

# Analiza razvoja razine podzemne vode u umanjenom modelu klizišta

---

**Pil, Marijan**

**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:157:903815>

*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**

**Marijan Pil**

**Analiza razvoja razine podzemne vode u umanjenom modelu  
klizišta**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij  
Hidrotehničko inženjerstvo  
Stabilnost kosina**

**Marijan Pil  
JMBAG: 0114029856**

**Analiza razvoja razine podzemne vode u umanjenom modelu  
klizišta  
An Analysis of Ground Water Level in Small-scale Landslide Model**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2024.**

## **IZJAVA**

Diplomski rad izradio 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.

---

Marijan Pil

U Rijeci, 12.09.2024.

## ZAHVALA

*Zahvaljujem se svom mentoru, prof. dr. sc. Željku Arbanasu, na stručnom vodstvu, savjetima i prenesenom znanju kako kroz kolegije, tako i prilikom izrade ovog diplomskog rada.*

*Također se zahvaljujem komentoru, doc. dr. sc. Josipu Peraniću, na prenesenom znanju i stručnom vodstvu pri izradi ovog diplomskog rada i laboratorijskog istraživanja.*

*Posebnu zahvalnost upućujem svojoj obitelji za njihovu stalnu podršku i motivaciju, kao i svojoj zaručnici Barbari na neizmjernom razumijevanju i strpljenju tijekom mog akademskog puta.*

## **SAŽETAK**

Klizišta spadaju među najopasnije i najčešće geološke prijetnje u svijetu. Zbog složenosti ovog fenomena, cilj diplomskog rada je doprinijeti boljem razumijevanju i analizi faktora koji uzrokuju klizanje. Model klizišta je izrađen na Građevinskom fakultetu u Rijeci. Podaci prikupljeni tijekom testiranja korisni su za procjenu rizika od klizišta i odabir odgovarajućih mjera sanacije. U diplomskom radu bit će prikazani svi dobiveni rezultati ispitivanja, čime će se objasniti uzroci nestabilnosti i rad senzora korištenih u mjerenjima, u skladu s opisanim komponentama iz priručnika. Analizom promjene volumetrijske vlažnosti i pornog pritiska donijet će zaključke o procesu destabilizacije padine.

**KLJUČNE RIJEČI:** klizište, mjerenje, vlažnost, porni pritisci, model klizišta, senzor

## **ABSTRACT**

Landslides are among the most dangerous and frequent geological hazards in the world. Due to the complexity of this phenomenon, the aim of this thesis is to contribute to a better understanding and analysis of the factors that cause landslides. A landslide model was developed at the Faculty of Civil Engineering in Rijeka. The data collected during testing are useful for assessing landslide risks and selecting appropriate remediation measures. The thesis will present all the obtained test results, explaining the causes of instability and the functioning of the sensors used in the measurements, in accordance with the components described in the manual. By analyzing the changes in volumetric moisture and pore pressure, conclusions will be drawn about the process of slope destabilization.

**KEY WORDS:** landslide, measurement, humidity, pore pressures, landslide model, sensor

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KLIZIŠTA .....	3
2.1. Klasifikacija klizišta .....	4
2.1.1. Odron .....	5
2.1.2. Prevrtnje .....	6
2.1.3. Rotacijsko klizanje .....	7
2.1.4. Translacijsko klizanje .....	8
2.1.5. Bočni rasjedi .....	9
2.1.6. Tečenje tla .....	10
2.1.7. Puzanje tla .....	11
2.2. Elementi klizišta .....	12
2.3. Dimenzije klizišta .....	14
3. FIZIČKI MODEL KRLIZIŠTA .....	16
3.1. Materijal .....	19
3.2. Mjerna oprema .....	21
3.2.1. Teros 10 senzor .....	22
3.2.2. Teros 12 senzor .....	24
3.2.3. Teros 31 senzor .....	26
3.2.4. ZL-6 Data logger .....	28
3.3. Simulatori kiše .....	29
4. MATRIČNA SUKCIJA .....	31
5. ISPITIVANJE MODELA KLIZIŠTA .....	33
6. ANALIZA REZULTATA .....	37
7. REKONSTRUKCIJA RAZVOJA RAZINE PODZEMNE VODE U UMANJENOM MODELU KLIZIŠTA .....	44
8. ZAKLJUČAK .....	51
9. LITERATURA .....	53



## POPIS SLIKA

Slika 1: Shematski prikaz odrona [2].....	5
Slika 2: Shematski prikaz prevrtanja [2] .....	6
Slika 3: Shematski prikaz rotacijskog klizanja [2] .....	7
Slika 4: Shematski prikaz translacijskog klizanja [2] .....	8
Slika 5: Shematski prikaz bočnih rasjeda [2].....	9
Slika 6: Shematski prikaz tečenja tla [2].....	10
Slika 7: Shematski prikaz puzanja kosine [2] .....	11
Slika 8: Shematski prikaz elemenata klizišta [6].....	12
Slika 9: Shematski prikaz dimenzija klizišta [6] .....	15
Slika 10: Fizički model kosine .....	18
Slika 11: Granulacijska krivulja Dravskog pijeska [5] .....	20
Slika 12: Senzor Teros 10.....	22
Slika 13: Dimenzije i volumen utjecaja senzora Teros 10 .....	23
Slika 14: Senzor Teros 12.....	24
Slika 15: Senzor Teros 31.....	26
Slika 16: Shematski prikaz pozicija ugrađenih senzora .....	27
Slika 17: Ugrađeni senzori u gornjoj (H) zoni.....	28
Slika 18: Mlaznice na simulatoru kiše .....	30
Slika 19: Prikaz kapilarnih sila vode i zraka između čestica tla [13] .....	32
Slika 20: Model prije početka ispitivanja .....	33
Slika 21: Model prije i nakon ispitivanja; (a); prije ispitivanja; (b) nakon ispitivanja .....	34
Slika 22: Prikaz napredovanja sloma; (a) 74. minuta ispitivanja; (b) 78. minuta ispitivanja; (c) 79. minuta ispitivanja; (d) 101. minuta ispitivanja .....	35
Slika 23: Temperatura tla u donjoj (L) zoni modela.....	37
Slika 24: Volumni sadržaj vode u donjoj (L) zoni modela.....	38
Slika 25: Volumni sadržaj vode na dubini 24 cm u svim zonama.....	39
Slika 26: Volumni sadržaj vode i porni pritisak u srednjoj (M) zoni modela .....	41
Slika 27: Volumni sadržaj vode i matrični potencijal u gornjoj (H) zoni modela... ..	42
Slika 28: Volumni sadržaj vode i matrični potencijal u donjoj (L) zoni modela ....	43

Slika 29: Distribucija pornih pritisaka i stupnja saturacije u nesaturiranom i saturiranom tlu [14] .....	44
Slika 30: Rekonstrukcija podzemne vode u modelu.....	47
Slika 31: Prikaz modela prilikom ispitivanja: (a) nakon 30 minuta, (b) nakon 76 minuta, (c) nakon 100 minuta, (d) nakon 145 minuta.....	48
Slika 32: Bočni prikaz sloma kosine.....	49
Slika 33: Napredovanje sloma kosine .....	50

## **POPIS TABLICA**

Tablica 1: Karakteristike zakona sličnosti .....	17
Tablica 2: Značajke materijala, Dravski pijesak [5] .....	20
Tablica 3: Usporedba senzora Teros 12 i Teros 10 [8],[9] .....	25
Tablica 4: Tehničke karakteristike mlaznica simulatora kiše [5] .....	29
Tablica 5: Tablica mjerenja senzora u određenom intervalu .....	46

## 1. UVOD

Stabilnost kosina predstavlja jedan od ključnih aspekata u geotehničkom inženjerstvu. Klizište je jedno od najčešćih i najrazornijih geoloških opasnosti. Pojava stalnih klimatskih promjena koje djeluju na učestalost i intenzitet meteoroloških ekstrema usko se veže sa učestalijom i većom magnitudom klizišta. U vremenu kada su klimatske promjene sve izraženije, što rezultira učestalijim i intenzivnijim padavinama, razumjevanje hidrauličkih mehanizama koji utječu na stabilnost kosina postaje imperativ.

Cilj ovog istraživanja na umanjenom modelu klizišta je približiti ozbiljnost povećanja intenziteta oborina dobivene klimatskim promjenama te staviti poseban naglasak na procese infiltracije vode, promjene površnih pritisa, vlaženje tla te samim time i hidro-mehaničke odgovore tla. Mnogi znanstvenici naglašavaju potrebu za bržom primjenom novih saznanja u inženjerskoj praksi, jer se jaz između suvremenog znanja i prakse i dalje širi. Brojni faktori doprinose složenosti procesa klizanja tla, među kojima su najvažniji složena geološka struktura i nehomogenost materijala od kojih su padine sastavljene, varijabilnost materijalnih svojstava s dubinom geotehničkog profila, promjene razine podzemne vode, kao i složeni hidrogeološki uvjeti na promatranoj lokaciji. Dodatno, interakcija između površinskog sloja padine i atmosfere, koja može uključivati procese poput infiltracije padavina, površinskog oticanja, isparavanja i transpiracije, značajno utiče na stabilnost kosina.

U ovom radu ispitivanje se provodi na umanjenom modelu klizišta. Kako bi se shvatila važnost i problematika stabilnosti kosina, neizbježno je imati osnovno znanje o klizištima. Stoga su u ovom radu objašnjeni ključni pojmovi vezani za klizišta, uključujući elemente klizišta, dimenziju te klasifikaciju.

Klizište je simulirano umjetnom kišom u kontroliranim uvjetima. U fizički model ugrađen je čisti Dravski pijesak pod nagibom kosine od 35°. Tijekom pokusa opažaju se te bilježe promjene vlažnosti i površnih pritisa putem senzora ugrađenih u materijal klizišta, a bilježi ih data logger. Pomoću odgovarajućih senzora i druge opreme za praćenje ponašanja kosina, moguće je prikupiti

visokokvalitetne podatke koji se mogu koristiti samostalno ili u kombinaciji s numeričkim modelima. Podaci dobiveni iz posebno osmišljenih eksperimenata također mogu poslužiti za validaciju različitih analitičkih rješenja. Jednako važno je vizualno praćenje ponašanja modela te bilježiti trenutke poput potapanja nožice klizišta, prvih pomaka te sloma modela klizišta odnosno pojave pukotina. U radu je opisan cjelokupan proces istraživanja. Opisan je korišteni fizički model, korišteni materijal te mjerna oprema i njihove karakteristike. Obradom podataka sa senzora ugrađenih u model omogućava se praćenje sadržaja vode u tlu i tlaku vode u porama materijala. Obradom podataka analiziran je utjecaj simulirane oborine na kosinu. Posebna pozornost posvećena je promjeni pornih pritisaka te promjeni volumetrijske vlažnosti tla.

## 2. KLIZIŠTA

Klizišta su geološki procesi koji uključuju pomicanje tla, stijena ili drugih zemljanih materijala niz padinu pod utjecajem gravitacije. Ova pojava može imati ozbiljne posljedice na okoliš, infrastrukturu i ljudske živote. Klizišta se mogu pojaviti iznenada ili se razvijati polako tijekom vremena, a njihova učestalost i intenzitet često su povezani s prirodnim čimbenicima kao što su padaline, seizmička aktivnost i erozija, kao i ljudskim aktivnostima poput povećanja drvne industrije te samim time povećanim rušenjem stabala i šuma, urbanizacija i rudarstvo. 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 poramasmanjuje čvrstoću tla na smicanje što može dovesti do sloma kosine [1].

Iznenadujuća je činjenica da se klizišta mogu dogoditi bilo gdje u svijetu. Tradicionalno stajalište je da su klizišta ograničena samo na ekstremno strme padine. Većina zemalja na svijetu je na neki način pogođena klizištima. Razlog za tako široku geografsku pokrivenost ima veze sa puno različitih mehanizama pokretanja klizišta. Prekomjerne oborine, potresi, vulkani, šumski požari, a u novije vrijeme i određene opasne ljudske aktivnosti samo su neki od ključnih uzroka koji mogu pokrenuti klizišta [2].

Ako je posmična čvrstoća veća od posmičnog naprezanja, tlo na padini će biti stabilno. Međutim, kada posmična naprezanja premaše posmičnu čvrstoću zbog nekog poremećaja koji naruši prirodnu ravnotežu, dolazi do urušavanja tla i klizanja na tom području. U prirodi su strmije padine građene od materijala veće čvrstoće, kao što su pijesak, šljunak i sipari, dok su padine od glinovitih i prašinih materijala manje strme. Da bi se odredili uvjeti i mjere za trajnu stabilnost određenog područja, potrebno je kontinuirano proučavati stabilnost padina [3].

Kao što je rečeno, klizište je gibanje kamenja, zemlje ili oba materijala niz padinu koje se događa na plohi sloma, bilo da je ona zakrivljena, rotacijska ili ravna, translacijska pukotina pri čemu se velik dio materijala često kreće kao koherentna ili polukoherentna masa s malo unutarnje deformacije. Treba

napomenuti da u nekim slučajevima odroni mogu uključivati i druge vrste gibanja, bilo na početku sloma ili kasnije, ako se svojstva materijala promijene dok se pomaknuti materijal kreće niz padinu. Ključno je razumjeti karakteristike i specifičnosti našeg područja kako bi se na vrijeme moglo planirati i usvajati odgovarajuće mjere za smanjenje gubitaka i štete nastale pokretanjem klizišta. Vrsta odrona će odrediti potencijalnu brzinu kretanja, vjerojatni volumen pomaka, udaljenost do koje će se materijal kretati, kao i moguće učinke odrona i odgovarajuće mjere ublažavanja koje treba razmotriti [4].

## **2.1. Klasifikacija klizišta**

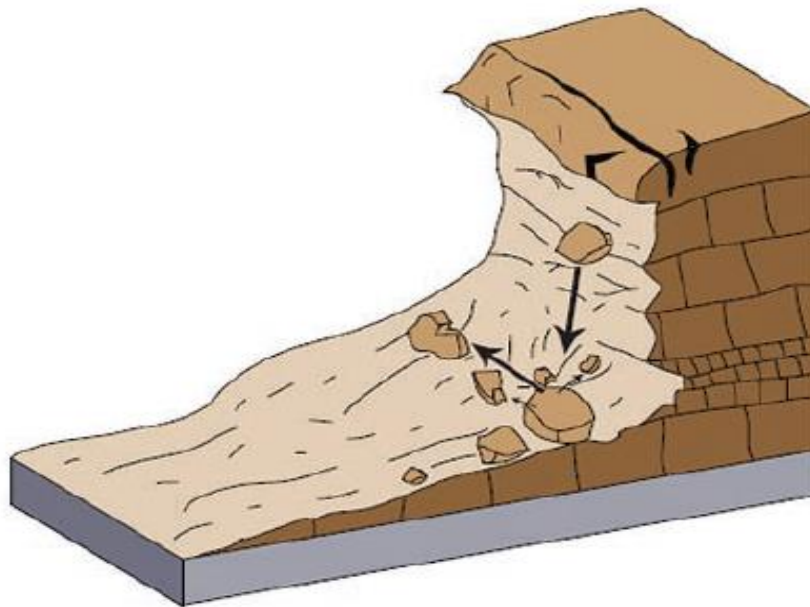
Klasifikacije su ključne za razumijevanje različitih tipova nestabilnosti klizišta, uzroka njihovih nestabilnosti te dinamike klizišta. Ovisno o vrsti klizišta, određene karakteristike su odgovorne za nestabilnost, stoga postoji puno različitih klasifikacija klizišta. Većina klasifikacija temelji se na kriterijima kao što su vrsta materijala, vrsta kretanja, brzina kretanja, geometrija područja, zemljopisni položaj, uzroci, starost, stupanj razvijenosti, stupanj poremećenosti raseljene mase i stanje aktivnosti [1].

Osnovna klasifikacija klizišta najčešće se koristi po Davidu J. Varnesu (1978). Varnes je odredio pet osnovnih nestabilnosti, a to su odron, prevrtanje, klizanje, širenje tla i tečenje tla. Ovo poglavlje sadrži opise i ilustracije različitih vrsta klizišta. Važno je razumijevanje karakteristika klizišta kako bi se moglo pravovremeno reagirati te razmotriti, planirati i usvojiti odgovarajuće mjere stabilizacije ili sanacije opasnosti. Vrsta klizišta odrediti će potencijalnu brzinu kretanja, potencijalni volumen pomaka, udaljenost pomaka kao i odgovarajuće mjere ublažavanja koje treba razmotriti [2].

### 2.1.1. Odron

Odron počinje odvajanjem zemlje ili kamenja, ili oboje, sa strme padine duž površine na kojoj se dogodio mali ili nikakav smični pomak. Materijal potom uglavnom pada, odbija se ili kotrlja. Odronjena masa može se slomiti pri udaru ili se nastaviti kotrljati u cjelini niz padinu dok se ne zaustavi. Odroni su uobičajeni diljem svijeta na strmim ili vertikalnim padinama, također u obalnim područjima i uz stjenovite obale rijeka i potoka. Slom nastupa vrlo brzo: slobodno padanje, odbijanje i kotrljanje odvojene zemlje, stijena i gromada.

Za prevenciju odrona mogu se koristiti stijenske zavjese odnosno čelične mreže, zidovi za zadržavanje kako bi se spriječilo kotrljanje ili odbijanje, eksplozivno miniranje opasnih područja radi uklanjanja izvora opasnosti. Također, korištenje stijenskih vijaka ili drugih sličnih vrsta sidrenja za stabilizaciju litica, kao i uklanjanje slobodnih stijena. Preporučuju se znakovi upozorenja u opasnim područjima za povećanje svijesti. Treba se upozoriti protiv zaustavljanja ili parkiranja ispod opasnih litica [2].



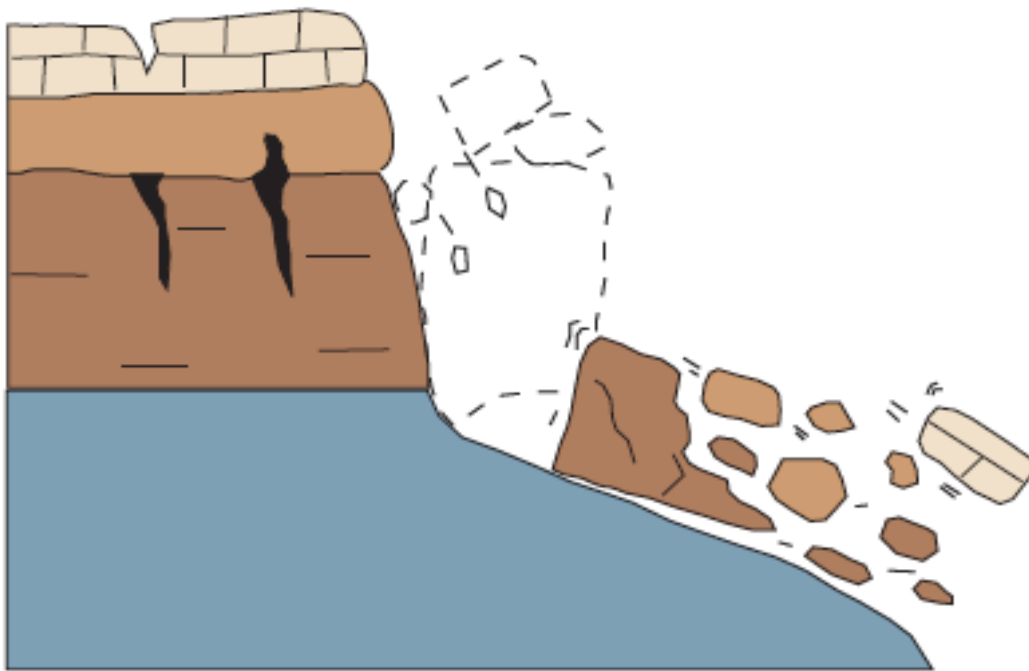
Slika 1: Shematski prikaz odrona [2]



### 2.1.2. Prevrtnanje

Prevrtnanje se prepoznaje kao prednje rotiranje mase zemlje ili kamenja iz padine oko točke ili osi ispod središta gravitacije pomaknutog materijala. Prevrtnanje može pokrenuti gravitacija koja djeluje težinom materijala iznad pomaknutog materijala, a može biti i uzrokovano vodom ili ledom u pukotinama u stijenskoj masi. Slom može nastupiti izuzetno sporo do izuzetno brzo, ponekad ubrzavajući tijekom kretanja ovisno o prijeđenoj udaljenosti.

Postoji puno različitih opcija za stabilizaciju područja sklonih prevrtanju. Neki od primjera ojačanja tih padina uključuju stijenske vijke te mehanička i druga sidra. Također, prodiranje vode je čimbenik koji doprinosi nestabilnosti, pa bi kao jednu od metoda stabilizacije bila i odvodnja [2].

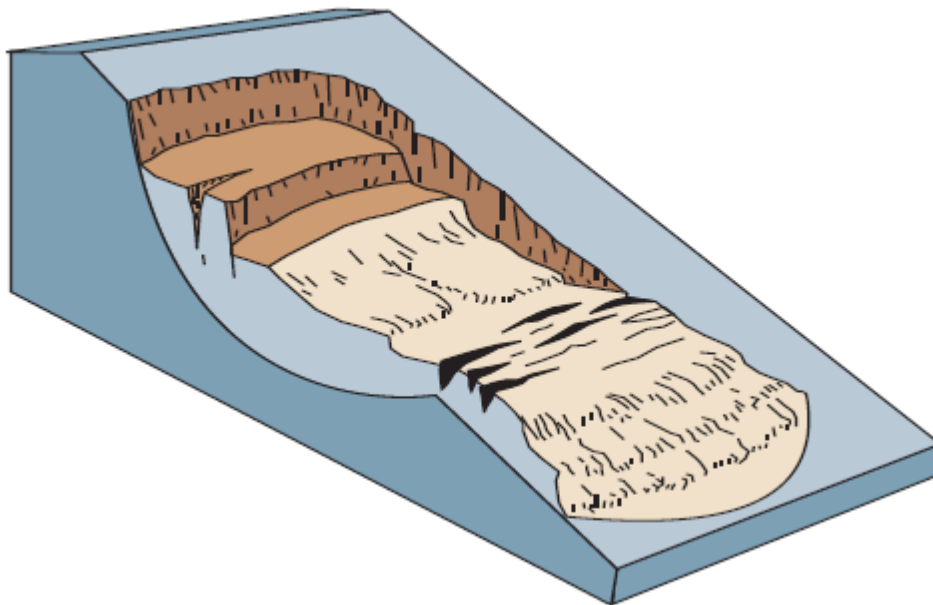


Slika 2: Shematski prikaz prevrtanja [2]

### 2.1.3. Rotacijsko klizanje

Klizište kod kojeg je površina puknuća zakrivljena prema gore, a kretanje klizišta je više ili manje rotacijsko oko osi koja je paralelna s konturom padine. Pomaknuta masa može se, pod određenim okolnostima, kretati kao relativno koherentna masa duž plohe sloma s malo unutarnje deformacije. Gornji dio pomaknutog materijala može se gotovo okomito spustiti prema dolje, dok se gornja površina pomaknutog materijala može nagnuti unatrag prema odsjeku.

Slom može nastupiti izuzetno sporo (manje od 0,3 metra unutar 5 godina) do umjereno brzo (1,5 metara mjesečno) do brzo. Ispravno niveliranje i projektiranje padina, gdje je moguće, značajno će smanjiti opasnost. Izgradnja potpornih zidova na dnu padine može biti učinkovita za usporavanje ili preusmjeravanje pokrenute mase, međutim, klizište može nadmašiti takve potporne strukture unatoč dobroj izgradnji. Veliki volumen pomaknutog materijala teško je trajno stabilizirati [2].

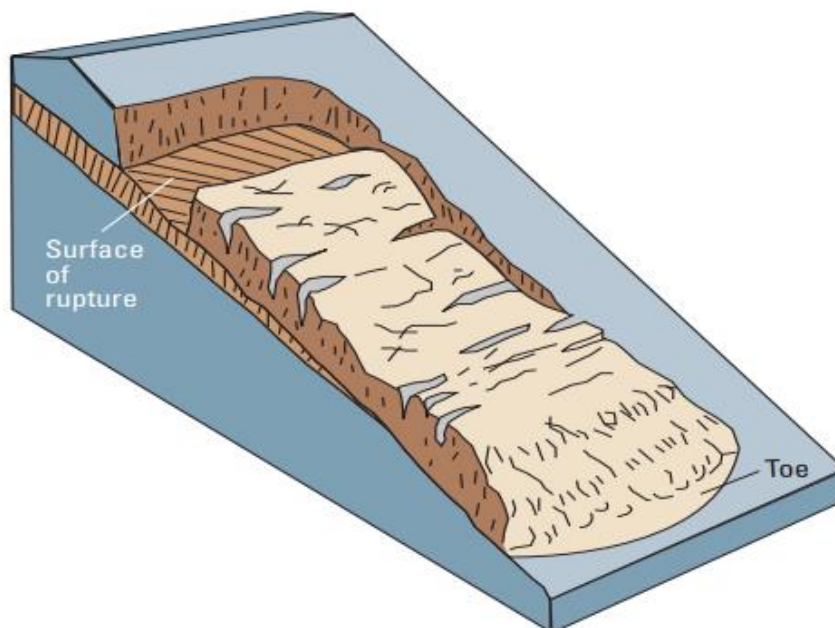


Slika 3: Shematski prikaz rotacijskog klizanja [2]

#### 2.1.4. Translacijsko klizanje

Masa u translacijskom klizištu se kreće niz kosinu duž relativno ravne površine, uz malo rotacijskog kretanja ili nagnjanja unazad. Ova vrsta klizišta može napredovati na znatne udaljenosti ako je površina pukotine dovoljno nagnuta, za razliku od rotacionih klizišta, koja imaju tendenciju da vraćaju klizište u ravnotežu. Materijal u klizištu može se kretati od rastresitih, nekoherentnih tla do velikih ploča stijena, ili kombinacije oba. Translacijska klizišta obično se javljaju duž geoloških diskontinuiteta kao što su rasjedi, pukotine, slojevi stijena ili kontakt između stijene i tla. Kretanje može u početku biti sporo (do 1.5 metra mjesečno), ali moguće su umjerene brzine (1.5 metara dnevno) do izuzetno brzo. S povećanjem brzine, masa klizišta kod translacijskih pomaka može se raspasti i razviti u blatni tok.

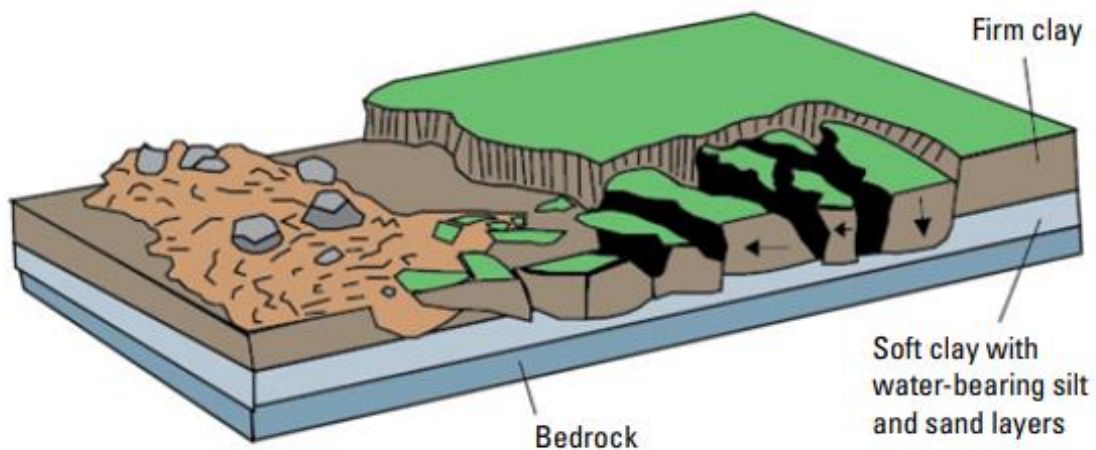
Translacijska klizišta na umjerenim do strmim padinama vrlo je teško trajno stabilizirati. Adekvatna drenaža je nužna za sprječavanje klizišta ili u slučaju postojećeg klizišta, za sprječavanje ponovnog aktiviranja pokreta [2].



Slika 4: Shematski prikaz translacijskog klizanja [2]

### 2.1.5. Bočni rasjedi

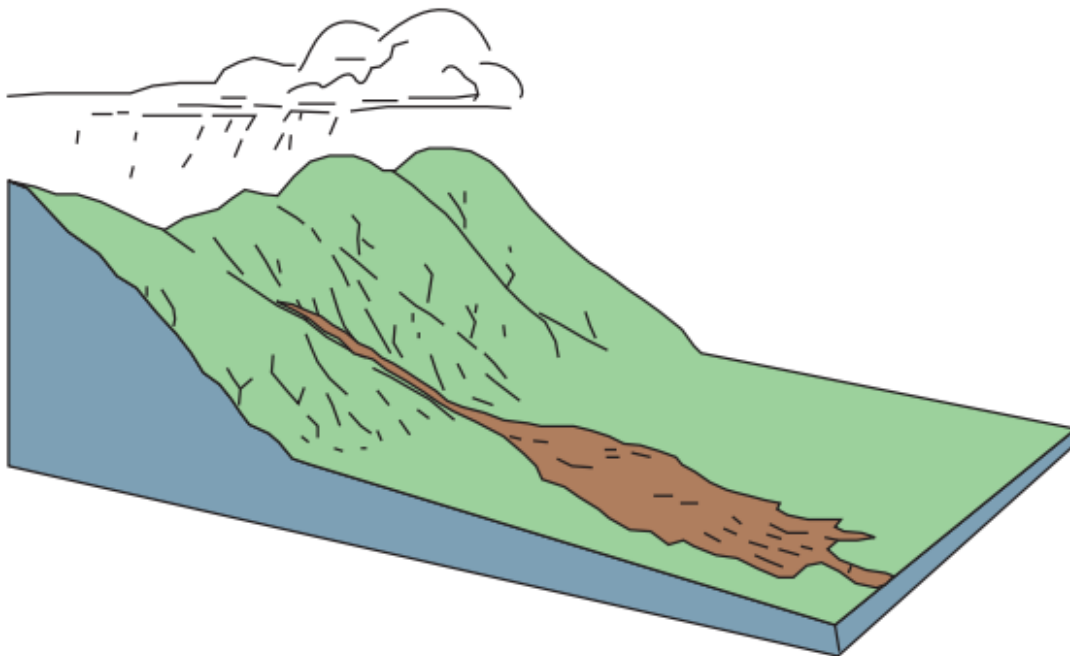
Bočni rasjedi obično se javljaju na vrlo blagim padinama ili na uglavnom ravnom terenu, osobito kada jači gornji sloj stijene ili tla prolazi kroz istežanje i pomiče se iznad donjeg, mekšeg i slabijeg sloja. Takvi pomaci često su praćeni općim slijeganjem u slabiju podlogu. Kod rasjeda u stijenama, čvrsto tlo se širi i puca, polako se udaljavajući od stabilnog tla i pomiče se preko slabijeg sloja, bez nužnog stvaranja prepoznatljive površine pukotine. Mekši, slabiji sloj može se, pod određenim uvjetima, stisnuti prema gore u pukotine koje dijele sloj koji se širi na blokove. Kod rasjeda u tlu, gornji stabilni sloj se širi duž slabijeg donjeg sloja koji je prostrujao nakon likvifikacije ili plastične deformacije. Ako je slabiji sloj relativno dubok, nadvišeni raspucani blokovi mogu se slijegati u njega, prevoditi, rotirati, raspadati, likvifirati ili čak teći [2].



Slika 5: Shematski prikaz bočnih rasjeda [2]

### 2.1.6. Tečenje tla

Oblik brzog pomicanja mase u kojem se rastresito tlo, stijene i ponekad organska materija miješaju s vodom stvarajući mulj koji teče niz padinu. Ova pojava se neformalno naziva "blatnim klizištima" zbog velike količine sitnog materijala koji može biti prisutan u toku. Ponekad, kada rotacijsko ili translacijsko klizište dobije na brzini i unutarnja masa izgubi koheziju ili dobije dodatnu vodu, može se razviti u tok. Suhi tokovi mogu se ponekad dogoditi u nekoherentnom pijesku. Tokovi erozije mogu biti smrtonosni jer mogu biti izuzetno brzi i dogoditi se bez ikakvog upozorenja. Mogu pomicati objekte veličine kuća u svom toku niz padinu ili mogu brzo ispuniti strukture akumulacijom sedimenta i organskog materijala. Također, mogu utjecati na kvalitetu vode taloženjem velikih količina mulja i otpada [2].

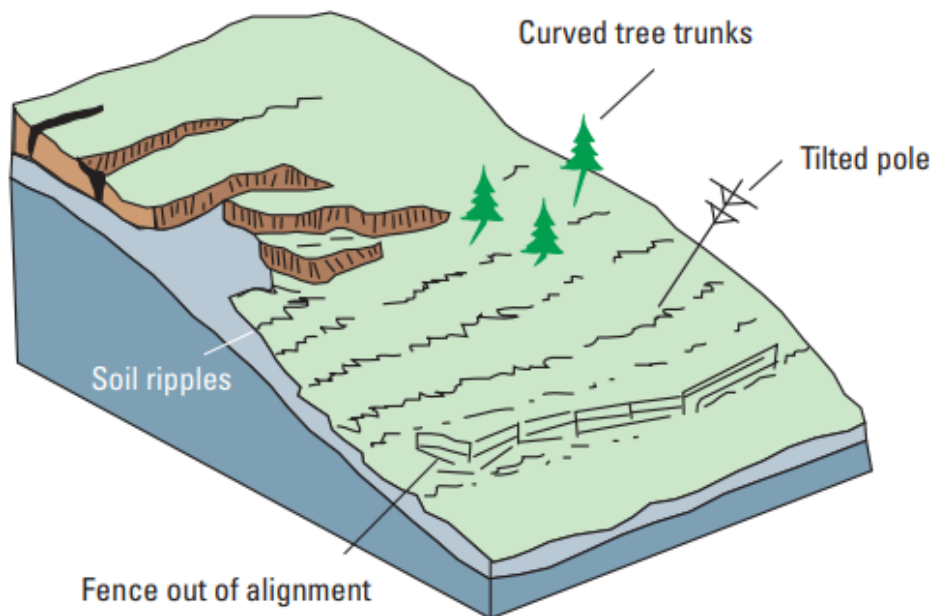


Slika 6: Shematski prikaz tečenja tla [2]

### 2.1.7. Puzanje tla

Puzanje je neformalni naziv za sporo pomicanje tla i stijena koje čine padine. To se odnosi na gotovo neprimjetno, stalno kretanje tla ili stijena prema dolje. Kretanje uzrokuje unutarnje posmično naprezanje koje je dovoljno za deformaciju, ali ne i za potpuni slom. Puzanje se odvija iznimno sporo, po nekoliko metara unutar desetljeća. Zbog sporog kretanja, puzanje je ponekad teško uočiti i stoga se može zanemariti prilikom procjene prikladnosti gradilišta.

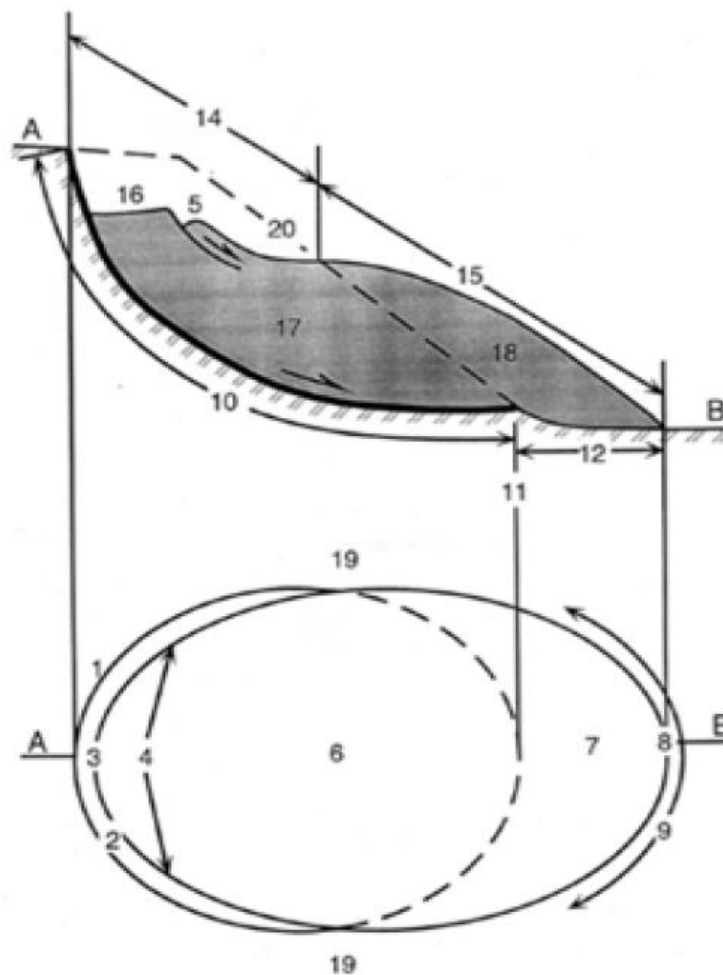
Puzanje može polako razdvojiti cijevi, zgrade, ceste, ograde i slične strukture, te može dovesti do ozbiljnijih i bržih slomova, koji su destruktivniji. Najčešća mjera za ublažavanje puzanja je osiguranje pravilne drenaže vode. Također se mogu pokušati modifikacije padine, kao što su izravnavanje ili uklanjanje cijelog ili dijela mase klizišta, te izgradnja potpornih zidova [2].



Slika 7: Shematski prikaz puzanja kosine [2]

## 2.2. Elementi klizišta

Slika 8 prikazuje shematski prikaz elemenata klizišta. Elementi klizišta predstavljaju specifične zone unutar područja klizanja, koje zajedno opisuju cjelokupni proces klizanja tla ili stijena niz padinu. Među glavnim dijelovima klizišta su kruna, koja označava gornji rub klizne površine, te glavna vlačna pukotina, koja se obično pojavljuje iza krune i ukazuje na početak odvajanja mase tla. Vrh klizišta je najviša točka pomaknute mase, dok se niže nalaze tijelo klizišta, gdje se materijal aktivno pomiče, i nožni dio, koji se taloži na dnu padine. Ovi dijelovi pomažu u identifikaciji dinamike i razmjera klizišta te su ključni za razumijevanje njegovog razvoja i utjecaja na okolinu.



Slika 8: Shematski prikaz elemenata klizišta [6]

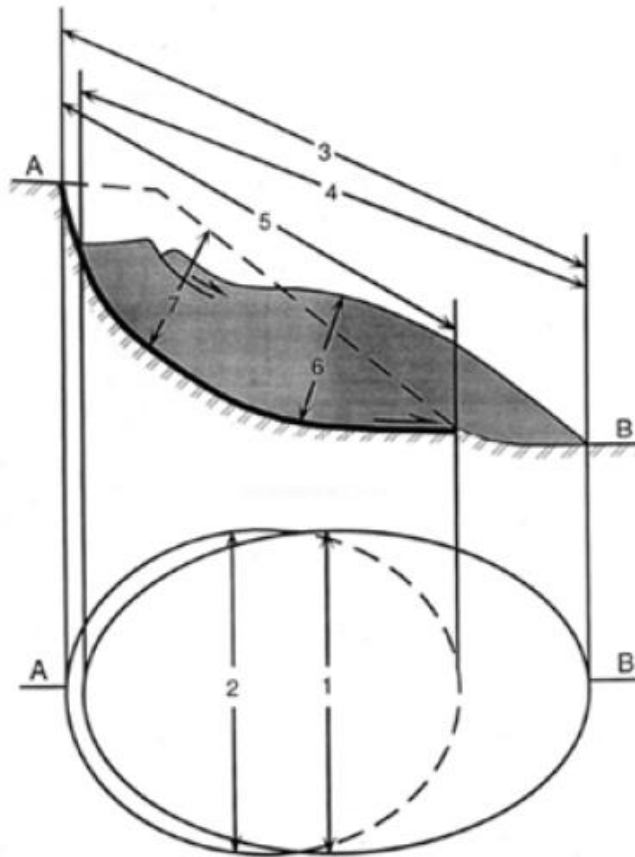
- (1) **kruna klizišta** (eng. crown) - nepokrenuti materijal uz najviši dio iznad glavne vlačne pukotine
- (2) **glavna vlačna pukotina** (eng. main scrap) – vidljivi vrh klizne plohe u neporemećenom tlu u gornjem dijelu klizišta otvorene kretanjem klizne mase (17) niz padinu
- (3) **vrh klizišta** (eng. top) – najviša točka kontakta pokrenute klizne mase (17) i glavne vlačne pukotine (2)
- (4) **čelo klizišta** (eng. head) – gornji dio kliznog tijela uz kontakt pokrenute klizne mase (17) i glavne vlačne pukotine (2)
- (5) **donja vlačna pukotina** (eng. minor scrap) – vlačna pukotina u pokrenutom materijalu klizišta nastala pomacima unutar pokrenute klizne mase (17)
- (6) **glavno tijelo klizišta** (eng. main body) – dio pokrenutog materijala klizišta koji prekriva kliznu plohu (10) između glavne vlačne pukotine (2) i završetka klizne plohe (11)
- (7) **stopa ili podnožje klizišta** (eng. foot) – dio klizišta koji je pokrenut dalje od završetka klizne plohe (11) i naližeže direktno na izvornu površinu terena (20)
- (8) **dno klizišta** (eng. tip) – najudaljenija točka u nožici klizišta (9) gledano od vrha klizišta (3)
- (9) **nožica ili završetak klizišta** (eng. toe) – donji rub pokrenutog materijala klizišta
- (10) **klizna ploha** (eng. surface of rupture) – ploha koja predstavlja donju granicu pokrenutog materijala (13), a koja se nalazi ispod površine terena (20)
- (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 (20) i prekriven stopom klizišta (7)
- (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 (13) koje je niže od izvorne površine terena (20)
- (15) zona akumulacija** (eng. zone of accumulation) – područje klizišta unutar pokrenutog materijala (13) koje je više od izvorne površine terena (20)
- (16) usijedanje** (eng. depletion) – volumen ograničen glavnom vlačnom pukotinom (2), usjednutom masom (17) i izvornom površinom terena
- (17) usjednuta masa** (eng. depleted mass) – volumen pokrenutog materijala koji leži na kliznoj plohi (10), ali ispod izvorne površine terena
- (18) akumulacija** (eng. accumulation) – volumen pokrenutog materijala (13) 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

### 2.3. Dimenzije klizišta

Dimenzije klizišta, slika 9, opisuje prostorne karakteristike klizne mase i površine sloma, koje su ključne za razumijevanje opsega i dinamike klizišta. Širina pokrenute mase odnosi se na horizontalnu dimenziju klizne mase paralelnu s glavnom osi klizišta, dok širina plohe sloma označava širinu duž koje se klizna površina odvaja od stabilnog tla. Ukupna duljina klizišta mjeri se od najviše točke, gdje klizište počinje, do najniže točke, gdje se materijal taloži. Ove dimenzije pružaju uvid u veličinu i razmjer klizišta, što je bitno za procjenu njegovog utjecaja i za planiranje sanacijskih mjera.



Slika 9: Shematski prikaz dimenzija klizišta [6]

- (1) **širina pokrenute mase**,  $W_d$  - maksimalna širina pokrenute mase, okomita na duljinu  $L_d$
- (2) **širina plohe sloma**,  $W_r$  - maksimalna udaljenost između bokova klizišta, okomita na duljinu  $L_r$
- (3) **ukupna duljina**,  $L$  - maksimalna udaljenost od krune do dna klizišta
- (4) **duljina pokrenute mase**,  $L_d$  - maksimalna udaljenost od vrha do dna klizišta
- (5) **udaljenost plohe sloma**,  $L_r$  - maksimalna udaljenost od krune klizišta do završetka plohe sloma
- (6) **dubina pokrenute mase**,  $D_d$  - maksimalna dubina pokrenute mase
- (7) **dubina klizne plohe**,  $D_r$  - maksimalna dubina plohe sloma mjerena od originalne površine okomito na ravninu koju definiraju  $W_r$  (2) i  $L_r$  (5)

### 3. FIZIČKI MODEL KRLIZIŠTA

Kao što već znamo, klizišta su složeni prirodni fenomeni koji mogu imati značajne posljedice po infrastrukturu i ljudske živote. Kako bi se bolje razumjeli mehanizmi koji dovode do aktivacije klizišta, koristimo fizičke modele koji nam omogućavaju da u kontroliranim uvjetima simuliramo različite scenarije i analiziramo ponašanje tla pod različitim opterećenjima i uvjetima.

Fizički model klizišta osmišljen je kako bi se što preciznije imitirali stvarni terenski uvjeti, a oni se postižu na temelju tri glavna zakona sličnosti; geometrijska sličnost, kinematička sličnost te dinamička sličnost. (Baker et.al 1991.) Geometrijska sličnost znači da su odgovarajuće linearne dimenzije u istom omjeru, odnosno da model ima iste ili slične dimenzije kao prava kosina. Kinematička sličnost znači da se pomaci, brzina i ubrzanja u modelu jednoliko mijenjaju kao i u stvarnoj kosini. Dinamička sličnost znači da se omjeri svih sila koje djeluju na model i na stvarnu kosinu konstantni [7].

Najlakše je postići geometrijsku sličnost jer se čak i modeli koji nisu jednaki stvarnoj kosini mogu ponašati podjednako. Najveći izazov je postići konstruktivno ponašanje slično stvarnoj kojoj je ponašanje usko povezano s naprezanjima koja su prisutna u tlu zbog vlastite težine. U modelima manjeg mjerila, budući da imamo manju visinu sloja tla nego u prirodnim padinama, naprezanja zbog vlastite težine su također puno manja, što ima značajan utjecaj na otpornost tla. Vrlo je teško postići potpunu sličnost odnosno zadovoljiti sve tri sličnosti bez obzira od problematiki kojom se bavimo. Proces utvrđivanja sličnosti znatno je složen i zahtijeva povezivanje više karakteristika sličnosti, od kojih svaka na različite načine utječe na nekoliko drugih karakteristika. Često se, zbog složenosti modela, usvajaju zadovoljavajući uvjeti za samo jedan ili dva zakona sličnosti. U tablici 1 se nalazi pregled karakteristika koje su uključene u svaki od zakona sličnosti.

Tablica 1: Karakteristike zakona sličnosti

Geometrijska sličnost	Kinematička sličnost	Dinamička sličnost	
Dimenzije modela	Pomaci čestica	Težina tla	
Kut nagiba	Brzina pomaka čestica	Parametri čvrstoće	Kut trenja
Raspodjela granulacije materijala	Akceleracija čestica		Kohezija
Vlažnost materijala	Brzina strujanja vode		
Volumetrijske vrijednosti materijala	Intenzitet kiše		
	Infiltracija		

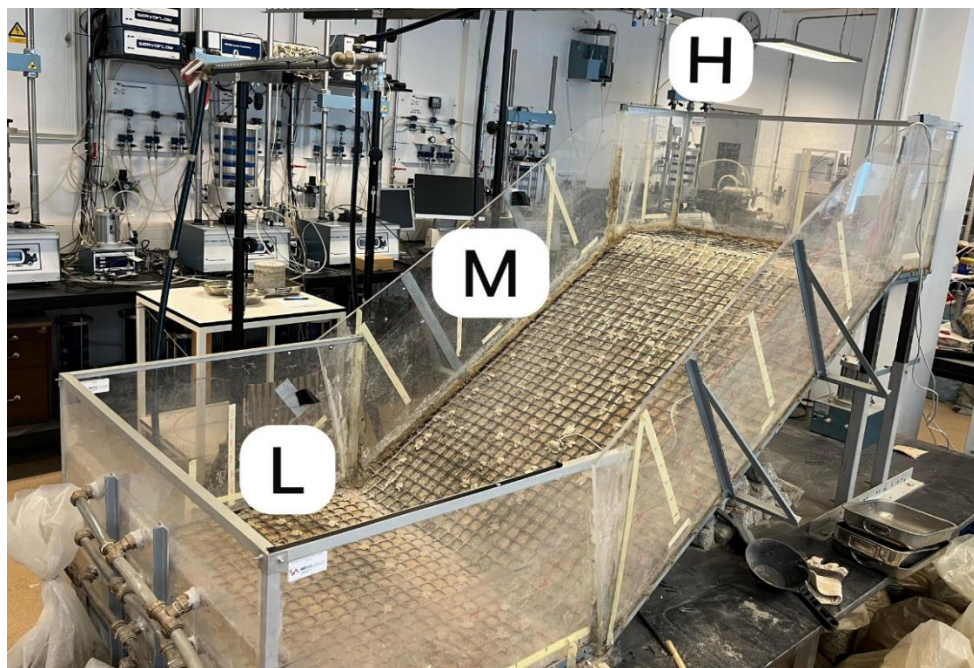
Kao primjer može se uzeti karakteristika geometrijske sličnosti, raspodjela veličine zrna, i razmotriti njezin utjecaj na druge karakteristike i zakone sličnosti. Granulometrijski sustav utječe na dinamičku sličnost promjenom parametara čvrstoće tla odnosno kohezije i unutarnjeg trenja. Također, promjena granulometrijskog sastava utječe na kinematsku sličnost promjenom brzine smicanja, brzine infiltracije, brzine protoka itd. Međusobni utjecaj sličnosti i pojedinačnih karakteristika u sličnosti klizišta je vrlo opsežan i teško ga je obuhvatiti odjednom [7].

Fizički model izrađen je za ispitivanje malih padina tla u 1g uvjetima. Na modelu se simuliraju oborine putem prskalica određenih protoka te se oborina infiltrira u tlo. Pažljivo su ugrađeni senzori za promatranje hidrauličkog odgovora skaliranih modela, te se koristi prikladna fotometrijska oprema. Ovisno o vrsti istraživanja, mogu se ugraditi i akceleometri koji omogućuju mjerenje pomaka tijekom ispitivanja.

Platforma modela sastoji se od čeličnih elemenata i prozirnih pleksiglas ploča na bočnim stijenkama koje omogućuju praćenje napredovanja nivoa vlažnosti te početni pomak. Model je širok u jedan metar u svim poljima, a dijelimo ga na tri dijela;

- (L) – low, odnosno donji dio, dužine 80 centimetara,
- (M) – medium, odnosno sredina, dužine 140 centimetara
- (H) – high, odnosno vrh, dužine 30 centimetara

Model je izgrađen tako da se njegov nagib može mijenjati stoga imamo mogućnost provoditi istraživanja na različitim nagibima od 20 do 45 stupnjeva. U dno modela ugrađena je rešetka koja sprječava klizanje tla po nepropusnim čeličnim pločama tijekom ispitivanja. Za brtvljenje sastava bočnih ploča kao i ostalih elemenata koristi se silikon kako bi se osigurala vodonepropusnost modela prilikom ispitivanja. U nožici modela ugrađene su cijevi za dreniranje koje su spojene na odvod te koje se mogu kontrolirati želimo li ih držati zatvorene ili otvorene.



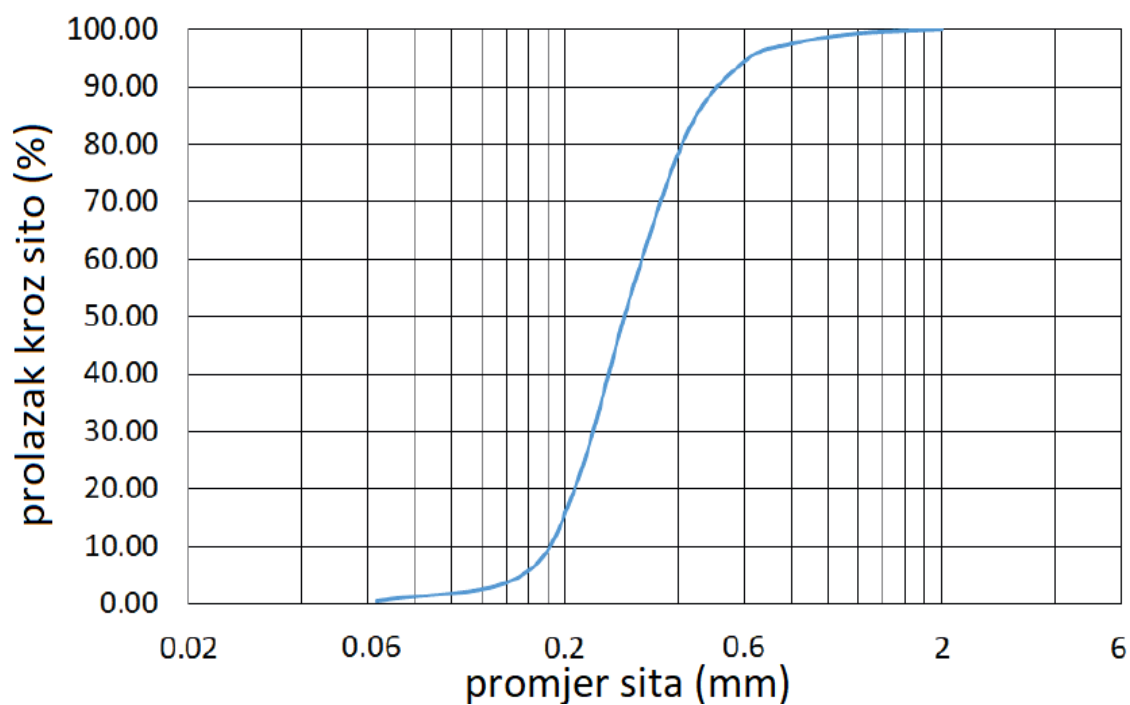
Slika 10: Fizički model kosine

### 3.1. Materijal

Zbog relativno jednostavnog ponašanja pijeska u pogledu infiltracije i pokretanja klizišta, pijesak je izabran kao osnovni materijal za početne male eksperimente i za definiranje zakona sličnosti u ovom istraživanju. Još jedno pojednostavljenje je to što je utjecaj sukcije na hidraulički i mehanički odziv pijeska potpuno zanemaren, s obzirom na vrlo niske vrijednosti sukcije koje mogu postojati u ovakvom tlu. Ovo znatno olakšava karakteristike zakona sličnosti. Korišteni materijal je fino gradirani pijesak iz rijeke Drave, s maksimalnom veličinom zrna od 2,0 mm. U tablici 2 su prikazani svi parametri korištenog materijala, dok je na slici 10 prikazana granulometrijska krivulja istog. Materijal koji se ugrađuje je određene vlažnosti od 2%. Željena vlažnost materijala dobivena je potpunim sušenjem materijala u peći 24 sata na 105°C te nakon toga dodavanjem 2% vode. Materijal se ugrađuje u model sa kosinom pod kutem od 35°. Dravski pijesak ugrađuje se u model u slojevima od šest centimetara. Svaki sloj je jednake vlažnosti od 2% te se svaki sloj jednoliko zbija. Ugrađuje se ukupno pet slojeva po šest centimetara debljine čime se postiže ukupna debljina ugrađenog materijala od trideset centimetara. Specifična težina pijeska  $G_s$  iznosi 2,7. Svojstva čvrstoće Dravskog pijeska određena su u aparatu za izravno smicanje pri istoj relativnoj gustoći kao i u modelu  $D_r = 0,5$  i niskim normalnim naprezanjima koje odgovaraju normalnim naprezanjima koja su prisutna u modelu klizišta. Prosječni kut trenja Dravskog pijeska ( $\varphi$ ) iznosi 34,9°. Hidraulička vodljivost određena je u edometru pri istoj relativnoj gustoći kao u modelu i niskim normalnim naprezanjima te iznosi  $k = 5 \times 10^{-5}$  m/s [7].

Tablica 2: Značajke materijala, Dravski pijesak [5]

Parametar materijala	Dravski pijesak
Specifična gustoća, $G_s$	2,7
Suha gustoća, $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	1,52
Ukupna gustoća, (g/cm <sup>3</sup> )	1,55
Efektivna veličina zrna, $D_{10}$ (mm)	0,19
Efektivna veličina zrna, $D_{60}$ (mm)	0,37
Koeficijent uniformnosti, $cu$	1,947
Minimalni koef. pora, $e_{min}$	0,641
Maksimalni koef. pora, $e_{max}$	0,911
Hidraulička konduktivnost, $k_s$ (m/s)	1,00E-05
Kut trenja, $\phi$ (°)	34,9
Kohezija, $c$ (kPa)	0
Inicijalni porozitet, $n_i$	0,44
Inicijalni koeficijent pora, $e_i$	0,78
Inicijalna relativna gustoća, $D_{ri}$	0,5
Inicijalna vlažnost, $w_i$ (%)	2



Slika 11: Granulacijska krivulja Dravskog pijeska [5]

### 3.2. Mjerna oprema

Mjernu opremu možemo podijeliti na dva dijela. Prvi dio pripada visokorezolucijskoj kameri Nikon D500 sa ultra širokom lećom Tokina AT-X 11-20 koja nam služi za SfM fotometriju fizičkih modela. SfM tehnologija nam služi da pomoću više preklapajućih slika snimljenih pod različitim kutovima možemo kreirati 3D model [5].

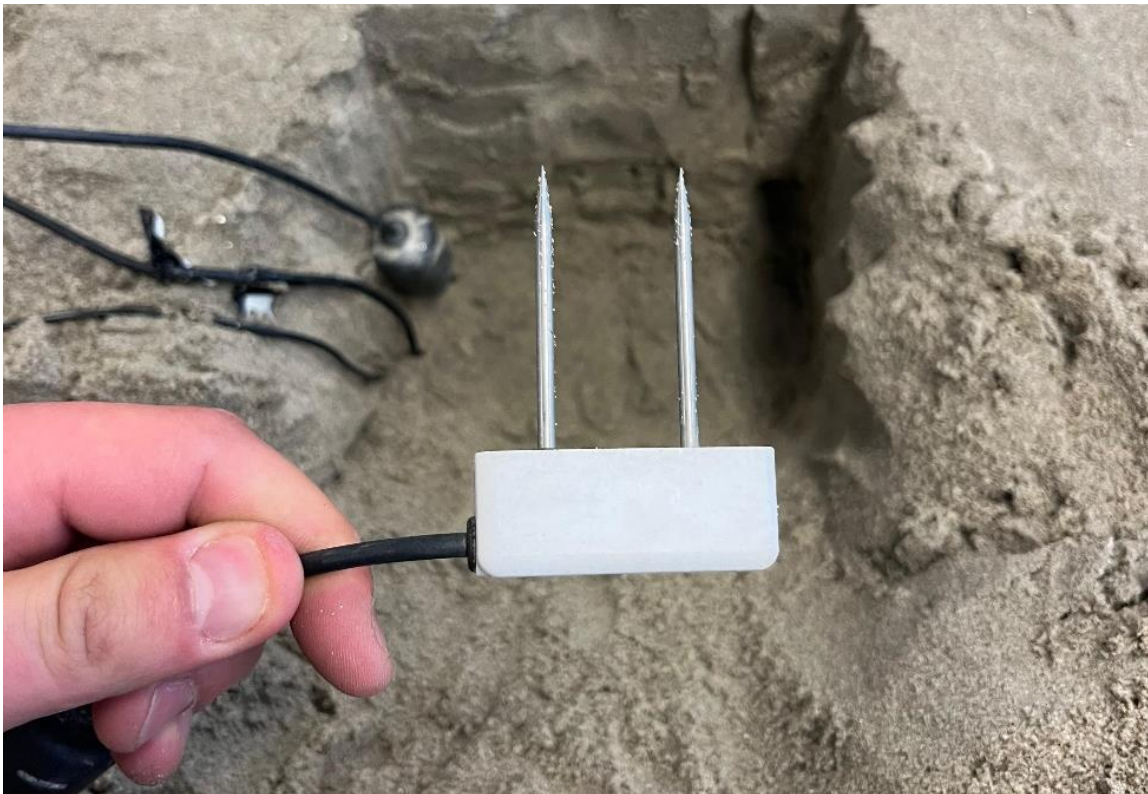
Drugi dio opreme, ujedno i oprema na kojoj je veći fokus prilikom ovog istraživanja je oprema za mjerenje hidrauličkog odziva u fizičkom modelu klizišta na kojeg djelujemo simulacijom kiše. Razvoj odgovarajuće mreže senzora za uvjete ispitivanja i odabir odgovarajućih mjernih tehnika ključan je korak u razvoju malih fizičkih modela klizišta. Fizički model je napravljen tako da se na njemu može ispitivati široki spektar materijala, od pijeska do gline, samim time izbor senzora koji će se koristiti u modelu nije jednostavan. Odabrana mjerna oprema morala je moći pokriti široki raspon mjerenja u različitim teksturama tla, a istovremeno omogućavati dovoljnu preciznost mjerenih rezultata. Odabrani su senzori sadržaja vode u tlu, koji koriste kapacitivnu metodu za predviđanje volumetrijskog sadržaja vode u tlu. Omogućuju brzo otkrivanje promjena sadržaja vlage u tlu za širok raspon tekstura tla, poroznosti i uvjeta gustoće. U pjeskovitim tlima gdje se očekuju vrijednosti sukcije odnosno usvisavanja unutar mjernog raspona standardnih tenziometara, koriste se mini-tenziometri za brzo mjerenje tlaka vode u porama. Podaci dobiveni putem senzora moraju biti prikupljeni istovremeno na nekoliko dubina i duž različitih profila kako bi se dobila potpuna slika vremenske i prostorne evolucije različitih varijabli tijekom eksperimenta. Odabrani senzori kompatibilna je za ispitivanje na fizičkim modelima klizišta u statičkim i dinamičkim uvjetima [5].

U ovom radu analizirati će se podaci sa odabranih senzora, a služe za mjerenje volumnog udjela vode, vlažnosti vode. Senzori „Teros“ koji su se koristili u ovom modelu dolaze iz šireg ekosustava METER Group senzora.



### 3.2.1. Teros 10 senzor

Teros 10 senzor je kompaktan senzor za mjerenje volumetrijskog sadržaja vode u tlu, nudi preciznu kontrolu vlažnosti tla u različitim znanstvenim i poljoprivrednim primjenama. Teros 10 je mali i lagan uređaj koji se sastoji od nekoliko glavnih komponenti. Kućište senzora izrađeno je od plastike, a služi da štiti elektroničke komponente senzore od vanjskih utjecaja poput vlage, pritiska tla i mehaničkih oštećenja. Dizajniran je da bude vodootporan i otporan na koroziju što omogućuje upotrebu i na otvorenom. Senzor ima dvije male metalne sonde koje su ključne za mjerenje volumetrijskog sadržaja vode u tlu. Senzor spajamo pomoću kabela koji omogućuje prijenos podataka do uređaja za prikupljanje podataka ili sustava za daljinsko praćenje [8].

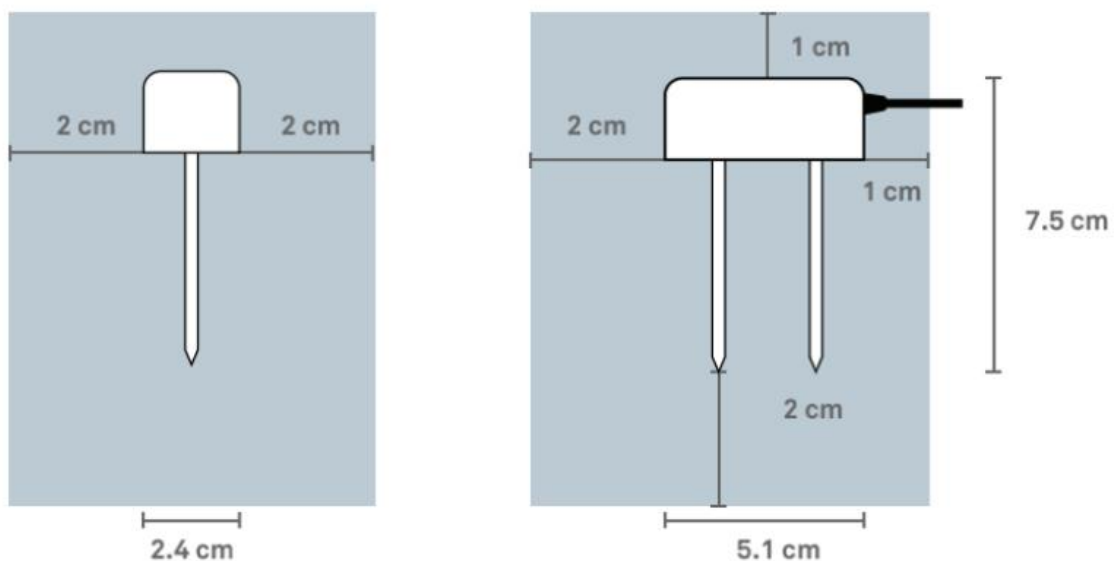


Slika 12: Senzor Teros 10

Senzor Teros10 mjeri volumetrijski sadržaj vode u tlu koristeći dielektričnu permivost tla, što je svojstvo koje se značajno mijenja sa količinom prisutnosti vode. Senzor emitira elektromagnetske impulse kroz sonde i mjeri promjene permivosti tla. Voda ima puno veću dielektričnu konstantu od zraka ili čestica tla pa se promjenom količine vode u tlu značajno mijenja permivost tla čime se omogućuje precizno mjerenje vlažnosti [8].

Permitivnost ( $\epsilon$ ) je mjera sposobnosti materijala da "dopusti" prolazak električnog polja kroz njega. U jednostavnim terminima, to je mjera koliko materijal može pohraniti električnu energiju kada se nalazi u električnom polju. Što je više vode u tlu signal između sonde će se kretati sporije i sa većom apsorpcijom, što senzor interpretira kao visoku vlažnost tla.

Prilikom ugradnje tla treba obratiti pozornost da se izbjegne stvaranje praznina i zračne džepove koji bi mogli otežati očitavanje. Senzor se postavlja tako da mu sonde u potpunosti budu prekrivene tlom i da nema praznina oko njih. Nakon ugradnje potrebno ga je povezati sa uređajem za prikupljanje podataka. Ovaj uređaj može biti data logger ili neki drugi sustav za daljinsko praćenje ovisno o zahtjevima istraživanja [5].



Slika 13: Dimenzije i volumen utjecaja senzora Teros 10

### 3.2.2. Teros 12 senzor

Teros 12 senzor je također senzor proizveden od strane METER Group s ciljem mjerenja vlažnosti tla. Dok Teros 10 mjeri samo volumetrijski sadržaj vode u tlu, što ga čini pogodnim gdje je potrebna osnovna informacija o vlažnosti tla, Teros 12 nudi dodatne funkcije mjerenja. Teros 12 dodatno mjeri temperaturu tla i električnu vodljivost tla. Ovi parametri omogućuju dublje razumijevanje stanja tla, što je korisno u istraživačkim projektima.

Osim navedenog, Teros 12 se ne razlikuje puno u odnosu na Teros 10. Senzorima se na isti način rukuje, na isti način se ugrađuju i kalibriraju [9].



Slika 14: Senzor Teros 12

U tablici 3 prikazane su karakteristike senzora Teros 10 i Teros 12.

Tablica 3: Usporedba senzora Teros 12 i Teros 10 [8],[9]

Karakteristika	Teros 10	Teros 12
<b>Mjereni parametri</b>	Volumetrijski sadržaj vode (VWC) u tlu	Volumetrijski sadržaj vode (VWC), temperatura tla, električna vodljivost (EC)
<b>Broj sondi</b>	2 sonde	3 sonde
<b>Dimenzije sondi</b>	Duljina sondi 4.8 cm	Duljina sondi 4.8 cm
<b>Točnost mjerenja VWC</b>	$\pm 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ za većinu tipova tla	$\pm 0.01 \text{ m}^3/\text{m}^3$ za većinu tipova tla
<b>Dodatne funkcije</b>	Nema dodatnih funkcija	Mjerenje temperature i električne vodljivosti tla
<b>Mjerenje temperature</b>	Nije dostupno	Dostupno ( $-40^\circ\text{C}$ do $+60^\circ\text{C}$ , točnost $\pm 1^\circ\text{C}$ )
<b>Električna vodljivost (EC)</b>	Nije dostupno	Dostupno (0 do 20 dS/m, točnost $\pm 10\%$ )
<b>Kalibracija</b>	Tvornički kalibriran za većinu tipova tla	Tvornički kalibriran s dodatnim parametrima
<b>Kompatibilnost</b>	Kompatibilan s većinom uređaja za prikupljanje podataka	Kompatibilan s većinom uređaja za prikupljanje podataka
<b>Primjena</b>	Praćenje vlažnosti tla u poljoprivredi, hortikulturi, istraživanju tla	Preciznije praćenje tla u uvjetima gdje su potrebni dodatni podaci (temperatura i EC)
<b>Mjereni parametri</b>	Obično je povoljniji	Viša cijena zbog dodatnih funkcionalnosti

### 3.2.3. Teros 31 senzor

Zadnje korišteni senzor je Teros 31 čiji je proizvođač također METER Group, koji je specijaliziran za mjerenje pornih pritisaka i temperature vode u tlu. Ovaj senzor dizajniran je za precizna točkasta mjerenja, s aktivnom površinom od samo 0,5 cm<sup>2</sup> i promjerom od 5 mm. Njegov keramički vrh, prikazan na slici X, donosi brojne prednosti zahvaljujući svojoj maloj veličini. Neke od tih prednosti uključuju minimalno ili gotovo nikakvo narušavanje strukture tla, selektivno prikupljanje podataka i brz odziv. Senzor je opremljen tankim i fleksibilnim kabelom koji prenosi minimalan pritisak na senzorsku jedinicu i osovinu tenziometra. Dodatna značajna prednost Teros 31 senzora je njegova sposobnost da se postavi u gotovo bilo kojem položaju bez utjecaja na točnost mjerenja [10].



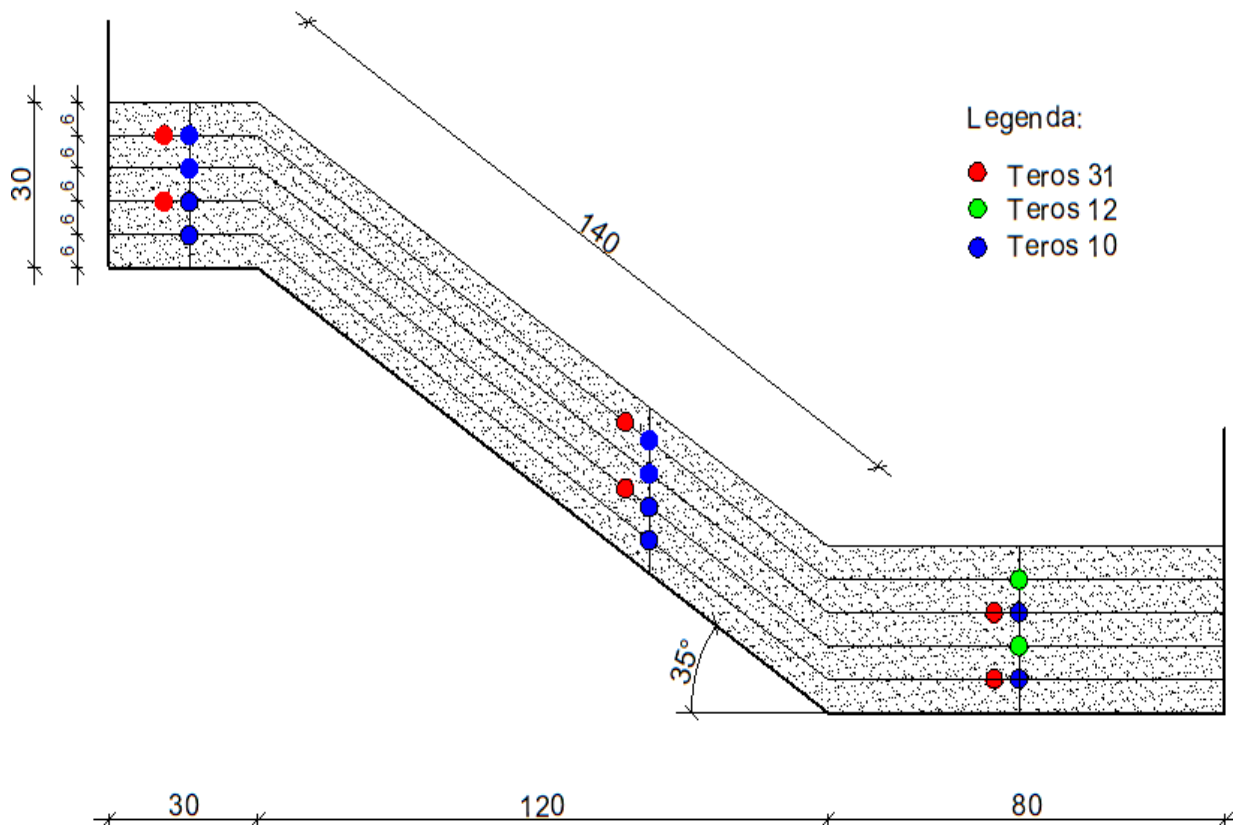
Slika 15: Senzor Teros 31



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].

Senzori su ugrađeni na svakih šest centimetara dubine u svakom zasebnom dijelu modela, odnosno u donjem (L), srednjem (M) i gornjem (H) dijelu modela. Na donjem (L) i gornjem (H) dijelu senzori su ugrađeni u sredinu profila dok su na srednjem dijelu (M) ugrađeni na trećini profila.

Točno označene pozicije senzora vidljive su na shematskom prikazu modela na slici 16. Crvene pozicije označavaju Teros 31 senzore, zelene pozicije označavaju Teros 12 senzore dok plave označavaju senzore Teros 10.



Slika 16: Shematski prikaz pozicija ugrađenih senzora

Na slici 17 prikazani su ugrađeni senzori na gornjem (H) dijelu modela. Senzori su ugrađeni na svakih šest centimetara, gdje se prilikom ugradnje senzora uzimao i uzorak ugrađenog materijala, u ovom slučaju Dravskog pijeska radi ručne kontrole vlažnosti materijala.



Slika 17: Ugrađeni senzori u gornjoj (H) zoni

#### 3.2.4. ZL-6 Data logger

Uređaj za prikupljanje i pohranu podataka također je razvijen od strane METER Group kompanije. Kao i korišteni senzori, uređaj je ključan alat za široki krug korisnika poput znanstvenika, inženjera i poljoprivrednika. Korišteni data logger ima šest ulaza odnosno portova koji služe za povezivanje senzora. Uređaj može pohraniti veliku količinu podataka u svoju internu memoriju, a intervali u kojima bilježi mjerenja sa senzora određujemo putem softvera [11].

### 3.3. Simulatori kiše

Prilikom dizajna simulatora kiše posebna se pozornost treba obratiti pozornost na široki raspon intenziteta oborina te razne uvijete koji ovise o ispitivanom materijalu tla i specifičnim ciljevima eksperimenta. Sustav simulatora kiše sastoji se od nosača, vodovodnih cijevi, prskalica i manometra. Dovod vode grana se na svaki zasebni nosač za donji (L), srednji (M) i gornji (H) dio modela. Na kraju svakog nosača dovodnih cijevi, kao i same cijevi ugrađene su mlaznice različitih dimenzija i protoka. U tablici 4 prikazan je raspon protoka vode po svakoj zasebnoj prskalici u ovisnosti pritiska vode. Pritisak u sustavu kontrolira se putem ugrađenog manometra [5].

Tablica 4: Tehničke karakteristike mlaznica simulatora kiše [5]

Tip mlaznice	Kut prskanja	v [l/min]			
		p [bar] 1.0	p [bar] 2.0	p [bar] 3.0	p [bar] 5.0
490.404	60	0,76	1,00	1,18	1,44
490.444	60	0,95	1,25	1,47	1,80
490.484	60	1,21	1,60	1,88	2,31
490.524	60	1,52	2,00	2,35	2,89
460.524	90	0,30	0,40	0,47	0,58



Tijekom ispitivanja koristila se mlaznica 490.404 pri pritisku od 2 bar-a. Time smo postigli brzinu prskanja od jedne litre u minuti na svakoj pojedinoj mlaznici. Visina položaja mlaznica podešena je tako da simulirana kiša obuhvaća puni profil modela tijekom ispitivanja. Mlaznicu na donjem (L) dijelu modela smo isključili prilikom u trenutku potapanja nožice modela. Slika 18 prikazuje korištenu mlaznicu na kraju nosača simulatora kiše.



*Slika 18: Mlaznice na simulatoru kiše*

#### 4. MATRIČNA SUKCIJA

Matrična sukcijska sposobnost tla da veže i zadržava vodu u svojim porama što pokazuje kao negativan tlak u vodi unutar pora. Pri promjeni volumetrijske vlažnosti tla, mijenja se i matrična sukcijska sposobnost.

Matričnu sukcijsku sposobnost dijeli se na dvije komponente usisa. Dijeli se na matrični odnosno kapilarni te na osmotski usis. Termodinamički potencijal vode u tlu se u odnosu na referentni potencijal slobodne vode prikazuje kao stanje energije slobodne vode u tlu te se naziva ukupna sukcijska sposobnost  $\psi_t$  [12].

Formula (1) matematički je izraz za ukupnu sukcijsku sposobnost:

$$\psi_t = (u_a - u_w) + \eta \quad (1)$$

Gdje je:

$\psi_t$  = ukupni usis (kPa)

$u_a$  = porni tlak zraka (kPa)

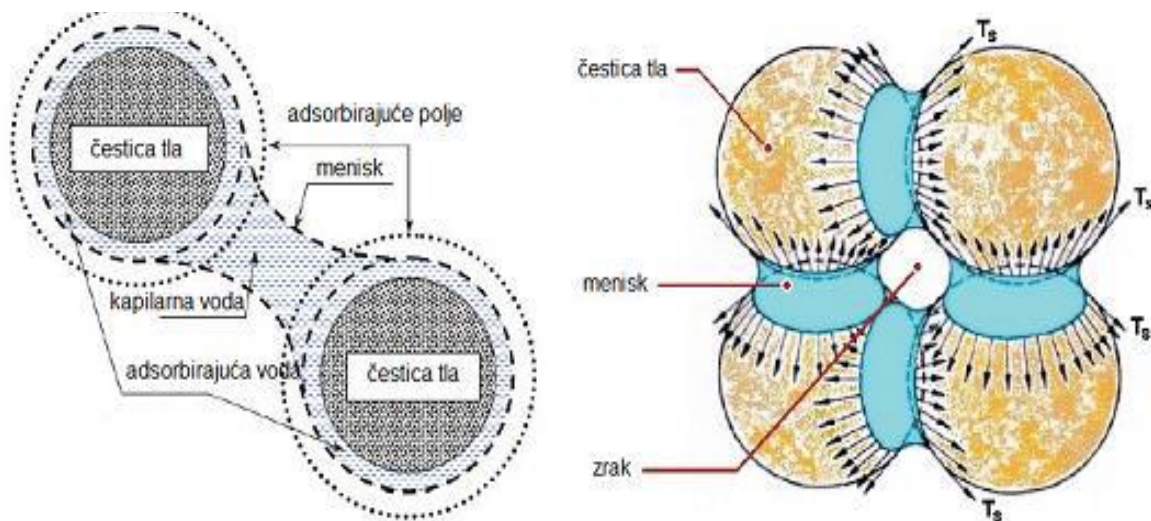
$u_w$  = porni tlak vode (kPa)

$\eta$  = osmotski usis (kPa).

Osmotski usis nastaje prisustvom i otapanjem soli u vodi. Povećanjem koncentracije soli, smanjuje se relativna vlažnost i obrnuto. Osmotski usis funkcija je kojom se opisuje količina otopljenih soli u porama ispunjenih tekućinom i ne predstavlja značajni dio u ukupnom usisu, ali je sastavni dio ukupnog usisa.

Matrični usis odnosno sukcijska sposobnost je najvažniji parametar naprezanja u nesaturiranom tlu. Matričnu sukcijsku sposobnost definiramo kao razliku pornog tlaka zraka  $u_a$  i pornog tlaka vode  $u_w$ . Porni tlak zraka u nesaturiranom tlu veći je od pornog tlaka vode. Kada je porni tlak zraka jednak nuli, vrijednost pornog tlaka vode je negativna. Negativnu vrijednost pornog tlaka vode naziva se sukcijska sposobnost. Volumetrijski udio vode u materijalu najviše utječe na promjene u matričnoj sukcijskoj sposobnosti. Matrična sukcijska sposobnost stvara dodatnu koheziju među česticama tla, što rezultira većom posmičnom čvrstoćom tla. Ovo je posebno važno u nenasićenim tlima, gdje sukcijska sposobnost može značajno povećati otpornost tla na deformacije i klizanja. [12]

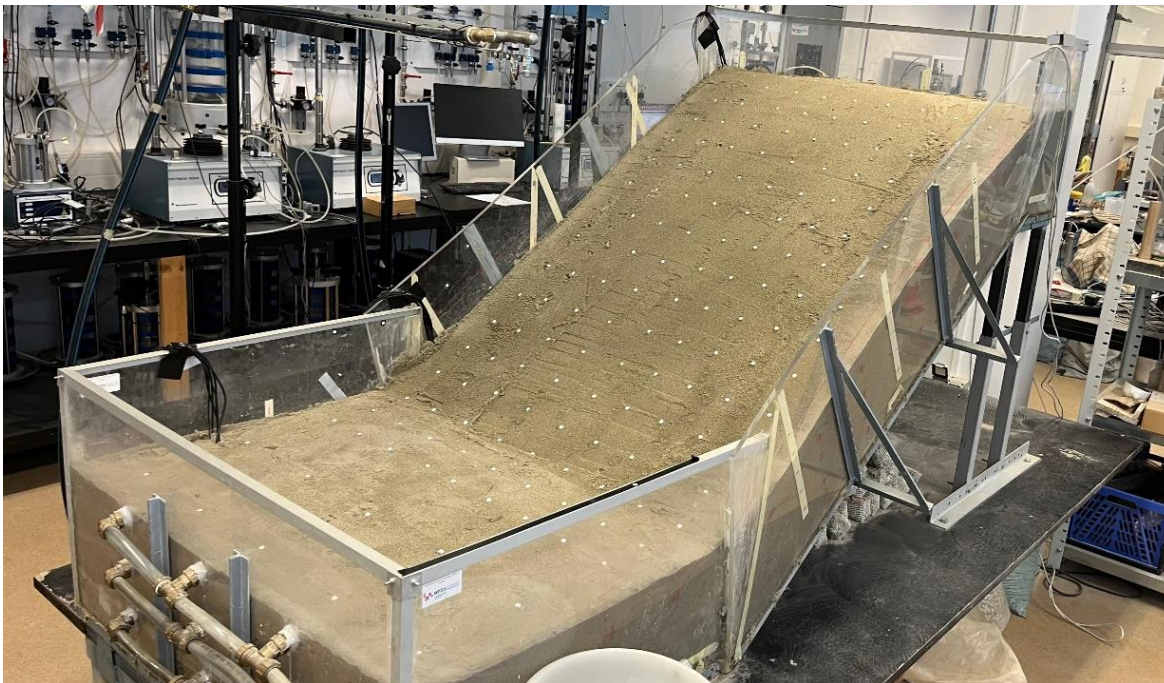
U nezasićenim uvjetima, matrična sukucija pomaže održati stabilnost kosine jer povećava posmičnu čvrstoću tla. Sukucija može smanjiti rizik od klizišta, jer drži čestice tla zajedno i smanjuje vjerojatnost pokretanja mase tla niz kosinu. Ako se sukucija smanji, primjerice tijekom obilnih kiša, kada tlo postaje zasićeno vodom, može doći do značajnog smanjenja posmične čvrstoće. Smanjenje čvrstoće može uzrokovati nestabilnost kosine, povećavajući rizik od klizanja ili urušavanja tla. Matrična sukucija igra ključnu ulogu u održavanju stabilnosti kosina, posebno u nezasićenim uvjetima. Ona djeluje kao dodatni mehanizam koji povećava otpornost tla na klizanje. Zbog toga je važno razumjeti i pratiti matričnu sukuciju pri planiranju i analizi stabilnosti kosina u građevinskim projektima.



Slika 19: Prikaz kapilarnih sila vode i zraka između čestica tla [13]

## 5. ISPITIVANJE MODELA KLIZIŠTA

U model je ugrađen sitnozrnati čisti pijesak uniformne gradacije od 0 – 1,0 mm. Ugrađeni su senzori za praćenje promjene porasta saturacije vode u modelu te je samim time spreman za ispitivanje.



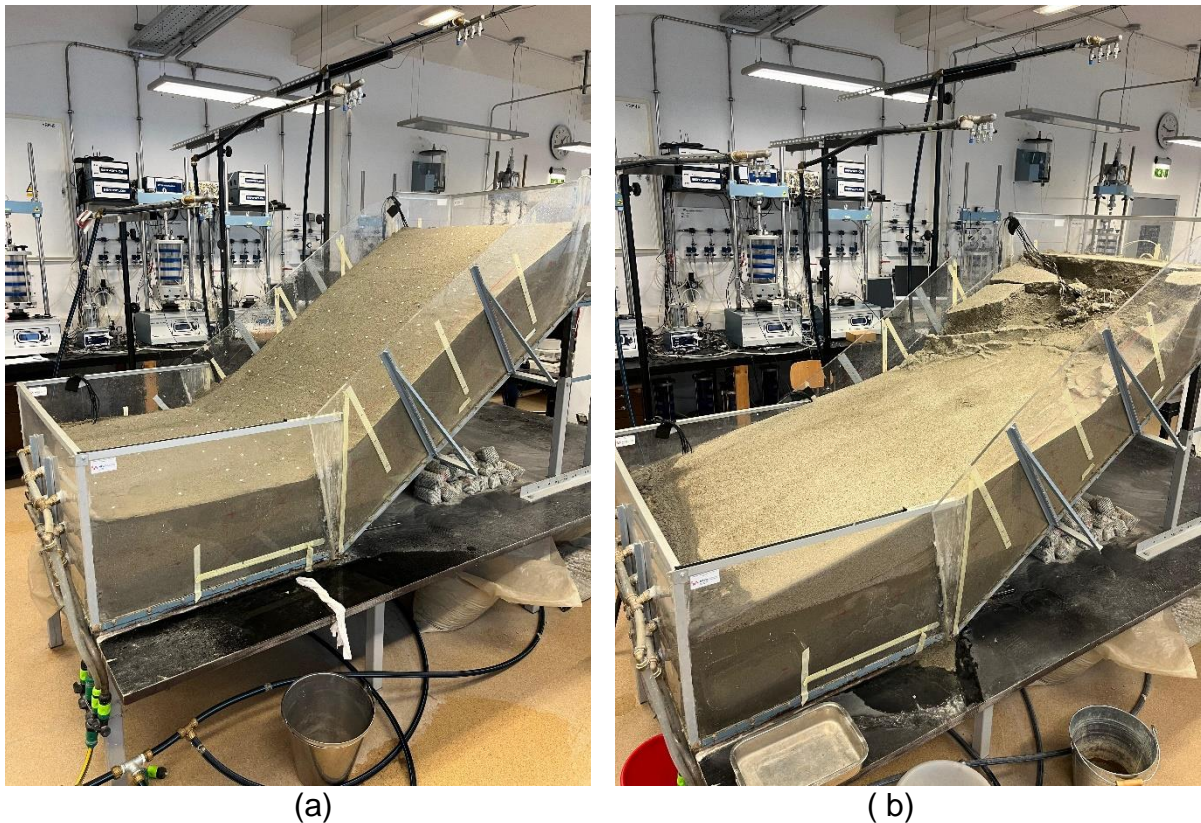
*Slika 20: Model prije početka ispitivanja*

Simulaciju kiše na fizičkom modelu kosine dobivamo putem ranije pojašnjenih simulatora. Ispitivanje započinje u 12:37 sati te je određen stabilan intenzitet oborina pri pritisku od 2 bara. Po tablici 4 iz poglavlja 3.3 očitava se protok od jedne litre po minuti na svakoj zasebnoj mlaznici. Prvo zapažanje te ujedno i prvi bitan trenutak prilikom ispitivanja dešava se u 13:49 sati kada dolazi do potapanja nožice modela. Kako bi se zadržala konstantna razina vode u nožici modela, otvorena je najviša drenažna cijev. U 72. minuti zabilježeno je potapanje nožice, a nedugo nakon toga, dvije minute nakon, u 74. minuti ispitivanja primjećuje se i prva pukotina prikazana na slici 22(a). Nakon prve pukotine, širenje pukotine se nastavlja retrogresivno. Retrogresivna distribucija klizišta znači da se ploha sloma proširuje u smjeru kretanja pokrenutog materijala.



Na slici 22 (b) vidljivo je retrogresivno širenje širenje početne pukotine. Slika 22(c) snimljena je u 13:55 h, u 78. minuti ispitivanja. Vidljivo je kako se podizanjem razine podzemne vode u smanjuje posmična čvrstoća te dolazi do translacijskog klizanja koje je pojašnjeno u poglavlju 2.1.4. Slika 22(d) prikazuje daljnje retrogresivno širenje klizišta. Slika otkriva i ugrađene senzore u srednjem (M) dijelu modela klizišta na dubini od 6 centimetara.

Ispitivanje je nastavljeno do 15:00 h što je 143 minute, nakon čega smo otvorili sve mlaznice na srednjem (M) i gornjem (H) dijelu ne bi li doveli model do potpunog sloma. Umjetna kiša ugašena je u 15:09 čime je završeno ispitivanje na modelu. Na slici 21(a) prikazan je model prije ispitivanja dok slika 21(b) prikazuje model nakon ispitivanja.



*Slika 21: Model prije i nakon ispitivanja; (a); prije ispitivanja; (b) nakon ispitivanja*





Slika 22: Prikaz napredovanja sloma; (a) 74.minuta ispitivanja; (b) 78. minuta ispitivanja; (c) 79. minuta ispitivanja; (d) 101. minuta ispitivanja

Povećanjem razine podzemne vode u modelu uslijed infiltracije vode iz mlaznica koje simuliraju kišu dolazi do zasićenja odnosno potpune saturacije materijala čime značajno smanjuju parametri čvrstoće. Podzemna voda počinje teći kroz kosinu te se akumulira u samoj nožici klizišta. Akumulirana voda dovodi do porasta podzemne vode u donjem dijelu kosine. Porastom podzemne vode dolazi do porasta poreznih tlakova. Porezni tlak djeluje na čestice tla čime se smanjuje efektivni tlak. Efektivno naprezanje je ključno za održavanje čvrstoće tla. Efektivno naprezanje definira se kao razlika između ukupnog naprezanja i poreznog tlaka. Budući da se porastom razine podzemne vode povećava porezni tlak, smanjuje se efektivno naprezanje, prikazano u formuli (2)

$$\sigma' = \sigma - u \quad (2)$$

Gdje je:

- $\sigma'$  - efektivno naprezanje,
- $\sigma$  – ukupno naprezanje,
- $u$  – porezni pritisak.

Porastom poreznog tlaka te samim time i efektivnog naprezanja, dolazi do smanjenja posmične čvrstoće. Posmična čvrstoća tla ( $\tau$ ) ovisi o koheziji tla ( $c$ ) i kutu unutarnjeg trenja ( $\phi$ ), ali i o efektivnom napreznju ( $\sigma'$ ) prikazano u formuli (3).

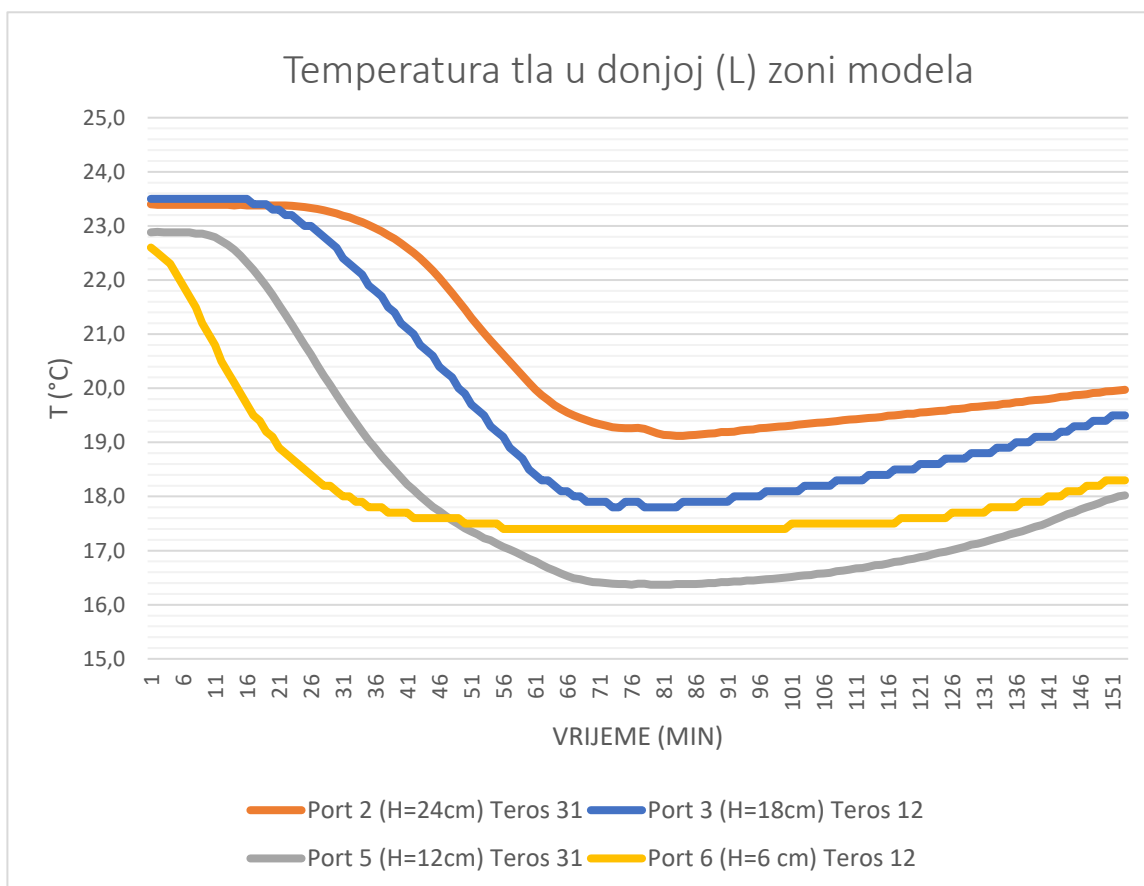
$$\tau = c + \sigma' \cdot \tan(\phi) \quad (3)$$

Porastom podzemne vode dolazi do niza reakcija koje uzrokuju povećanje rizika od klizanja. Kosina postaje nestabilna. Povećana prisutnost vode u tlu uzrokuje i dodatnu težinu tla što znatno povećava opterećenje na kosinu. Smanjenjem posmične čvrstoće, a ujedno povećanjem opterećenja na kosinu uzrokuje da kritični posmični naponi u tlu postanu veći od posmične čvrstoće tla, čime može doći, a ovom ispitivanju je i došlo do pokretanja klizišta [7].

## 6. ANALIZA REZULTATA

Mjerenja senzora su pružila detaljan pregled cijelog procesa infiltracije oborina, zasićenja tla te smanjenja njegove čvrstoće, što je dovelo do razvoja nestabilnosti u kosini tijekom ispitivanja.

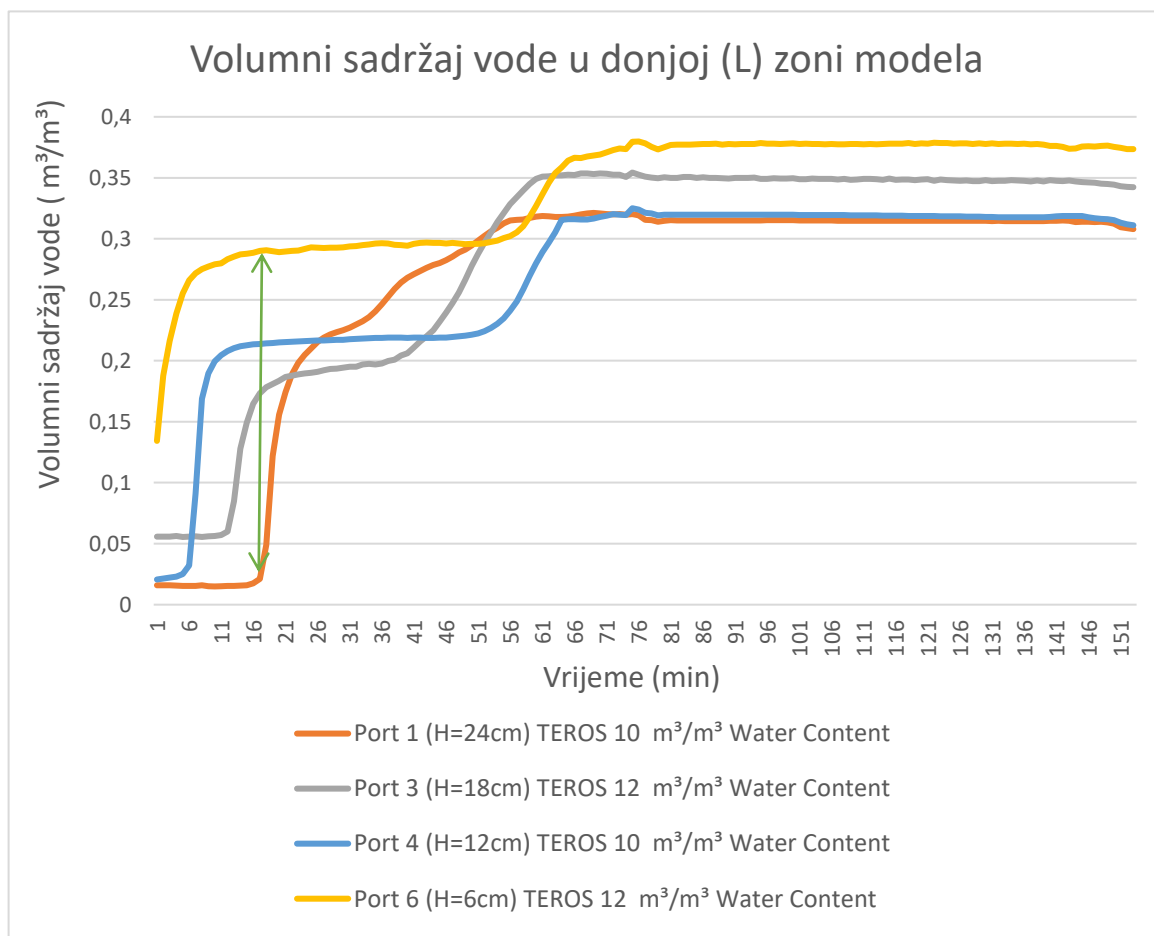
Slika 23 prikazuje graf očitane temperature tla u modelu. Iz grafa je jasno vidljiv pad temperature materijala. Na apcisi nalazi se vrijeme odnosno minute trajanja ispitivanja dok su na ordinati prikazane temperature. Iz žute krivulje grafa koja označava Port 6 na koji je spojen senzor Teros 12 na dubini od 6 cm, vidljiv je najraniji pad temperature tla. Taj pad opravdava se time što je do senzora na dubini od 6 cm najprije prodire simulirana kiša čime hladi materijal te samim time imamo očitavanje smanjene temperature. Graf na slici 23 pokazuje da je vodi trebalo oko 35 minuta da prodre do dubine od 24 centimetara.



Slika 23: Temperatura tla u donjoj (L) zoni modela

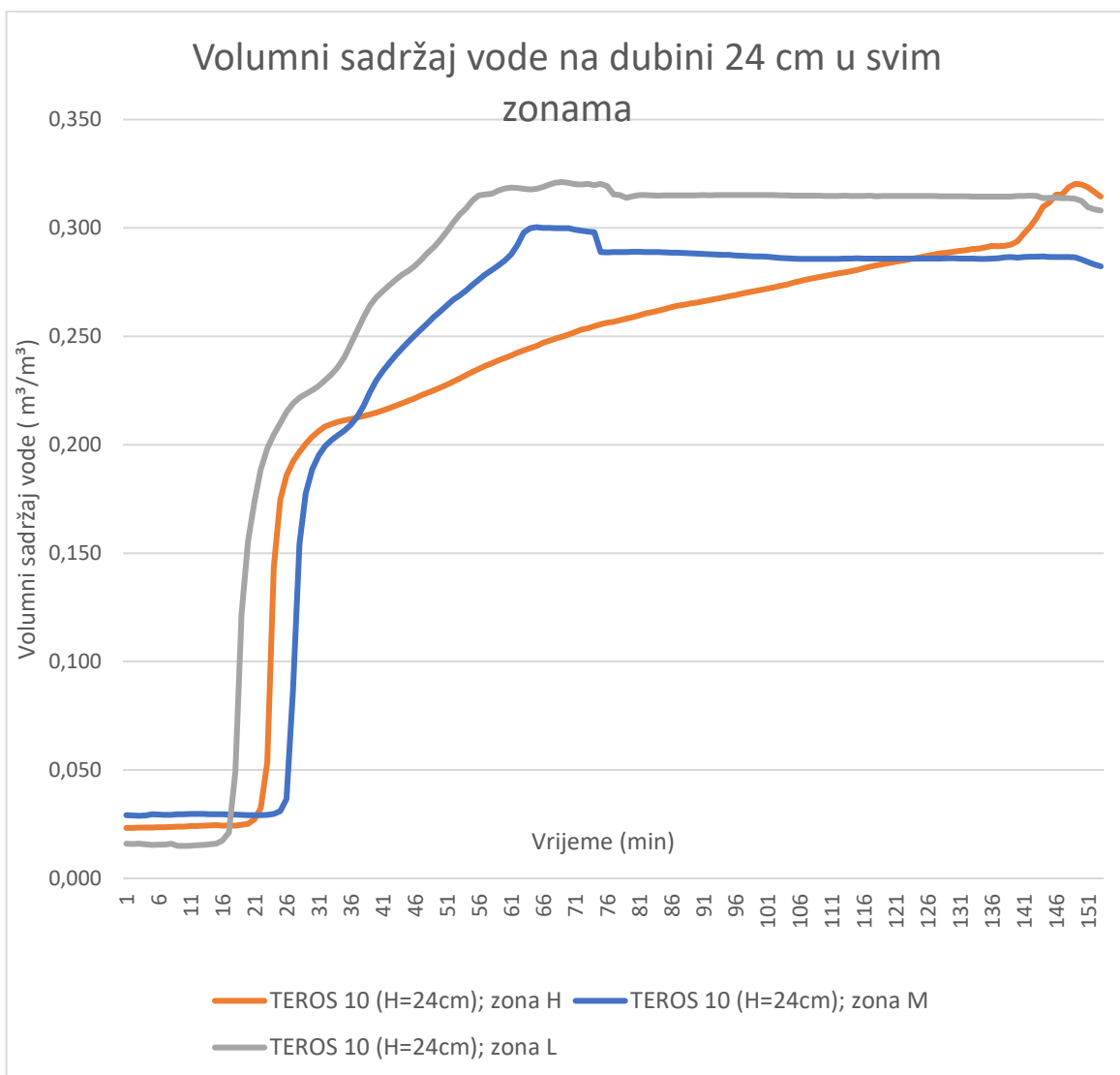


Na sljedećem grafu na slici 24 prikazan je sadržaj vode donjem (L) dijelu modela zabilježen na sensorima. Senzor Teros 12 na Portu 6, dubina 6 centimetara pokazuje pogrešno početno stanje. Početni sadržaj vode trebao bi biti na svim pozicijama podjednak. Mogući razlog pogrešnog očitavanja početnog očitavanja je razrahljenje materijala prilikom ugradnje, budući da se radi o najpliće ugrađenom senzoru. Iz ovog grafa može se očitati u kojem trenutku se voda infiltrirala do senzora. Izdvojio bih 16. minutu ispitivanja gdje je vidljiv volumni udio vode u materijalu pri svim dubinama. Može se očitati da je materijal pri dubini od 6 centimetara potpuno saturiran, na dubini od 18 centimetara djelomično saturiran dok je na dubini od 24 centimetara materijal u početnim uvjetima.



Slika 24: Volumni sadržaj vode u donjoj (L) zoni modela

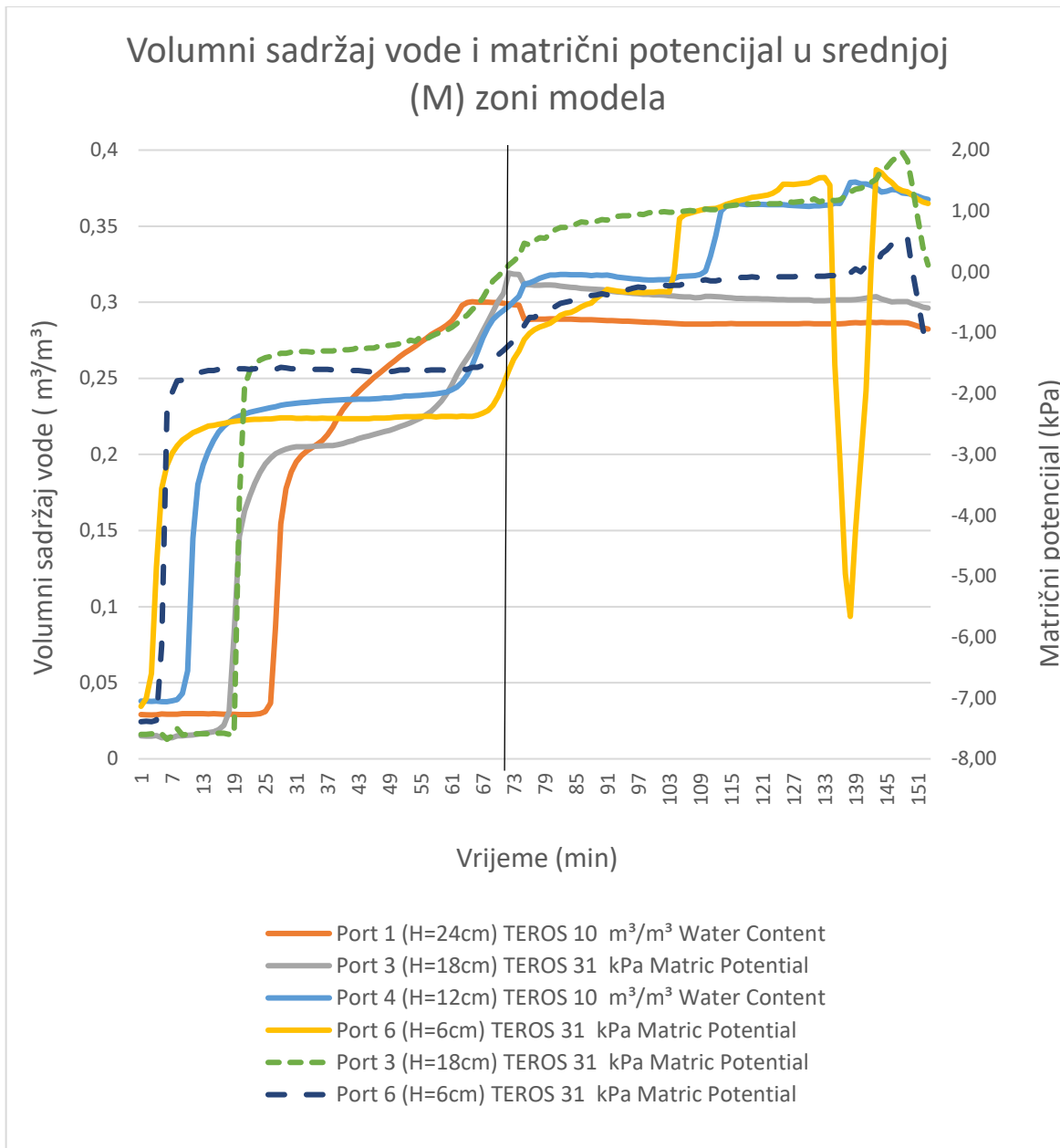
Slika 25 prikazuje grafički prikaz volumnog sadržaja vode na dubini od 24 centimetara u gornjoj (H), srednjoj (M) i donjoj (L) zoni. Vidljivo je da je u donjoj zoni modela najprije došlo do saturacije potpune zasićenosti materijala vodom, što je i ranije poznato budući da je nožica modela potopljena nakon 72 minute. Trend povećanja saturirane vode u materijalu u donjoj i srednjoj zoni su podjednaki. Vidljivo je da se voda u gornjoj zoni infiltrirala do dubine od 24 centimetara prije nego u srednjoj zoni. Srednja zona je pod nagibom od  $35^\circ$  te se kretanje infiltrirane vode usmjerava prema donjoj zoni te tako usporava proces infiltracije vode.



Slika 25: Volumni sadržaj vode na dubini 24 cm u svim zonama

Na slici 26 prikazan je sadržaj vode u usporedbi sa matričnim potencijalom na srednjem (M) dijelu modela. Na lijevoj ordinati prikazan je volumni sadržaj vode u materijalu dok je na desnoj ordinati prikazan matrični potencijal. Pri  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$  materijal je u potpunosti saturiran. Iz grafikona se kao kod promjene temperature u prethodno prikazanom grafu može protumačiti vremensko infiltriranje vode prema dnu modela.

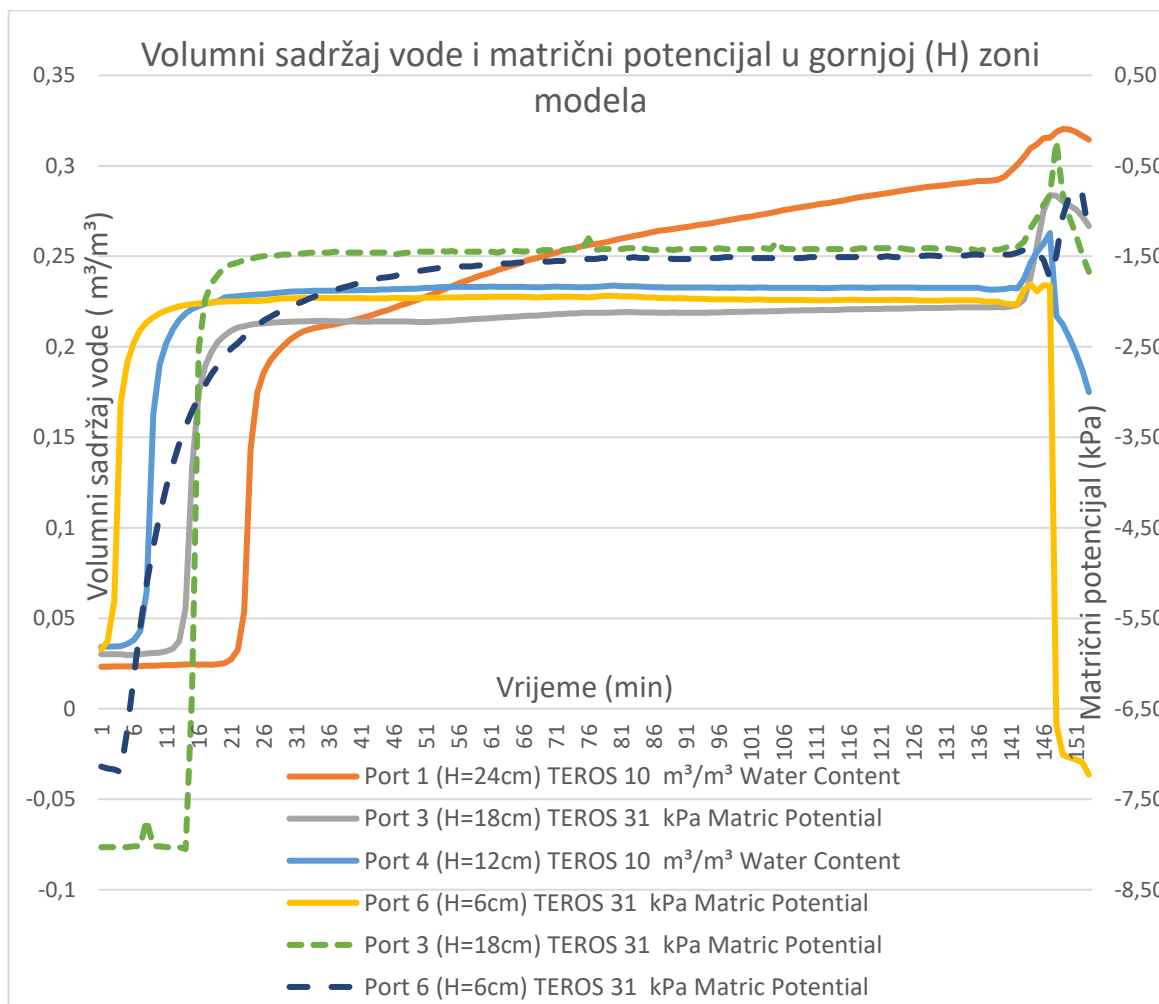
Na desnoj ordinati prikazane su vrijednosti matričnog potencijala na sensorima Teors 31 koji se nalaze na dubini od 6 i 18 cm. Početni uvjeti matričnih potencijala su jednaki u oba senzora na obje dubine od  $-7,5 \text{ kPa}$ . Potencijal vode u tlu ili matrični potencijal odnosi se na energiju koja je potrebna da se voda izvuče iz tla. Početni uvjeti materijala imaju negativan matrični potencijal. Potencijal je negativan jer se senzor nalazi u nezasićenom tlu. Kako se voda infiltrira u ugrađeni materijal tako se i vrijednost potencijala približava nuli. Negativni matrični potencijal u tlu naziva se sukcijska. Porastom vode u materijalu, tlo postaje zasićenije odnosno više se pora ispunjava vodom. Kako voda ulazi tlo i zasićuje pore, sukcijska se smanjuje jer je manje energije potrebno za zadržavanje vode u tlu. Kada tlo postane potpuno zasićeno, sukcijska pada u nulu. Pomi tlakovi su povezani sa matričnim potencijalom jer kako se tlo zasićuje i pomi tlakovi postaju pozitivni jer voda u porama počinje vršiti pritisak na čestice tla.



*Slika 26: Volumni sadržaj vode i porni pritisak u srednjoj (M) zoni modela*

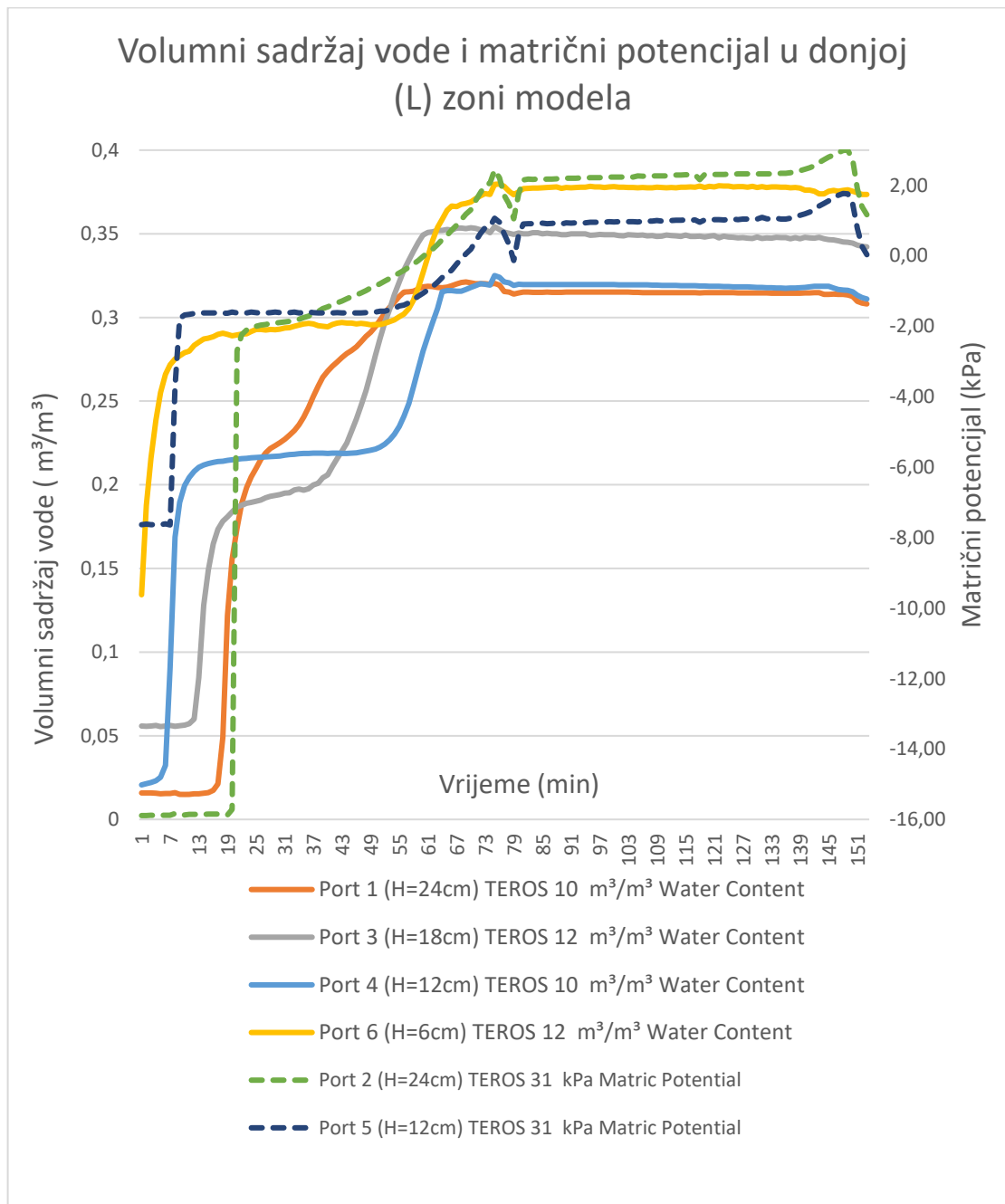
U poglavlju 5 na slici 20 (a) i 20 (b) prikazane su prve pukotine u 71. i 73. minuti ispitivanja. Na priloženom grafičkom prikazu rezultata na slici 24 vidljivo je da je u tim minutama volumni sadržaj vode dosegao maksimum. Porni pritisci na dubini do 12 cm iz negativnog stanja pritisaka odnosno sukcije prelaze pozitivno stanje čime se značajno izgubila posmična čvrstoća materijala te dolazi do početnog sloma koji se retrogresivno širi.

Na slici 27 prikazan je sadržaj vode u usporedbi sa matičnim potencijalom na gornjem (H) dijelu modela. Iz grafikona vidljivo je da gornji dio modela, kruna našeg fizičkog modela nikada nije bila u potpunosti potopljena te samim time nije bila ni potpuno saturirana osim najniže promatrane kote na dubini od 24 cm. Vidljivo je da narančasta krivulja prelazi  $0,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ . To se može objasniti time što se voda iz sprinklera infiltrira u tlo na gornjoj zoni te nastavlja strujiti niz kosinu prema srednjem dijelu te iz srednjeg prema donjem dijelu modela na kojem se održava konstanta razina podzemne vode dovoljna da nožica modela ostane potopljena. Također vidimo porast matičnog potencijala i pornog pritiska u materijalu sa povećanjem udjela vode u materijalu. Senzori pri kraju ispitivanja očitavaju neobična mjerenja koja se objašnjavaju erozijom materijala te izlaganje senzora atmosferskom utjecaju.



Slika 27: Volumni sadržaj vode i matični potencijal u gornjoj (H) zoni modela

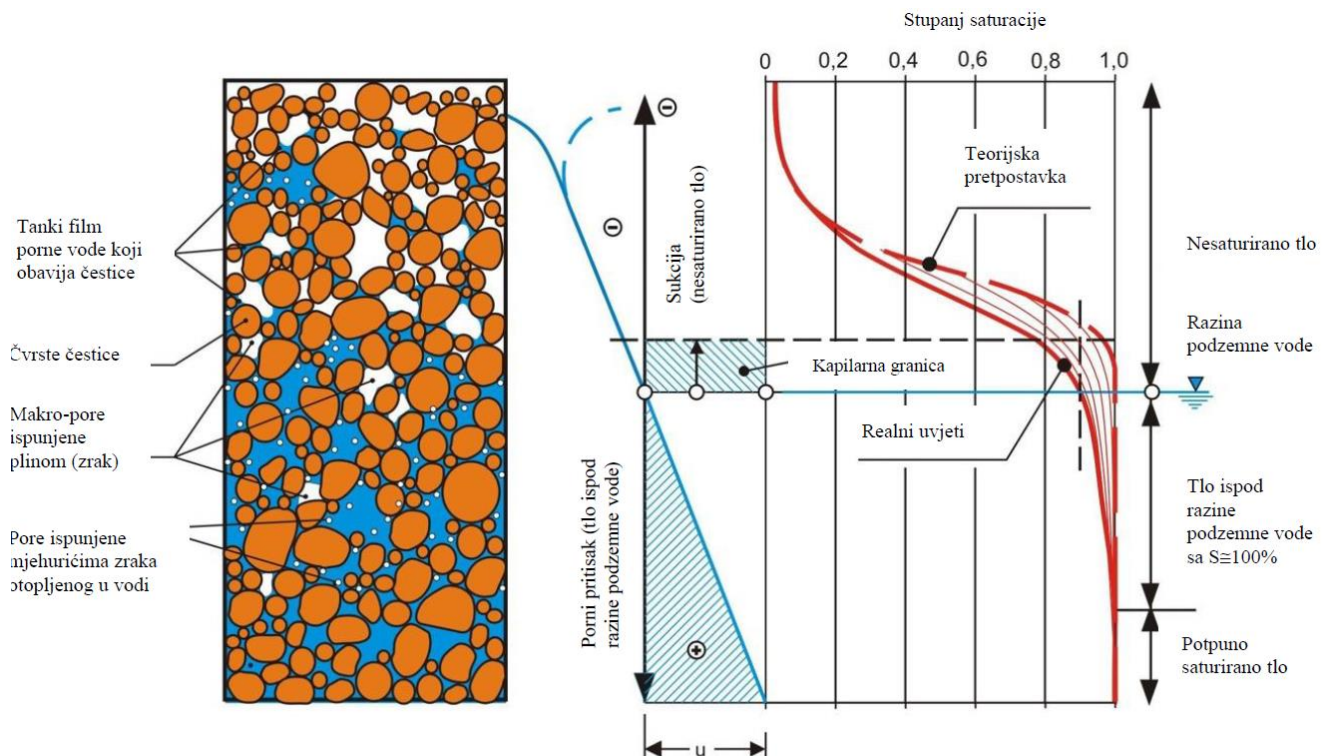
U donjoj (L) zoni, na slici 28 vidljiva je identična krivulja matrične suckije pri dubini od 12 cm i 24 cm u trenutku kada se voda infiltrira do senzora. Infiltracija vode do dubine od 6 cm u donjoj zoni trajala je 7 minuta, a do dubine od 24 cm 20 minuta. Ovaj graf još jednom dokazuje najbržu infiltraciju vode u donjoj zoni.



Slika 28: Volumni sadržaj vode i matrični potencijal u donjoj (L) zoni modela

## 7. REKONSTRUKCIJA RAZVOJA RAZINE PODZEMNE VODE U UMANJENOM MODELU KLIZIŠTA

Dobivenim mjerenjima na sensorima moguće je odrediti trenutak kada voda dolazi u ravninu sa ugrađenim sensorima. Taj trenutak označava nam najviša horizontalna dijagonala dijagrama. Za točno određivanje visine vode u bilo kojem trenutku možemo iskoristiti mjerenja pornih pritisaka putem senzora Teros 31. Kao što je u poglavlju 4 objašnjeno, porni pritisak odnosno matrična sukcija u nesaturiranom materijalu biti će negativan. Prilikom infiltracije vode u materijal porni pritisak teži ka pozitivnom. Nakon podizanja razine podzemne vode iznad promatrane točke, odnosno kada se porni pritisak očitava u pozitivnoj vrijednosti, tlo je potpuno saturirano, a mjerači vlažnosti očitavaju saturiranu maksimalnu volumetrijsku vlažnost. Slika 24 prikazuje distribuciju pornih pritisaka u ovisnosti o stupnju saturacije.



Slika 29: Distribucija pornih pritisaka i stupnja saturacije u nesaturiranom i saturiranom tlu [14]

Krivulja retencije vode jedna je od ključnih funkcija u mehanici nesaturiranih tala. Krivulja retencije vode predstavlja odnos između sadržaja vode u tlu i matrične sukcije. Prilikom smanjenja vlažnosti, materijal zadržava veću količinu vode nego prilikom povećanja vlažnosti materijala. Razlika koja nastaje prilikom vlaženja i sušenja materijala posljedica je različitih fenomena koje nazivamo „hidraulička histereza“. Za rješavanje inženjerskih problema infiltracije vode u nesaturirano tlo, važno je poznavanje retencijske krivulje tla. Za Geotehničko projektiranje koje osigurava točne rezultate ključno je poznavanje svojstava tla i parametara tečenja vode.

Rekonstrukcija podzemne vode prikazana je uzdužnim presjekom modela. Razina podzemne vode prikazana je u određenim vremenskim intervalima na uzdužnom modelu, točnije, početno stanje, nakon 30 minuta opterećenja kišom, pojavom prve nestabilnosti ( 74. minuta ), 100. minuta ispitivanja te 145. minuta ispitivanja u trenutku otvaranja svih mlaznica simulatora. U tablici 5 prikazana su dobivena očitavanja senzora u željenom trenutku ispitivanja. Iz rezultata, kao i iz grafikona koji su prikazani u prethodnom poglavlju, može se zaključiti da senzori Teros 10 i Teros 12 mogu mjeriti promjenu volumetrijskog sadržaja vode, no senzor Teros 31 i dalje mjeri negativni porni pritisak. To tumačimo tako da je materijal vlažan, ali ne i saturiran. U 30-oj minuti vidljiva je sukcija na svim presjecima i na svim dubinama ugrađenog materijala. To znači da nakon 30 minuta od početka ispitivanja voda još nije iznad senzora koji je postavljen na dubini  $H=24$  cm.

Ključan trenutak u ispitivanju je pojava prve nestabilnosti u 74. minuti kao što je prikazano slikom 22 (a). U 72. minuti ispitivanja na modelu se bilježi potapanje nožice, nakon čega ubrzo dolazi do pojave prve nestabilnosti dvije minute kasnije kao što je prikazano slikom 22 (a). Voda se u nožici modela najprije podiže djelovanjem dvaju efekta. Prvi efekt je dotjecanje vode iz viših dijelova modela (M) i (H). Voda se infiltrira na gornjem i srednjem dijelu modela do nepropusne plohe. Po kontaktu nepropusne plohe voda otječe gravitacijski u nožicu modela. Drugi efekt je površinsko otjecanje vode sa srednjeg (M) dijela modela.



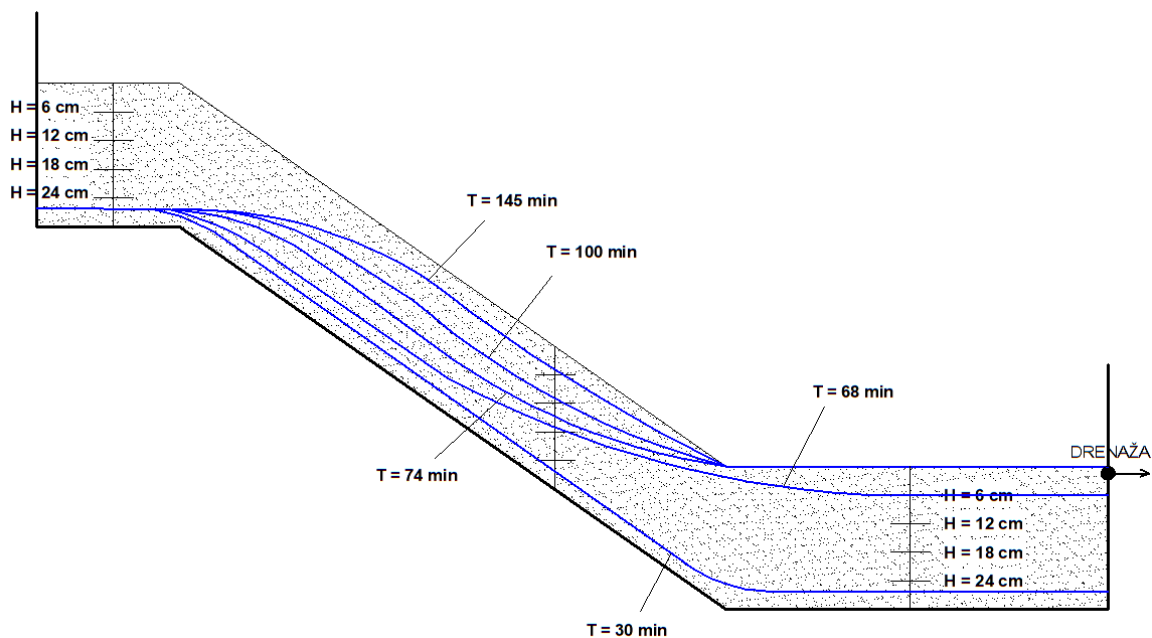
Tablica 5: Tablica mjerenja senzora u određenom intervalu

DONJA ZONA (L)						
Vrijeme (min)	Port 1 (H=24cm)	Port 2 (H=24cm)	Port 3 (H=18cm)	Port 4 (H=12cm)	Port 5 (H=12cm)	Port 6 (H=6cm)
	TEROS 10	TEROS 31	TEROS 12	TEROS 10	TEROS 31	TEROS 12
	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	kPa Matric Potential	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	kPa Matric Potential	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content
30	0,225	-1,89	0,194	0,217	-1,61	0,293
74	0,320	2,06	0,351	0,319	0,84	0,373
100	0,315	2,24	0,350	0,320	0,96	0,378
145	0,314	2,80	0,346	0,319	1,56	0,376

SREDNJA ZONA (M)						
Vrijeme (min)	Port 1 (H=24cm)	Port 2 (H=18cm)	Port 3 (H=18cm)	Port 4 (H=12cm)	Port 5 (H=6cm)	Port 6 (H=6cm)
	TEROS 10	TEROS 10	TEROS 31	TEROS 10	TEROS 10	TEROS 31
	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	kPa Matric Potential	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	kPa Matric Potential
30	0,189	0,205	-1,32	0,233	0,224	-1,59
74	0,298	0,318	0,26	0,304	0,268	-1,05
100	0,287	0,305	0,98	0,315	0,307	-0,23
145	0,287	0,301	1,72	0,373	0,381	0,36

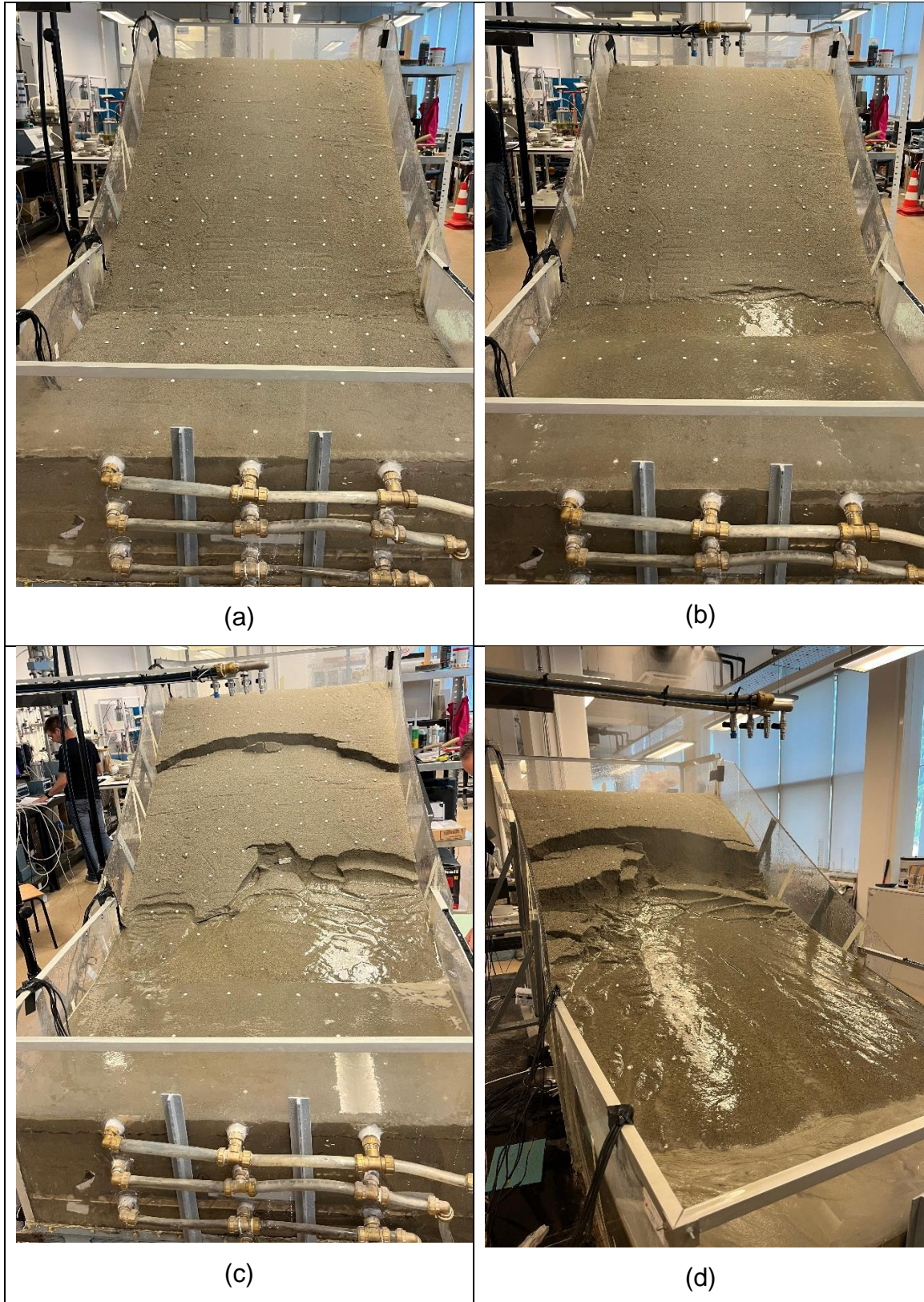
GORNJA ZONA (H)						
Vrijeme (min)	Port 1 (H=24cm)	Port 2 (H=18cm)	Port 3 (H=18cm)	Port 4 (H=12cm)	Port 5 (H=6cm)	Port 6 (H=6cm)
	TEROS 10	TEROS 10	TEROS 31	TEROS 10	TEROS 10	TEROS 31
	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	kPa Matric Potential	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> Water Content	kPa Matric Potential
30	0,204	0,214	-1,48	0,230	0,227	-2,06
74	0,255	0,218	-1,43	0,233	0,228	-1,54
100	0,272	0,219	-1,42	0,233	0,226	-1,53
145	0,312	0,256	-1,08	0,252	0,231	-1,45

Na slici 30 prikazana je razina podzemne vode u određenom intervalu ispitivanja modela.



Slika 30: Rekonstrukcija podzemne vode u modelu

Vidljivo je brzo podizanje razine podzemne vode u nožici modela. U trenutku kada na sensorima po svim dubinama imamo prisutnost vode, voda počinje nesmetano teći kroz model do nožice gdje se zaustavlja te potapa nožicu. Prikazan je porast podzemne vode u odnosu na 30. i 68. minutu ispitivanja. Potapanjem nožice dolazi do podizanja razine podzemne vode u srednjem segmentu modela pri čemu dolazi do prve nestabilnosti. Smanjenje efektivnog naprezanja ( $\sigma'$ ) odnosno sile koja drži tlo u cjelini te sila koja je otporna na klizanje. Efektivna su naprezanja dio naprezanja koji prenose čvrste čestice ili skelet tla. Kako se sukcijska smanjuje prirastom vode u tlu, smanjuje se efektivno naprezanje u tlu što dovodi do smanjenja posmične čvrstoće i stabilnosti tla. Efektivno naprezanje ( $\sigma'$ ) smanjuje se porastom porednog pritiska jer ga definiramo kao razliku ukupnog naprezanja ( $\sigma$ ) i porednog tlaka ( $u$ ). Smanjenje efektivnog naprezanja smanjuje trenje unutar tla te se samim time smanjuje i stabilnost kosine. Slika 31 prikazuje napredak nestabilnosti u ovisnosti sa povećanjem vode prikazane na slici 30.



Slika 31: Prikaz modela prilikom ispitivanja: (a) nakon 30 minuta, (b) nakon 76 minuta, (c) nakon 100 minuta, (d) nakon 145 minuta



Djelovanjem podzemne vode u kosini dolazi i do povećanja pornog pritiska. Kako se voda infiltrira u nožicu klizišta, porni pritisak u zasićenim dijelovima modela raste. Povećanje pornog pritiska smanjuje koheziju čestica tla. Kohezija čestica tla smanjuje se jer je infiltrirana voda ispunila prostor između čestica tla te ih gura odnosno razdvaja. Povećanjem pornog pritiska smanjuje se otpornost tla na smicanje jer direktno djeluje na ranije spomenuto efektivno naprezanje ( $\sigma'$ ).

Potapanjem nožice i djelovanjem podzemne vode uz kosinu klizišta dolazi do nestabilnosti kosine. Nožica kosine nosi najveći dio mase tla iznad sebe. Kako voda napreduje prema kosini i podiže se iznad nožice, tlo postaje sve teže za nositi, a istovremeno dno kosine postaje sve slabije gubitkom efektivnog naprezanja i povećanjem pornih pritisaka. Tlo ugrađeno u model ne može podnijeti vlastitu težinu zbog djelovanja vode te dolazi do sloma dok gravitacija uzrokuje klizanje uzorka niz padinu.

Povećanjem razine podzemne vode te potpuna saturacija nožice uzrokuje stvaranje klizne površine. Klizna površina najčešće je sloj unutar tla koji ima smanjenu čvrstoću te nudi najmanji otpor smicanju. Djelovanjem povećanja pornih pritisaka i smanjenjem efektivnog naprezanja, tlo na kliznoj površini gubi stabilnost što omogućuje cijeloj masi iznad te površine da se pokrene. Slika 32 prikazuje slom gdje se čitava kosina pomaknula po formiranoj kliznoj plohi.



Slika 32: Bočni prikaz sloma kosine

Kada se nožica klizišta u potpunosti saturirala i izgubila stabilnost, djelovanje vode nastavilo je smanjivati otpornost uzvodno u tijelu klizišta. Gubitak stabilnosti u donjem dijelu kosine uzrokuje ubrzanje klizanja viših slojeva tla. Dolazi do povećanja momenta mase koja se pokreće što dovodi do progresivnog sloma cijelog klizišta. Kombinacija svih navedenih faktora – povećanje porednog pritiska, smanjenje efektivnog naprezanja, gubitak nosivosti i povećanje sile smicanja uzrokuje da tlo postane nestabilno i sklono klizanju. Trenutak kada otpor tla više nije dovoljan da se suprotstavi silama gravitacije, dolazi do sloma klizišta. Voda igra ključnu ulogu u destabilizaciji tla, a povećana težina zasićenog tla, smanjenje trenja unutar tla, te povećanje sile smicanja uzrokuju slom klizišta.



*Slika 33: Napredovanje sloma kosine*

## 8. ZAKLJUČAK

Voda se u nožici modela najbrže podiže zbog dva efekta. Prvi je dotok vode iz gornjih dijelova modela i njena infiltracija unutar njega. U određenom trenutku, voda dopijeva do nepropusne podloge, te se kreće duž kontakta te površine i odlazi u donji dio modela. Drugi razlog je direktna infiltracija vode kroz tlo. Kao rezultat dotoka vode u nožicu modela, može doći do pojave slobodne vode, odnosno njenog podizanja iznad površine tla u segmentu L. To se događa jer materijal u tom trenutku ne može apsorbirati toliku količinu vode, no to ne znači da je materijal potpuno zasićen. U tom trenutku vlažnost materijala može biti ispod saturirane vrijednosti te je potrebno vrijeme kako bi se voda infiltrirala do dna modela. Voda također može i površinski otjecati sa srednjeg (M) dijela modela.

Iz priloženih grafikona na slikama 26,27,28 može se očitati volumetrijski sadržaj vode. Ako promatramo senzor Teros 10 postavljen na dnu vetrikale zone modela, odnosno na dubini od 24 centimetara, vidljivo je da se voda najbrže infiltrirala u donju zonu nakon 19 minuta, zatim u gornju nakon 22 minute pa u srednju zonu modela nakon 27 minuta. Srednja zona nalazi se na kosini te podzemna voda struji prema dnu modela.

Cilj ispitivanja je prikazati utjecaj vode na materijal te promjenu svojstva materijala saturacijom vode. U modelu dolazi do pukotina koje dovode do nestabilnosti i sloma materijala. Kiša povećava vlažnost tla čime dolazi do redistribucije težine materijala. Istovremeno sa povećanjem vlažnosti dolazi i do porasta pornih tlakova. Porast pornih tlakova smanjuje efektivno naprezanje čime se smanjuje čvrstoća tla te dolazi do sloma.

Ovim radom prikazani su rezultati i iskustva u radu na fizičkom modelu klizišta opterećenog simuliranom kišom u 1g uvjetima. Kako bi se približila važnost i shvatila problematika stabilnosti kosina obrađeni su osnovni pojmovi vezani za klizišta i stabilnost kosina. Klizišta su jedno od najkompleksnijih, a pojavom sve većih ekstrema oborina ujedno i jedna od najpopularnijih tema u svijetu geotehničkog inženjerstva. Provedeni eksperiment omogućio je detaljno praćenje utjecaja oborina na klizište, što je rezultiralo jasnim uvidom u procese koji dovode

do pojave klizanja. Simulacija kiše izazvala je postupni porast vlažnosti tla, što je, uz redistribuciju mase i povećanje pornih tlakova, dovelo do smanjenja efektivnog naprezanja i posljedičnog gubitka čvrstoće tla. Ovi procesi su na kraju uzrokovali nastanak pukotina i rotacijskog klizišta u nožici modela. Rezultati istraživanja potvrđuju da su infiltracija vode i porast pornih tlakova ključni faktori koji utječu na stabilnost kosina, osobito u uvjetima povećanih oborina. Razumijevanje ovih procesa je od velike važnosti za prevenciju i upravljanje klizištima u stvarnim uvjetima. Mehanizmi koji dovode do aktiviranja klizišta u kontekstu hidrogeologije su vrlo složeni jer svako klizište ima jedinstvenu shemu kretanja podzemnih voda. Praćenje izvora i toka podzemnih voda u klizištima često je izazovno zbog toga što se hidrogeološki procesi odvijaju pod zemljom, što otežava direktno promatranje. Osim toga, propusnost tla unutar klizišta, koja uvelike utječe na ponašanje podzemnih voda, može biti vrlo varijantna. Kada se posumnja na stabilnost kosine, ključno je provesti detaljnu analizu ukupne stabilnosti i, ako je potrebno, implementirati odgovarajuće mjere za sanaciju. Najčešće mjere za stabilizaciju klizišta uzrokovanih porastom razine podzemnih voda uključuju izgradnju drenažnih sustava. Međutim, zbog različite propusnosti tla i stijena na različitim lokacijama, projektiranje drenažnog sustava može biti vrlo složen zadatak.

Iz prikupljenih podataka prilikom ispitivanja može se zaključiti da je saturacija tla uglavnom primarni uzrok pojava klizanja. U stvarnosti se klizanje događa zbog promjene režima podzemne vode te nemogućnosti brzog otjecanja infiltrirane vode kroz kosinu što uzrokuje porast pornih pritisaka u tlu. Destabilizacija nožice kosine i visoka razina infiltrirane vode jedan je od glavnih uzroka klizanja. Izvedbom drenova može se utjecati na razinu podzemne vode te doprinijeti stabilnosti kosine. Izradom fizičkih modela može se predvidjeti ponašanje kosine u stvarnosti. Treba se truditi što više poštovati zakone sličnosti ne bi li i rezultati bili točni. Iz provedenog eksperimenata može se zaključiti da postepeno povećanje razine podzemne dovodi do bržeg smanjenja kohezije unutar tla. Ovo smanjenje kohezije uzrokuje bržu pojavu pukotina koje, nakon određenog vremena, narušavaju stabilnost kosine i dovode do klizanja tla.

## 9. LITERATURA

- [1] Cornelia, S. ; Effect of Groundwater on Landslide Triggering, Switzerland, 2011
- [2] Lynn M. Highland, Bobrowsky P.; Landslide Handbook - A Guide to Understanding Landslides, 2008, 05-25,63.
- [3] Balzano B., Tarantino A.,Ridley A.; Analysis of a rainfall-triggered landslide at rest and be thankful in Scotland E3S Web Conf. 9 1 6, 216, 1-6.
- [4] Varnes J. D., Landslide Types and Processes, Chapter 3, 1996., 1-25
- [5] Peranić J., Čeh N., Arbanas Ž.; The Use of Soil Moisture and Pore-Water Pressure Sensors for the Interpretation of Landslide Behavior in Small-Scale Physical Models, Smart Sensors and Technologies for Natural Hazards Mitigation and Disasters Managements, 2022, 5-20.
- [6] Arbanas, Ž. (2024): Tipovi i procesi nastanka nestabilnosti u kosinama, predavanje iz kolegija Stabilitnost kosina, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet
- [7] Peranić, J., Arbanas, Ž., Vivoda Prodan, M.: Small-scale models. Proc. Of the 5th ReSyLAB, Građevinaki fakultet u Rijeci, Rijeka, 2022, 171-200 ,213-217
- [8] METRIC grup, Maunual Web Teros10, 2018. – 2021.
- [9] METRIC grup, Maunual Web Teros12, 2018. – 2021.
- [10] METRIC grup, Maunual Web Teros31, 2018. – 2021.
- [11] METRIC grup, Maunual Web ZL-6 data logger, 2018. – 2021.
- [12] Lu, L., Likos, W. J.;Unsaturated soil mechanics, J. Wiley, New Jersey, 2004
- [13] Suzuki,N.; Unsaturated soil, 2000, 147
- [14] <http://blog.hj-koehler.de/boden-unter-wasser> (pristup 10.09.2024.)