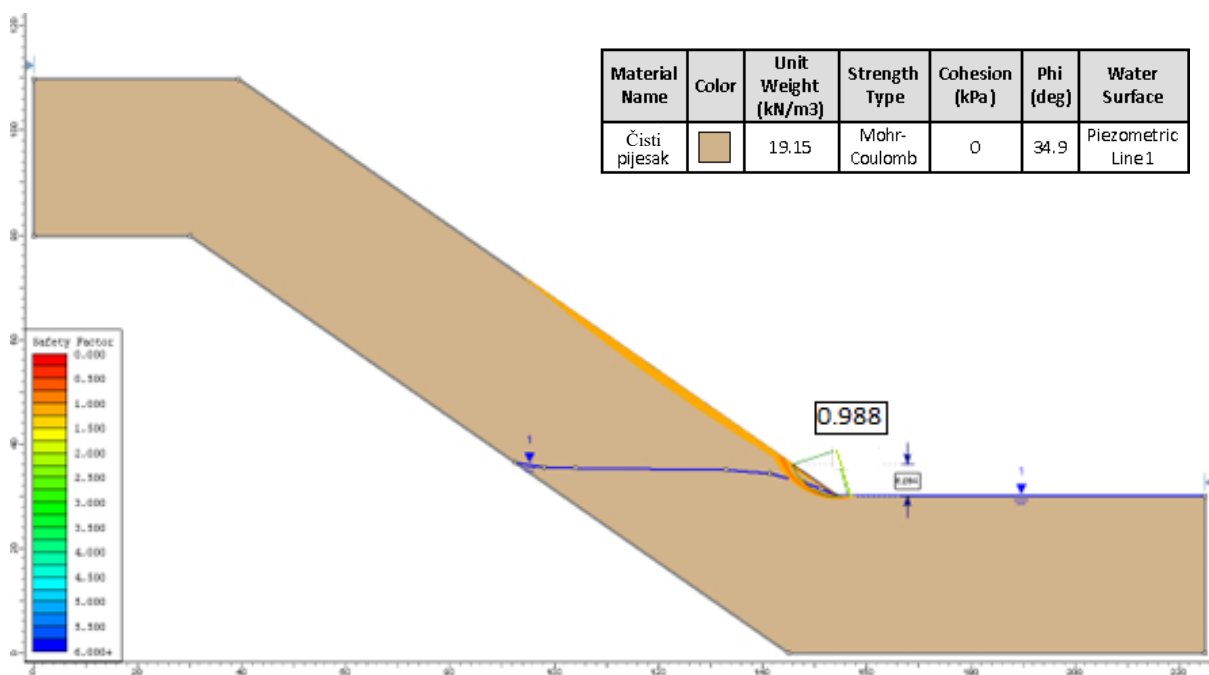


Slika 39: Klizna ploha nakon cca 70 min od početka ispitivanja



Slika 40: Veličina klizne plohe

Na idućoj slici prikazan je isti model s nekoliko kliznih ploha s najmanjim faktorom sigurnosti. Vidljivo je da se klizne plohe pomiču od dna prema vrhu kosine. Sa slike 41 je stoga primjetno da materijal koji se nalazi iznad vrha klizišta kliže prema praznini koja ostaje iza dijelova koji su kliznuli ranije pa se na taj način klizanje retrogresivno povećava. Takva distribucija aktivnosti dokazana je stvarnim modelom klizišta gdje se ista situacija dogodila. Na slici 42 je prikazano retrogresivno klizanje materijala u umanjenom modelu nakon cca 120 minuta od početka pokusa.



Slika 41: Retrogresivno klizanje



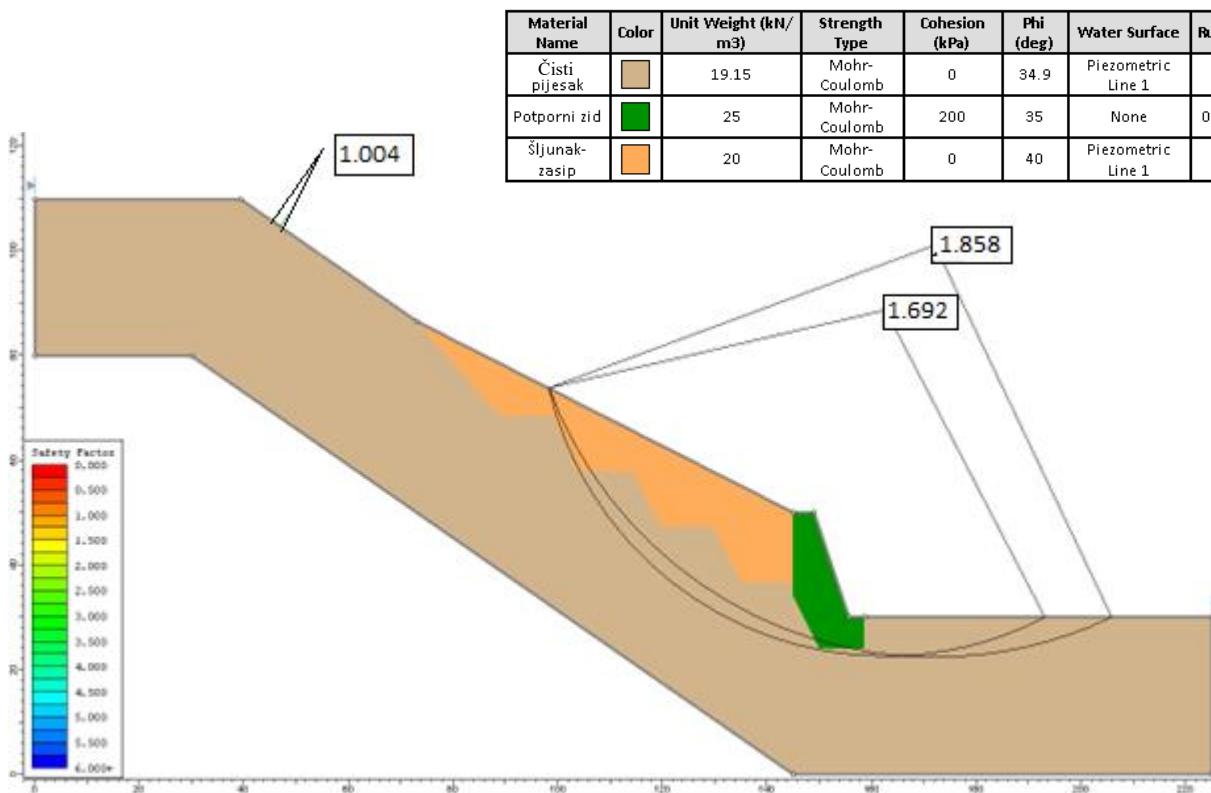
Slika 42: Retrogresivno klizanje u modelu

Idući model je model s ugrađenim potpornim zidom. Tablica s materijalnim značajkama korištenim u modeliranju je prikazana u nastavku.

Tablica 4: Materijalne značajke čistog pijeska i zasipa od šljunka u numeričkom modelu s potpornim zidom

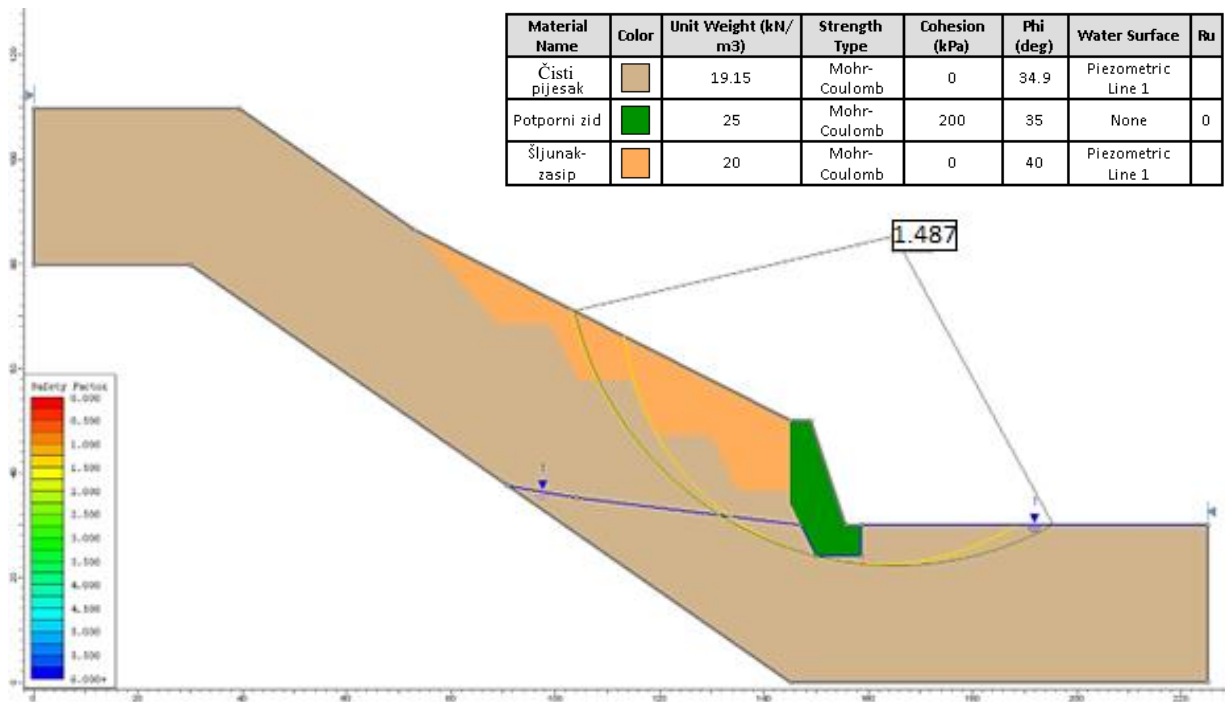
| Parametar | Oznaka | Vrijednost |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Čisti pijesak | | |
| Zapremninska težina | γ (kN/m ³) | 19,15 |
| Kohezija | c (kPa) | 0 |
| Kut trenja | Φ (°) | 34,9 |
| Zasip od šljunka | | |
| Zapremninska težina | γ (kN/m ³) | 20 |
| Kohezija | c (kPa) | 0 |
| Kut trenja | Φ (°) | 40 |

Najprije je analizirano ponašanje kosine s ugrađenim potpornim zidom u suhim uvjetima. Kao i kod modela bez potpornog zida događaju se površinska osipavanja te su klizne plohe vrlo plitke i izazivaju eventualno plitku eroziju kao što se vidi na slici 43. Faktor sigurnosti iznosi 1,004 i na granici je stabilnosti. Razlog tome je što su kut trenja materijala pijeska i nagib kosine gotovo identični. Dodatno su prikazane duboke klizne plohe koje sežu ispod potpornog zida radi usporedbe s idućim prikazanim modelom s podignutom razinom podzemne vode. Faktori sigurnosti tih kliznih ploha su veći od 1, dakle klizište je stabilno.



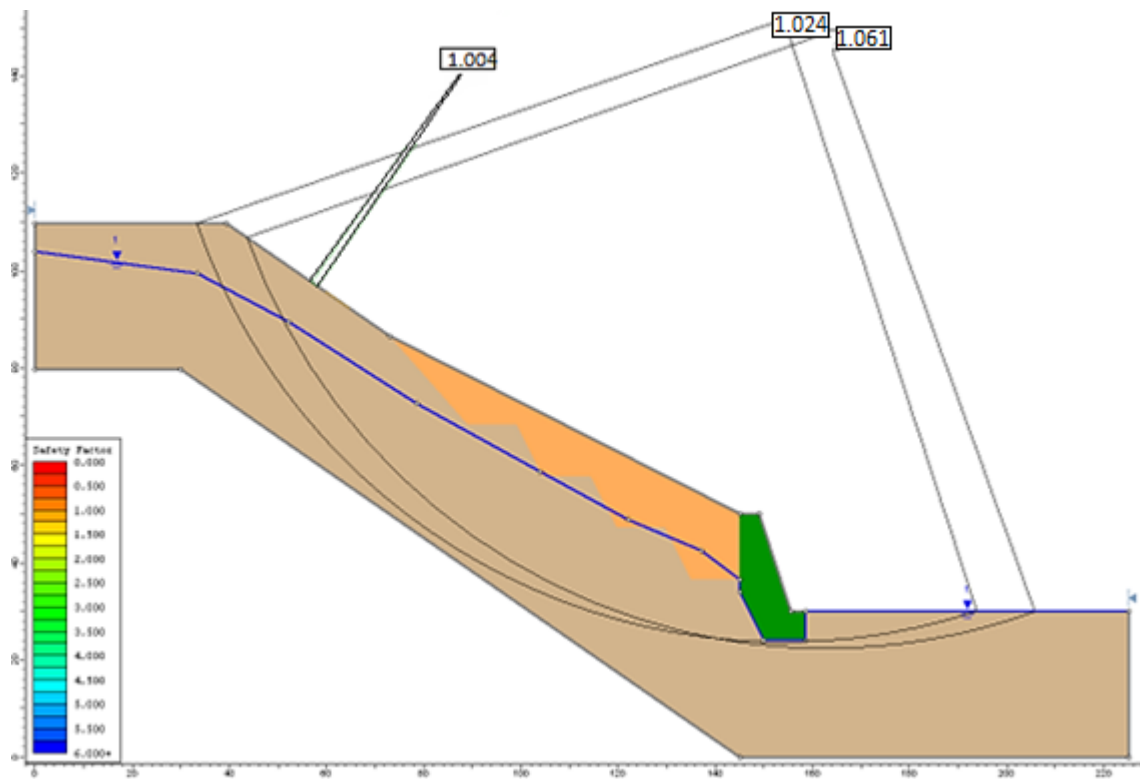
Slika 43: Model kosine s ugrađenim potpornim zidom u suhim uvjetima

Idući model prikazuje trenutak u kojemu je došlo do porasta razine podzemne vode u gotovo istom trenutku kao i kod modela bez potpornog zida. Nakon cca 52 minute od početka ispitivanja nožica klizišta je potopljena. Senzor Teros10 je zabilježio potpunu saturaciju tla na 24 cm dubine u srednjem dijelu modela oko 59 minuta od početka ispitivanja. Prema tim podacima konstruirana je razina podzemne vode na slici 44. Faktor sigurnosti iznosi 1,487, a klizna ploha prolazi duboko ispod potpornog zida. Zaključak je da je kosina stabilna u ovakvim uvjetima iako se faktor sigurnosti smanjio u odnosu na prethodne suhe uvjete.



Slika 44: Klizna ploha nakon cca 70 min od početka ispitivanja

Na kraju je ispitan još jedan numerički model nakon više od 120 minuta od početka ispitivanja. Pretpostavljena razina podzemne vode na slici 45 konstruirana je na isti način kao kod prethodnih modela. U gornjem dijelu modela senzor Teros10 upućuje na to da je tlo na 18 cm dubine saturirano nakon cca 113 minuta. Na istoj mjernoj poziciji postavljen je i senzor Teros31 koji je zabilježio promjenu negativnog poreznog tlaka u pozitivan u 123. minuti od početka ispitivanja. Iako je faktor sigurnosti u ovom slučaju na granici stabilnosti ali i dalje veći od 1, prikazane klizne plohe su relativno duboke i ukazuju na eventualnu globalnu nestabilnost.



Slika 45: Klizne plohe nakon više od 120 minuta od početka pokusa

6. ZAKLJUČAK

Glavni uzrok pokretanja klizišta u prirodi je voda. Obilne padaline i podizanje razine podzemne vode najčešći su uzroci pokretanja klizišta. Prepoznavanje uzroka i sanacija klizišta predstavljaju kompleksan problem u geotehničkom inženjerstvu.

Radom je prikazan utjecaj infiltracije i posljedično podizanje razine podzemne vode na stabilnost kosine. Ispitivanjima je dokazano da su glavni razlozi pojava nestabilnosti i razvoja klizišta potapanje nožice klizišta i visoka razina podzemne vode uslijed procjeđivanja umjetno simulirane oborine.

Važnost rezultata ispitivanja je u tome da se u umanjenom modelu klizišta zapravo simuliraju realne pojave u prirodi. Mjerenjem parametara mjernim uređajima dobiva se uvid u dešavanja u dubljim slojevima tla, a analizom rezultata mogu se kasnije u sličnim uvjetima predvidjeti ponašanja prirodne ili umjetne kosine ili samog materijala. Iz tog razloga potrebno je bilo postaviti uređaje na istim mjernim pozicijama kako bi se rezultati mjerenja mogli vjerno usporediti. Prednost modela s ugrađenim gravitacijskim zidom je u tome što je na svakom dijelu imao postavljena još po dva senzora Teros31 što nije slučaj u modelu bez mjere sanacije. Senzor Teros31 dao je precizne podatke koji su uspoređeni s podacima s istih mjernih pozicija drugih senzora. Značaj ugrađenog Teros31 senzora je da bilježi točan trenutak u kojemu je porni pritisak jednak nuli što bi značilo da se u tom trenutku razina vode podignula do senzora, odnosno prekrila senzor. Na taj način se može u svakom trenutku znati na kojoj visini je razina vode iznad senzora s obzirom na vrijednost pornog tlaka.

7. LITERATURA

- [1] Landslides investigation and mitigation, National Academy Press Washington, D.C, 1996.
- [2] Effect of Groundwater on Landslide Triggering, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, Switzerland, 2011
- [3] Nonveiller, E., Mehanika tla i temeljenje građevina, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- [4] Multilingual landslide glossary, BiTech Publishers Ltd., Richmond, B.C, Canada, 1993.
- [5] Arbanas, Ž. (2022): Tipovi i procesi nastanka nestabilnosti u kosinama, predavanje iz kolegija Stabilnost kosina, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
- [6] Fabijanić, T., Stabilnost kosina u umanjenom modelu klizišta, diplomski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Rijeci, 2021.
- [7] Landslide Modelling & Applications, Proceedings of the 5th Regional Symposium on Landslides in the Adriatic-Balkan Region, Croatian Landslide Group, 2022.
- [8] METRIC grup, Manual Web Teros10, 2018. – 2021.
- [9] METRIC grup, Manual Web Teros12, 2018. – 2021.
- [10] METRIC grup, Manual Web Teros31, 2018. – 2021.

