

# Stabilnost kosina u umanjenom modelu klizišta

---

**Fabijanić, Toni**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*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:157:511076>

*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 U RIJECI**

**Toni Fabijanić**

**STABILNOST KOSINA U UMANJENOM MODELU KLIZIŠTA**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2021.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Diplomski sveučilišni studij Građevinarstvo**

**Smjer: Hidrotehnika**

**Kolegij: Stabilnost kosina**

**Toni Fabijanić**

**JMBAG: 0114027867**

**STABILNOST KOSINA U UMANJENOM MODELU KLIZIŠTA**

**Diplomski rad**

**Rijeka, rujan 2021.**

Naziv studija: **Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

Tema diplomskog rada

**STABILNOST KOSINA U UMANJENOM MODELU KLIZIŠTA**

**STABILITY OF SLOPES IN SCALED LANDSLIDE MODEL**

Kandidat: **TONI FABIJANIĆ**

Kolegij: **STABILNOST KOSINA**

Diplomski rad broj: **H-2021-23**

**Zadatak:**

Klizišta predstavljaju jedan od najznačajnijih geohazarda i izazivaju ogromne materijalne štete i veliki broj ljudskih žrtava u cijelom svijetu. Istraživanje pokretanja i ponašanja klizišta predstavlja jedan od značajnih dijelova istraživanja u okviru znanosti o klizištima. Jedan od načina istraživanja predstavlja i fizičko modeliranje klizišta u laboratoriju koje omogućuje gotovo u cijelosti oponašanje uvjeta u kojima klizišta nastaju u prirodi. Fizičko istraživanje klizišta provodi se na Građevinskom fakultetu u Rijeci u okviru Projekta Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja (ModLandRemSS). financiranom od Hrvatske zaklade za znanost. U okviru ovog diplomskog rada potrebno je na podacima dobivenim na ispitivanjima na fizičkom modelu u okviru Projekta provesti analize stabilnosti kosine i nastalog klizišta u uvjetima djelovanje umjetne kiše. Na temelju registriranih veličina pornih pritisaka, sadržaja vlage sukcije i drugih, analizirati pokretanje i razvoj klizišta. Rad treba sadržavati dijelove: o pojavama klizišta, o modelskim ispitivanjima klizišta, o mjernoj opremi koja se koristi za promatranje fizičkih modela klizišta; o opremi i software-u koji se je koristio u provedbi pokusa te analize stabilnosti kosine tijekom pokusa.

**Tema rada je uručena: 24. veljače 2021.**

**Komentor:**

dr. sc. Josip Peranić,  
mag. ing. aedif.

**Mentor:**

prof. dr. sc. Željko Arbanas,  
dipl. ing. građ.

## ***IZJAVA***

Diplomski rad sam izradio samostalno, u suradnji s mentorom i komentorom i 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.

---

Toni Fabijanić

U Rijeci, 17. rujna 2021.

## 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, 10. rujan 2021.

Mentor:

prof.dr.sc. Željko Arbanas,  
dipl. ing. građ.

## ZAHVALA

*Zahvala Hrvatskoj zakladi za znanost koja je omogućila korištenje dijela opreme kroz projekt Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja (ModLandRemSS).*

*Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Željku Arbanasu na vodstvu pri izradi diplomskog rada i prenesenom znanju tijekom svih godina studiranja.*

*Veliko hvala komentoru dr.sc. Josipu Peraniću na izdvojenom vremenu, pomoći i danim savjetima i smjernicama prilikom izrade ovog diplomskog rada.*

*Posebna zahvala obitelji na podršci i mogućnosti da se sve ovo ostvari.*

## SAŽETAK

Klizišta spadaju u najvažnije, najopasnije, a ujedno i najčešće geohazarde na svijetu. Zadatak ovog diplomskog rada je provedba laboratorijskog ispitivanja umanjenog modela klizišta koje je simulirano kišom. Ispitivanje se provodi na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci u sklopu projekta Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja (ModLandRemSS). Osim što je znanstveno korisno, prikupljanje podataka o klizištima korisno je i za procjenu opasnosti i rizika od pojave klizišta. Izbor mjerne opreme i tehnike u umanjenom statičkom modelu klizišta temelji se na pozitivnim saznanjima iz prakse vezanim za upotrebu istih na stvarnim klizištima. Diplomski rad daje uvid na utjecaj vlažnosti i pornih pritisaka na destabilizaciju kosine i prikazuje zaključke koji su uslijedili iz analiza rezultata dobivenih iz podataka sa mjernih uređaja.

**Ključne riječi:** stabilnost kosina, umanjeni model klizišta, mjerenja, vlažnost, porni pritisci, analize

## ABSTRACT

Landslides are among the most important, most dangerous, and at the same time the most common geohazards in the world. The task of this master's thesis is to conduct a laboratory test of a scale model of a landslide simulated by rain. The test is carried out at the Faculty of Civil Engineering, University of Rijeka as part of the project Physical modeling of the behavior of structures for landslide remediation in the conditions of static and seismic actions (ModLandRemSS). In addition to being scientifically useful, the collection of landslide data is also useful for assessing the hazards and risks of landslides. The choice of measuring equipment and techniques in a reduced static model of landslides is based on positive knowledge from practice related to their use on actual landslides. The thesis gives an insight into the influence of moisture and pore pressures on the destabilization of the slope and presents the conclusions that followed from the analysis of the results obtained from the data from the measuring devices.

**Key words:** stability of slopes, scaled landslide model, measurements, moisture, pore pressure, analysis



# SADRŽAJ

## POPIS TABLICA

## POPIS SLIKA

1. UVOD .....	1
2. KLIZIŠTA .....	2
2.1. Elementi i dimenzije klizišta .....	2
2.2. Klasifikacija klizišta .....	5
3. STABILNOST UMANJENJIH MODELA KLIZIŠTA KOJE SE SIMULIRAJU KIŠOM .....	11
4. PLATFORMA ZA ISPITIVANJE U STATIČKIM UVJETIMA OPTEREĆENJA ..	16
4.1. Mjerna oprema .....	25
4.1.1. Mjerenje vlažnosti i pornih pritisaka vode u tlu .....	27
5. MJERENJA IZ EKSPERIMENATA I REZULTATI NUMERIČKIH MODELA.....	34
6. ZAKLJUČAK .....	59
7. LITERATURA I IZVORI.....	61

## POPIS TABLICA

Tablica 1: Popis mjerne opreme .....	27
Tablica 2: Specifikacije senzora TEROS 10 .....	29
Tablica 3: Specifikacije senzora TEROS 12 .....	29
Tablica 4: Specifikacije senzora TEROS 21 .....	31
Tablica 5: Specifikacije senzora TEROS 31 .....	32
Tablica 6: Specifikacije senzora TEROS 32 .....	33
Tablica 7: proračun masa za Kaoland .....	34

## POPIS SLIKA

Slika 1: Dijelovi klizišta [6] .....	4
Slika 2: Dimenzije klizišta [6] .....	5
Slika 3: Shematski prikaz prevrtanja [5] .....	6
Slika 4: Shematski prikaz odrona [5] .....	7
Slika 5: Shematski prikaz rotacijskog klizanja [5] .....	8
Slika 6: Shematski prikaz translacijskog klizanja [5].....	9
Slika 7: Shematski prikaz širenja tla [5].....	9
Slika 8: Shematski prikaz tečenja [5] .....	10
Slika 9: Shematski prikaz modela platforme za ispitivanje u statičkim uvjetima [9] .....	17
Slika 10: Shematski prikaz stola za statički model platforme [9] .....	18
Slika 11: Donja ploha statičke platforme [9].....	19
Slika 12: Srednja ploha statičke platforme [9] .....	19
Slika 13: Gornja ploha statičke platforme [9] .....	20
Slika 14: Dimenzije pleksiglas stijenki modela i otvori za drenažne elemente na prednjoj strani modela [9].....	21
Slika 15: Prikaz platforme za ispitivanje u statičkim uvjetima [9].....	22
Slika 16: Ugradnja mjerne opreme i materijala u statičkom modelu [9] .....	23
Slika 17: Umanjeni fizički model kosine sa ugrađenom mjernom opremom i mjernim točkama na površini modela [9] .....	24
Slika 18: Umanjeni fizički model pripremljen za početak ispitivanja [9].....	25
Slika 19: Shema statičkog modela s pripadajućom opremom [11] .....	26
Slika 20: Senzor TEROS 10 [22] .....	28
Slika 21: Senzor TEROS 12 [23] .....	28
Slika 22: Senzor TEROS 21 [24] .....	31
Slika 23: Senzor TEROS 31 [25] .....	32
Slika 24: Senzor TEROS 32 [26] .....	33
Slika 25: Fizikalni model pod kutom od 30° .....	35
Slika 26: Fizikalni model pod kutom od 35° .....	36
Slika 27: Prikaz modela prije pokusa 1 .....	38
Slika 28: Pojava prve pukotine u pokusu 1 .....	38
Slika 29: Prikaz pukotina tijekom pokusa 1 .....	39
Slika 30: Pojava sloma tla u pokusu 1 .....	39
Slika 31: Prikaz kretanja kliznog tijela u pokusu 1 .....	40
Slika 32: Površinsko ispiranje materijala .....	40
Slika 33: Prikaz klizne plohe i faktora sigurnosti za umanjeni model u pokusu 1 .....	41
Slika 34: Temperatura tla ugrađenog u modelu u pokusu 1 .....	41
Slika 35: Sadržaj vode i porni pritisak na L vertikalni .....	42
Slika 36: Sadržaj vode i porni pritisak na H vertikalni.....	42
Slika 37: Sadržaj vode na dubini od 6 cm .....	43
Slika 38: Sadržaj vode na dubini od 12 cm .....	43
Slika 39: Sadržaj vode na dubini od 18 cm .....	44
Slika 40: Sadržaj vode na dubini od 24 cm .....	44
Slika 41: Električna provodljivost materijala .....	45

Slika 42: Prikaz modela prije pokusa 2 .....	45
Slika 43: Prikaz prve pukotine u pokusu 2 .....	46
Slika 44: Prikaz nastanka nekoliko pukotina u pokusu 2 .....	46
Slika 45: Prikaz plohe sloma u pokusu 2.....	47
Slika 46: Kretanje kliznog tijela u pokusu 2 .....	48
Slika 47: Prikaz kliznog tijela i potopljene nožice modela u pokusu 2.....	49
Slika 48: Prikaz klizne plohe i faktora sigurnosti za umanjeni model u pokusu 2.....	49
Slika 49: Temperatura tla ugrađenog u modelu u pokusu 2 .....	50
Slika 50: Sadržaj vode i porni pritisak na L vertikali .....	51
Slika 51: Sadržaj vode i porni pritisak na M vertikali .....	52
Slika 52: Sadržaj vode i porni pritisak na H vertikali.....	53
Slika 53: Porni pritisak po vertikali .....	53
Slika 54: Sadržaj vode na dubini od 6 cm .....	54
Slika 55: Sadržaj vode na dubini od 12 cm .....	55
Slika 56: Sadržaj vode na dubini od 18 cm .....	55
Slika 57: Sadržaj vode na dubini od 24 cm .....	56
Slika 58: Električna provodljivost materijala .....	56
Slika 59: Grafički prikaz intenziteta oborina u funkciji vremena .....	57
Slika 60: Pozicije senzora u pokusu 1 .....	58
Slika 61: Pozicije senzora u pokusu 2 .....	58

## 1. UVOD

Zadatak ovog diplomskog rada je provedba laboratorijskog ispitivanja umanjenog modela klizišta koje je simulirano kišom. Najveći problemi svake pojedine kosine javljaju se prilikom porasta razine podzemne vode, koja onda utječe na stabilnost same kosine na način da postepeno dolazi do narušavanja stabilnosti unutar kosine, te dolazi do sloma same kosine. Zbog porasta razine vode, dolazi do saturacije materijala te kohezija unutar ugrađenog modela pomalo opada te se smanjuje faktor sigurnosti same kosine i dolazi do postepenog narušavanja stabilnosti i pojave sloma.

U radu će se opisati platforma za ispitivanje u statičkim uvjetima opterećenja. Također će se navesti mjerna oprema koja se koristila u ispitivanjima, te će se detaljnije opisati uređaje za mjerenje vlažnosti tla i uređaje za mjerenje pornih pritisaka u tlu.

Da bi se razumjelo problematiku stabilnosti kosina prvo treba znati ponešto o samim klizištima, stoga će se u radu navesti osnovne stvari koje je potrebno razumjeti o klizištima, njihove elemente i dimenzije, kao i klasifikaciju klizišta. Također za bolje razumijevanje tematike, spomenuti će se prethodno provedena istraživanja i iskustva vezana za stabilnost umanjenih modela klizišta koje se simuliraju kišom.

Osvrtom na rezultate provedenih ispitivanja u laboratorijskim uvjetima te uvidom u podatke sa mjernih uređaja, kao i zapažanjima i vođenjem bilješki prilikom samog ispitivanja moguće je doći do saznanja o mogućnostima pojave nestabilnosti u stvarnosti te je moguća razrada sustava preventivnih mjera kako bi se spriječila pojava nestabilnosti kosina i nastanak moguće katastrofe.

## 2. KLIZIŠTA

Klizišta spadaju u najvažnije, najopasnije, a ujedno i najčešće geohazarde na svijetu. Postoji više definicija pojma klizišta, pa su tako Varnes i Cruden (1996) definirali klizište kao „masu stijena, odlomaka ili zemlje koja klizi niz kosinu“ [1]. Poremećaji na padinama mogu se pripisati nekolicini čimbenika kao što su topografija, geološke značajke, klimatski uvjeti, vegetacija ili kombinacija navedenih čimbenika [2].

U prirodi su blage kosine uglavnom izgrađene od glinovitih i prašinih materijala, a strmije kosine od materijala veće čvrstoće, poput šljunka, pijeska, sipara itd. Kosina je u ravnoteži ako je na području kosine čvrstoća na smicanje veća od naprezanja smicanja. Ukoliko dođe do promjene u prirodnoj ravnoteži kosine, uzrokovane nekim poremećajem, te posmična naprezanja budu veća od čvrstoće tla, dolazi do sloma tla i javlja se klizanje po plohi sloma. Prestankom djelovanja vanjskih utjecaja koji su izazvali klizanje kao npr. promjena razine podzemne vode ili kada se uslijed promjene oblika kosine promijene naprezanja toliko da se ponovno uspostavi ravnoteža, klizanje kosine će prestati. [3]

Bilo da se radi o prirodnim ili umjetnim padinama, jedan od najčešćih problema geotehničkog inženjerstva je upravo stabilnost kosina. Pokretači prirodnog klizišta su potresi, vulkanske erupcije, kiše velikog intenziteta, dugotrajne oborine i brzo ili kasno topljenje snijega. Dva glavna čimbenika koji izazivaju klizišta su kiše i potresi [4]. Klizišta uzrokovana kišom jedna su od najvećih prirodnih opasnosti jer se obično dogode vrlo brzo i mogu napraviti veliku štetu. Osim pokretanja klizišta uzrokovanih prirodnim pojavama, ona se mogu pokrenuti utjecajem čovjeka kada se grade strme padine uz ceste ili brane. Klizišta mogu nastati bilo gdje na svijetu, ali ona se razlikuju u odnosu na lokalne i regionalne uvjete [5]. Tako se u tropskim uvjetima često javljaju plitka klizišta zbog obilnih kiša i infiltracije [2]

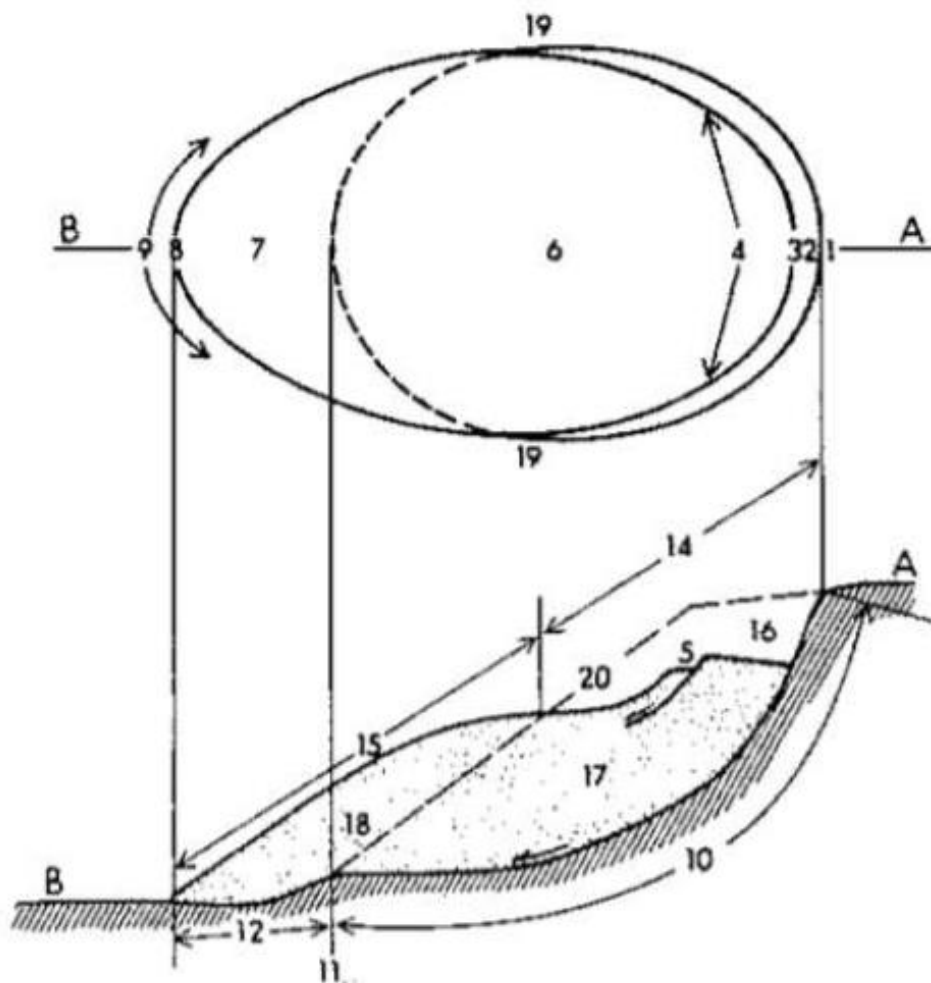
### 2.1. Elementi i dimenzije klizišta

Bez obzira na točnu definiciju koja se koristi ili vrstu klizišta o kojem se raspravlja, razumijevanje osnovnih dijelova tipičnog klizišta je vrlo korisno. Slika 1

prikazuje najčešće pojmove i položaj koji se koriste za opis jedinstvenih dijelova klizišta.

Elementi klizišta prikazani su brojevima [6]:

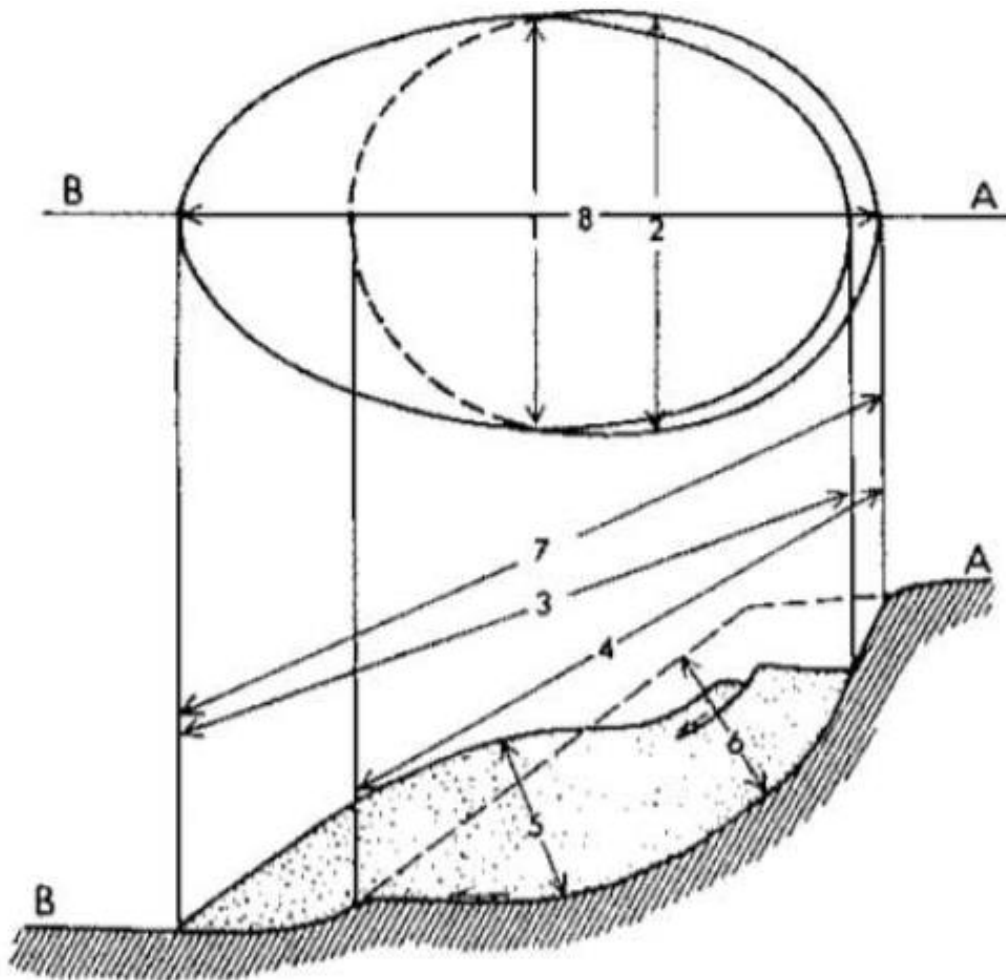
1. Kruna klizišta
2. Glavna vlačna pukotina ili škrapa
3. Vrh klizišta
4. Čelo klizišta
5. Donja vlačna pukotina ili škrapa
6. Glavno tijelo klizišta
7. Stopa ili podnožje klizišta
8. Dno klizišta
9. Završetak klizišta
10. Ploha sloma
11. Završetak plohe sloma
12. Ploha separacije
13. Pokrenuti materijal
14. Zona usjednutog materijala
15. Zona akumulacije
16. Usijedanje
17. Usjednuta masa
18. Akumulacija
19. Bok
20. Originalna površina tla



Slika 1: Dijelovi klizišta [6]

Na slici 2 prikazane su dimenzije klizišta. Svaka dimenzija klizišta označena je određenim brojem, a njihova terminologija dana je u nastavku [6]:

1. Širina pokrenute mase
2. Širina plohe sloma
3. Duljina pokrenute mase
4. Duljina plohe sloma
5. Dubina pokrenute mase
6. Dubina plohe sloma
7. Ukupna duljina
8. Duljina središnje linije



Slika 2: Dimenzije klizišta [6]

## 2.2. Klasifikacija klizišta

Postoji više načina klasifikacija klizišta, a one se temelje na specifičnim parametrima ovisno o tome koje bi informacije klasifikacija trebala donijeti. Klasifikacije su važne kako bi se izbjegli nesporazumi i strukturirali različiti procesi. Ovisno o namjeni, određene značajke klizišta su važne i stoga postoje brojne klasifikacije klizišta. Najviše klasifikacija klizišta temelji se na kriterijima poput vrste materijala, vrste kretanja, stopi kretanja, geometriji područja, zemljopisnom položaju, uzrocima, starosti, stupnju razvijenosti, stupnju poremećaja raseljene mase te stanju aktivnosti [1].

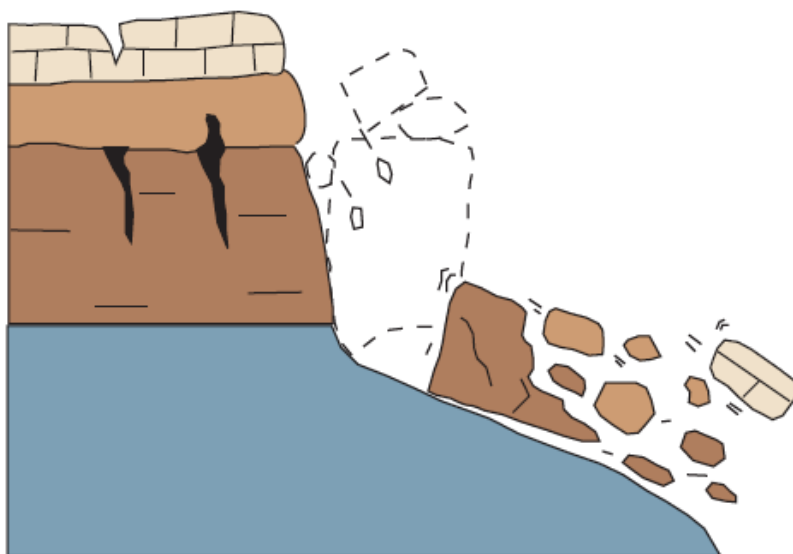
S obzirom na veličinu, oblik, aktivnost te brzinu i način kretanja, klizište je jedna jedinstvena pojava. Klasifikacija klizišta prema Varnesu (1978) je najčešće



korištena klasifikacija, a prema njoj su podijeljeni tipovi nestabilnosti po tipu kretanja na sljedeće [7]:

- Prevrtnanje
- Odron
- Klizanje
- Širenje tla
- Tok

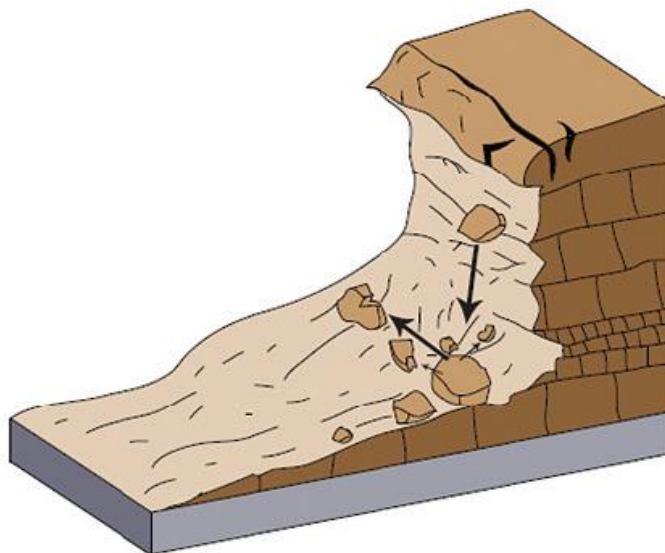
Prevrtnanje (slika 3) se definira kao rotiranje mase tla ili stijene prema naprijed, oko osi ili točke ispod težišta pomaknute mase. Ponekad se prevrtanje pokreće gravitacijom koja djeluje na nagib pomaknute mase, a ponekad vodom ili ledom u pukotinama u masi. Ovisno o geometriji površine razdvajanja, geometriji pokrenute mase i opsegu i orijentaciji kinematički aktivnih diskontinuiteta, prevrtanje može dovesti do klizanja ili odrona pomaknute mase. Brzine prevrtanja se kreću od izuzetno sporih do izuzetno brzih, s time da ponekad dolazi do ubrzavanja tijekom kretanja [6].



Slika 3: Shematski prikaz prevrtanja [5]

Odron (slika 4) započinje odvajanjem stijene ili tla uz površinu strme padine na kojoj se događa mali ili se uopće ne događa posmični pomak, a zatim dolazi do slobodnog pada materijala, te kotrljanja ili prevrtanja istog. Kretanje materijala je vrlo brzo do izuzetno brzo. Odronu uobičajeno prethodi malo klizanje ili prevrtanje koje izdvaja

istiskujući materijal iz neporemećene mase, osim kada se radi o kohezivnim tlima ili kamenju na vrhu litice koja je pod udarima valova ili u erodiranim obalama rijeka gdje dolazi do potkopavanja [6].

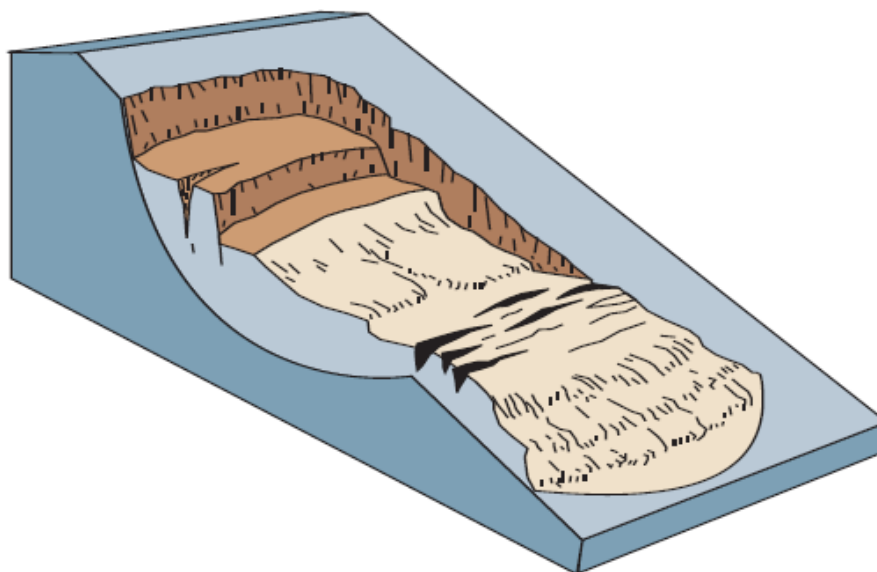


Slika 4: Shematski prikaz odrona [5]

Klizanje se definira kao gibanje tla ili stijenske mase po kosini koje se uglavnom pojavljuje na plohi sloma ili u relativno tankoj zoni posmičnog naprezanja. U početku se kretanje klizne mase ne događa istovremeno po cijeloj površini koja kasnije postane ploha sloma. Prvi znakovi gibanja tla manifestiraju se kao pukotine na izvornoj površini tla, duž kojih kasnije nastaje glavna vlačna pukotina ili škrapa. Klizanje s obzirom na geometriju klizne plohe može biti rotacijsko ili translacijsko [6].

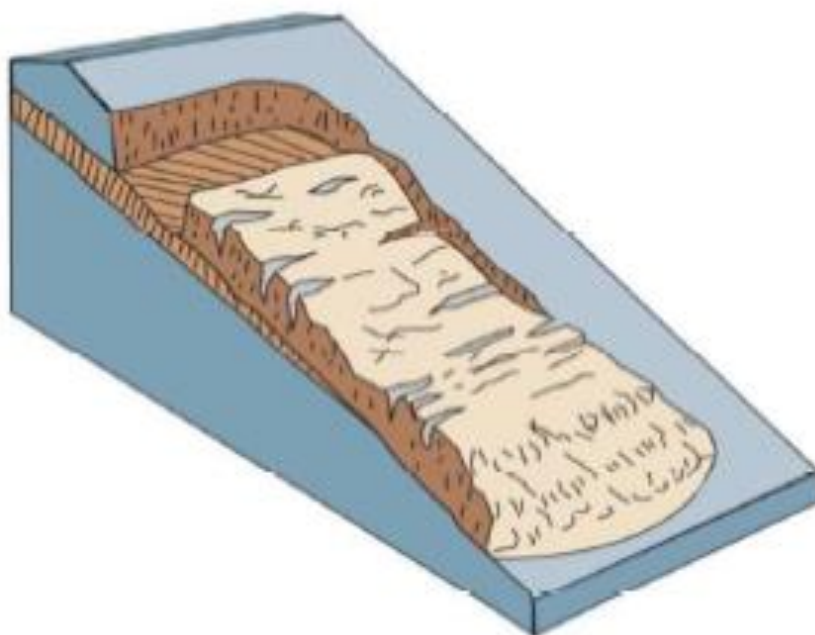
Klizište na kojem je ploha sloma zakrivljena prema gore (u obliku žlice) i klizanje je više-manje rotacijsko oko osi koja je paralelna s konturom kosine naziva se rotacijsko klizanje (slika 5). Pomaknuta masa može se pod određenim okolnostima kretati kao relativno koherentna masa duž plohe sloma s malo unutarnjih deformacija. Glava pomaknutog materijala može se pomicati gotovo okomito prema dolje, a gornja površina pomaknutog materijala može se nagnjati unatrag prema škarpi [5]. Brzine rotacijskog klizanja kreću se od izuzetno sporog (manje od 0,3 m svakih 5 godina) do umjereno brzog (1,5 m mjesečno) do brzog. Ovakav tip klizanja javlja se na kosinama s nagibom od 20 do 40 stupnjeva. Pokretači rotacijskog klizanja mogu biti intenzivne kiše ili brzo otapanje snijega koje mogu dovesti do zasićenja kosine i povećanja razine podzemne vode unutar iste. Također i brzi pad razine vode nakon poplava, kao i porast razine podzemne vode prilikom punjenja rezervoara ili porast razine vode u potocima, jezerima i rijekama, koji

uzrokuju eroziju na dnu kosina mogu inicirati rotacijsko klizanje. Osim prethodno navedenih načina, ovaj tip klizanja može nastati i kao posljedica potresa [5].



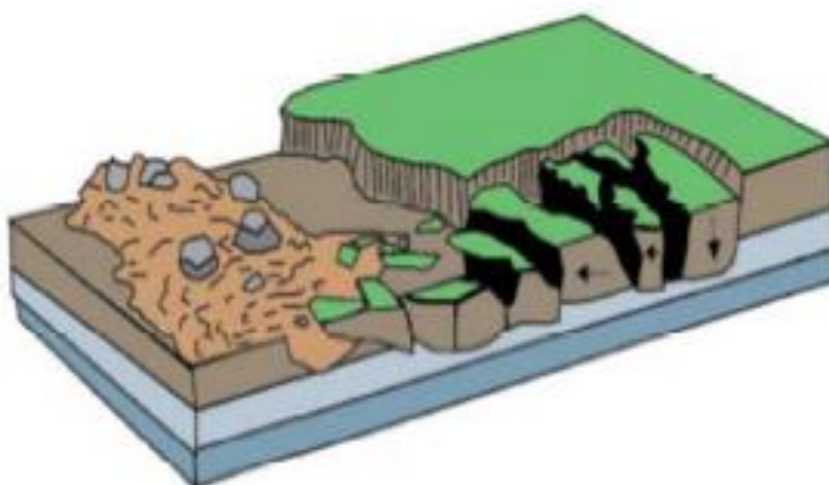
Slika 5: Shematski prikaz rotacijskog klizanja [5]

Translacijsko klizanje (slika 6) je jedna od najčešćih vrsta klizanja na svijetu i može se javiti u svim vrstama prirodnog okruženja i uvjeta. Klizna masa kod translacijskog klizanja giba se prema van i prema dolje, uzduž relativno ravne površine s malo rotacijskog kretanja ili nagiba prema natrag. Za razliku od rotacijskog klizanja koje teži uspostavljanju ravnoteže klizanja, ova vrsta klizanja može napredovati na znatnim udaljenostima ako je ploha sloma dovoljno nagnuta. Općenito ovaj tip klizanja je plići od rotacijskog klizanja. Ploha sloma kod ovog tipa klizanja ima omjer udaljenosti i duljine manji od 0,1 i može se kretati od malih klizišta do vrlo velikih regionalnih klizišta koja mogu biti široka kilometrima. Materijal kliznog tijela može se kretati od nekonsolidiranih, rastresitih tla do opsežnih kamenih blokova. Translacijsko klizanje često se događa duž geoloških diskontinuiteta kao što su spojevi, rasjedi, površine podloge ili kontakt između tla i stijene, a u sjevernim okruženjima klizište se može kretati uzduž sloja vječnog leda. Kretanje ovog tipa klizanja može biti vrlo sporo u početku (1,5 m mjesečno), ali mnoga su umjerene brzine (1,5 m dnevno) do krajnje brzih. S povećanjem brzine klizna masa ovog tipa klizanja može se raspasti i razviti u tok krhotina. Pokretači translacijskog klizanja su isti kao i prethodno navedeni kod rotacijskog klizanja [5].



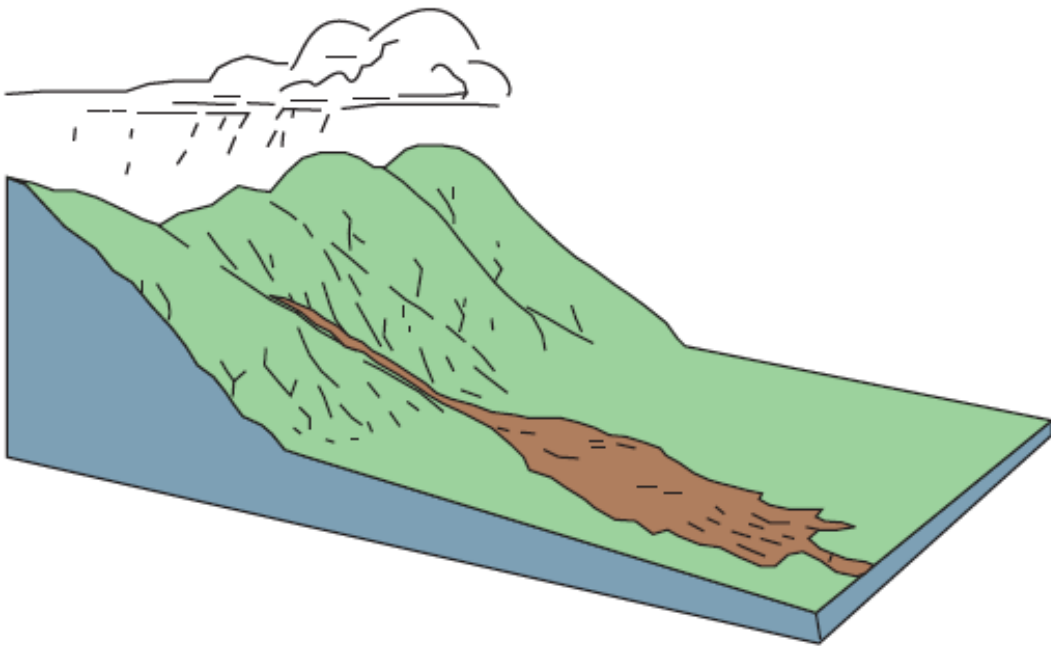
Slika 6: Shematski prikaz translacijskog klizanja [5]

Širenje tla (slika 7) odnosi se na širenje kohezivnog tla ili stijenske mase u kombinaciji sa slijeganjem krhotina kohezivnog materijala u mekši materijal. Ploha sloma kod ovog tipa nestabilnosti nije površina intenzivnog smicanja. Širenje tla može nastati likvefakcijom ili tokom mekšeg materijala. Prema Varnesu (1978) razlikuje se širenja tla tipično za stijene, koje se protezalo bez stvaranja prepoznatljive plohe sloma od pokreta u kohezivnom tlu koje prekrivaju likvefakcijske materijale ili materijale koji teku plastično [6].



Slika 7: Shematski prikaz širenja tla [5]

Tok (slika 8) je prostorno kontinuirano kretanje kod kojeg su površine smicanja usko raspoređene, kratkotrajne i obično nisu sačuvane, a raspodjela brzina u pokrenutoj masi slična je brzini viskozne tekućine [6]. Većina autora tokove definira kao mješavinu sedimenata i vode koja stvara gnojnicu koja se pod djelovanjem gravitacije kreće nizbrdo [8]. Pod procesom tečenja može biti obuhvaćeno više tipova nestabilnosti koji su spojeni u jedan [6].



Slika 8: Shematski prikaz tečenja [5]

### 3. STABILNOST UMANJENJIH MODELA KLIZIŠTA KOJE SE SIMULIRAJU KIŠOM

Istraživači su davno prepoznali da tok materijala i lavine mogu steći veliki dio svoje mase i razorne moći privlačeći materijal prilikom spuštanja niz strme padine i kanale. Različita terenska i laboratorijska ispitivanja procijenila su da se tečenjem materijala i lavinama zahvaća dio sedimenta korita [15].

Znatan broj istraživanja proveden je na malim plitkim klizištima u kontroliranim laboratorijskim uvjetima. Na primjer, eksperimenti sa likvefakcijskim klizištima koje je proveo Sassa (1984) pokazali su da se brzi porast pornog pritiska zbog lokaliziranog slijeganja javlja neposredno prije nego što se aktivira klizište [16].

Okura i suradnici (2002) proveli su laboratorijske eksperimente s žlijebom i primjetili da kosina koja se urušava prolazi kroz tri faze: volumetrijsko zbijanje sa smicanjem, porast pornog pritiska u zasićenoj zoni i brzo smicanje oko klizne plohe [16].

Wang i Sassa (2003.) kroz niz ispitivanja plitkih klizišta izazvanih vodom u žlijebu malih dimenzija pokazali su da veličina zrna i količina sitnih čestica mogu imati značajan utjecaj na pokretljivost plitkih klizišta uzrokovanih vodom. Gabet i Mudd (2005.) izvijestili su da je potencijal određenog mjesta za tečenje materijala nakon plitkog klizišta neovisan o poroznosti, ali je osjetljiv na sadržaj pijeska. Olivares i Damiano (2007.) koristili su eksperiment temeljen na žlijebu kako bi primijetili da su visoke posmične deformacije i maksimalni porni pritisak, zabilježeni na podlozi žlijeba osnovni razlozi tečenja klizišta [16].

Iako postoji značajna količina literature za modeliranje erozije i taloženja gornjeg sloja tla u slivu, samo je ograničen broj studija obrađivao teme povezane s obrascima taloženja i ponašanjem nanosa sedimenta nakon plitkih klizišta. Benda i Cundy (1990.), na primjer, razvili su empirijski model koji koristi nagib kanala za predviđanje taloženja materijala. Johnson i sur. (2000) izvještavaju o pokretanju poremećaja na padini, uzorku istjecanja i taloženja više od 300 klizišta i uočavaju da se veći dio tog materijala taloži unutar sliva, umjesto da dođe do glavnog kanala. Praćenje ispuštanja sedimenta u kanalu koje su proveli Schuerch i sur. (2006) zaključuju da su prinosi sedimenta u kanalu značajno visoki nakon

dogođaja propadanja kosine, te da sav sediment klizišta ne doseže kanal, već u slivu ostaje značajna količina sedimenta.

Nekoliko studija izvještava da je doprinos plitkih klizišta u ukupnom godišnjem proračunu sedimenata sliva relativno nizak (May i Gresswell, 2004.; Chen i sur., 2005.; Bathurst i sur., 2007.). Međutim, nijedna ili malo studija izvještava o tome kako klizišta mogu promijeniti topografiju i svojstva tla što utječe na dugotrajnu eroziju unutar padine ili sliva [16].

Willgoose i Sharmeen (2006b) proučavali su dugotrajne procese erozije i zbijanja i primijetili da se u pjeskovitom tlu smanjuje kumulativna stopa erozije za 81%. Cochrane i sur. (2007) pokazuju da je erozija smanjena za više od 75% u teško zbijenim tlima u usporedbi sa svježim tlima [16]

Iako je provedena znatna količina istraživanja kako bi se razumjelo pokretanje klizišta, pomicanje i taloženje materijala nakon klizišta, znanje o pojavi i napretku plitkih klizišta i njihovom utjecaju na ispuštanje sedimenata je ograničeno. Stoga su bila potrebna daljnja istraživanja kako bi se bolje razumio utjecaj plitkih odrona izazvanih vodom na ispuštanje sedimenata brežuljaka [16].

Statičku likvefakciju bilo je izrazito teško pokrenuti u fizičkim modelima (npr. Take, 2014.). Take i Beddoe (2014.) pretpostavili su da je modelirana geometrija nagiba u njihovim pokusima mogla imati nenamjerne posljedice na smanjenje vjerojatnosti nastanka likvefakcije. [17]

Ta hipoteza se temeljila na ideji da zrnasta tla u osnovi padine mogu biti osjetljivija na statičku likvefakciju od istog tla na nagnutom dijelu padine. Mali lokalizirani poremećaj mogao bi tada smicati zasićeno tlo u dnu klizišta što dovodi do značajnog stvaranja likvefakcije pijeska pod pozitivnim porama vode. Jednom kad je podloga pod utjecajem likvefakcije, potporni učinak na ostatak nagiba značajno se smanjuje [17]

Polako prodiranje vode u masu tla dovodi do pokretanja različitih faza propadanja kosina. Stvaranje ispupčenja ili tlačnih grebena, procurivanje i površinska erozija na području nožice povezani su s razvojem vrlo visokih hidrauličkih gradijenata, što ukazuje na prisutnost velikih sila procurivanja koje se lokalno javljaju na ovom području. [18]

Područje nožice pokazuje najznačajnije vizualne i instrumentalne promjene mjerenja. Primijećene fizičke promjene, kao što su tlačni grebeni, procjeđivanje i površinske erozije,

pokazatelji su visokih hidrauličkih gradijenata. Razlike u omjeru praznina dovode do diferencijalnih slijeganja na padini koja se očituju kao lomovi, cjevovodi i eventualni poremećaji. Za nagib istih svojstava tla, geometrije i početnih uvjeta moguće je proći najviše 36 minuta prije otkaza. Primijećeno je da se slična vremena izvođenja događaju na nasipima velikih razmjera. [18]

Instrumentalna i vizualna promatranja deformacija su korisni pokazatelji predstojećeg otkaza, osim promjena u zasićenju i tlaku pora vode. Zapravo, senzorima je moguće otkriti početne promjene u nagibu modela ističući njihovu važnost u praćenju i predviđanju. Instrumentalni nadzor gornjeg dijela padine nije toliko značajan kao onaj opažen u nožici, jer su se značajke deformacije pojavile tek nakon što je započeo poremećaj. Međutim, praćenje gornjeg nagiba i dalje se preporučuje, jer su se promjene dogodile prije glavnog poremećaja, što je najstrašnija faza u razvoju klizišta. [18]

Dubine infiltracije i erozije padalina mogu se razlikovati ovisno o mnogim parametrima, uključujući korišteni kut nagiba. U pokusima je uočeno da se povećanjem kuta nagiba povećava dubina površinske erozije zbog bržeg protočnog površinskog otjecanja. Uz to, postoji i učinak sile teže koja je učinkovitija u poticanju vertikalne infiltracije za blaže padine, pod uvjetom da površinski pokrov ne postoji. Druga važna točka je napor sabijanja. Što je tlo gušće, to se površinska erozija, propusnost i infiltracija teže smanjiti za nezasićena tla. Također, intenzitet padalina i trajanje kiše drugi su važni čimbenici koji utječu na stabilnost padine.[19]

Iz nekoliko pokusa je uočeno da gustoća tla igra važnu ulogu u pokretanju klizišta. U slučaju gustog nagiba, čak i veći intenzitet padalina s prethodnom vlažnosti padine neće pokrenuti veći pad padine. Međutim, u slučaju manje gustog nagiba, manji intenzitet oborina pokreće tip otkaza klizišta. Porni pritisak naglo se povećava nakon pojave poremećaja na padini, a razvoj većeg tlaka pora povezan je s debljinom i brzinom klizne mase. U slučaju malog otkaza, porni pritisak neće naglo porasti. Tlak pora manji je na gornjem dijelu padine u odnosu na nožicu i tlak pora veći je na dnu u odnosu na male dubine.

U slučaju prethodnih uvjeta vlage, brzo se stvara otjecanje koje nagrizava nožicu padine i stvara erozijske jarke. Porni pritisak i sadržaj vlage brzo se povećavaju u slučaju prethodnih uvjeta vlage. Rano upozorenje može se uspostaviti postavljanjem senzora vlage od nožice do sredine padine na malim dubinama. [20]



Uz to, posljednjih desetljeća u laboratorijskim uvjetima pokrenuta su mnoga klizišta manjih razmjera. Na primjer, Sassa (1972, 1974) je izveo niz ispitivanja na pijesku Toyoura (japanski standardni pijesak) i zaključio da su promjene krutosti pijeska i gornjeg naprezanja u nagibu ključne za analizu stabilnosti nagiba [21]

Daljnje studije na likvefakcijskim klizištima otkrile su da je porast pornog pritiska zbog nedreniranog sloja tla uzrokovao propadanje padine tijekom kiša i da je stvaranje pora tla rezultat naglog pokretanja slijeganja (Sassa i Takei 1977a, 1977b; Sassa 1984). Eckersley (1990) je pokrenuo klizišta u zalihama koksnog ugljena podizanjem vodostaja i zaključio da su prekomjerni porni pritisci generirani prije pojave kretanja. Međutim, u tom radu pomicanje klizanja zabilježile su samo video kamere, a promatranja deformacija unutar zaliha nisu provedena [21].

Slijedilo je još jedno laboratorijsko ispitivanje toka klizišta na rastresitom zasićenom finom kvarcnom pijesku, u kojem je analizirano kretanje likvefakcijskog pijeska i porni pritisci tijekom gibanja (Spence i Guymer 1997). Iverson i njegovi kolege pokrenuli su klizišta i materijale u velikom kanalu s naglaskom na ispitivanju kretanja klizišta i intergranularnim pornim pritiscima (Iverson i LaHusen 1989; Iverson 1997; Iverson i sur. 1997, 2000; Major i Iverson 1999). Te su studije pokazale da brzina klizišta značajno ovisi o početnoj poroznosti tla, a brzo fluidizirano klizište uključuje djelomičnu ili potpunu likvefakciju mase visokim pornim pritiskom fluida. Također je zaključeno da veličina promjene tlaka pora izazvana promjenom poroznosti tijekom klizišta ne ovisi samo o početnoj poroznosti, već i o relativnim vremenskim skalama za deformaciju tla i difuziju tlaka pora. Porni pritisci dinamički su fluktuirali tijekom brze stalne posmične deformacije zrna zasićenih vodom, a značajno su se raspršili samo tijekom konsolidacije sedimenta nakon taloženja. [21]

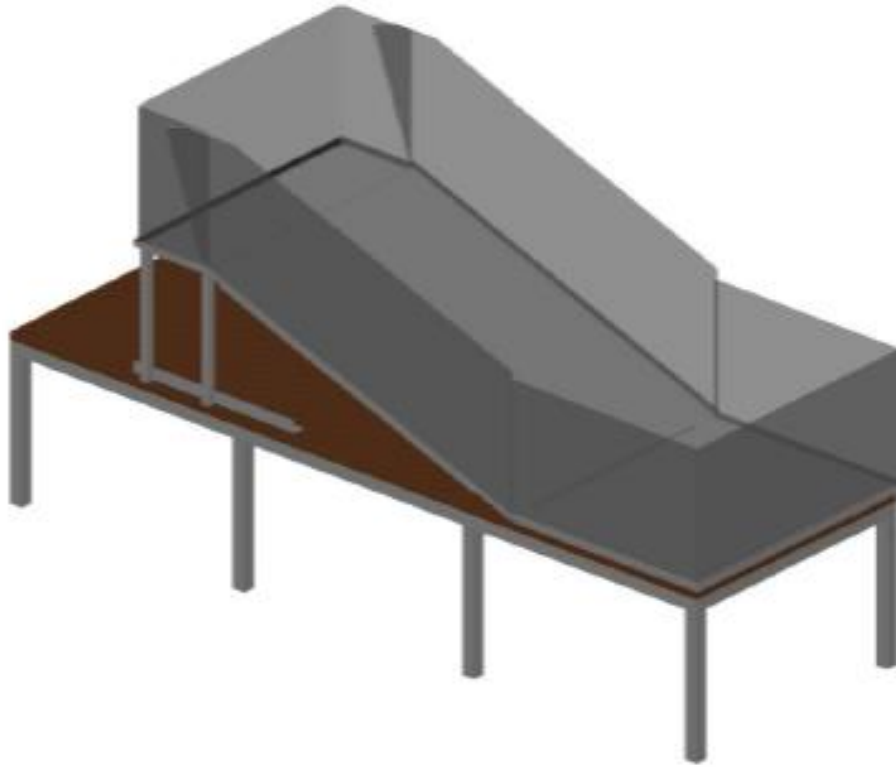
Iako su veliki naponi posvećeni proučavanju pokretanja, gibanja i taloženja fluidiziranih klizišta s naglaskom na stvaranju i rasipanju tlaka pora, razumijevanje postupka fluidiziranog klizišta još je ograničeno. Način na koji se stvara i održava višak pornog pritiska, a zatim kako generirani pritisak u porama utječe na kretanje raseljenog klizišta zahtijeva daljnju provjeru. Uz to, do sada su gotovo sva eksperimentalna ispitivanja izvedena na čistom pijesku, tj. malo je rada na mulju i muljevito-glinenoj smjesi, iako je bilo nekoliko iznimaka (npr. Bishop 1973; Kramer 1988; Eckersley 1990; Ishihara i sur. 1990; Thevanayagam 1998; Youd i Gilstrap 1999; Vallejo i Mawby 2000). Vrlo je

poželjno ispitati kako veličina zrna i sadržaj sitnih čestica utječu na stvaranje tlaka pora i rezultirajuće kretanje mase klizišta [21]

## 4. PLATFORMA ZA ISPITIVANJE U STATIČKIM UVJETIMA OPTEREĆENJA

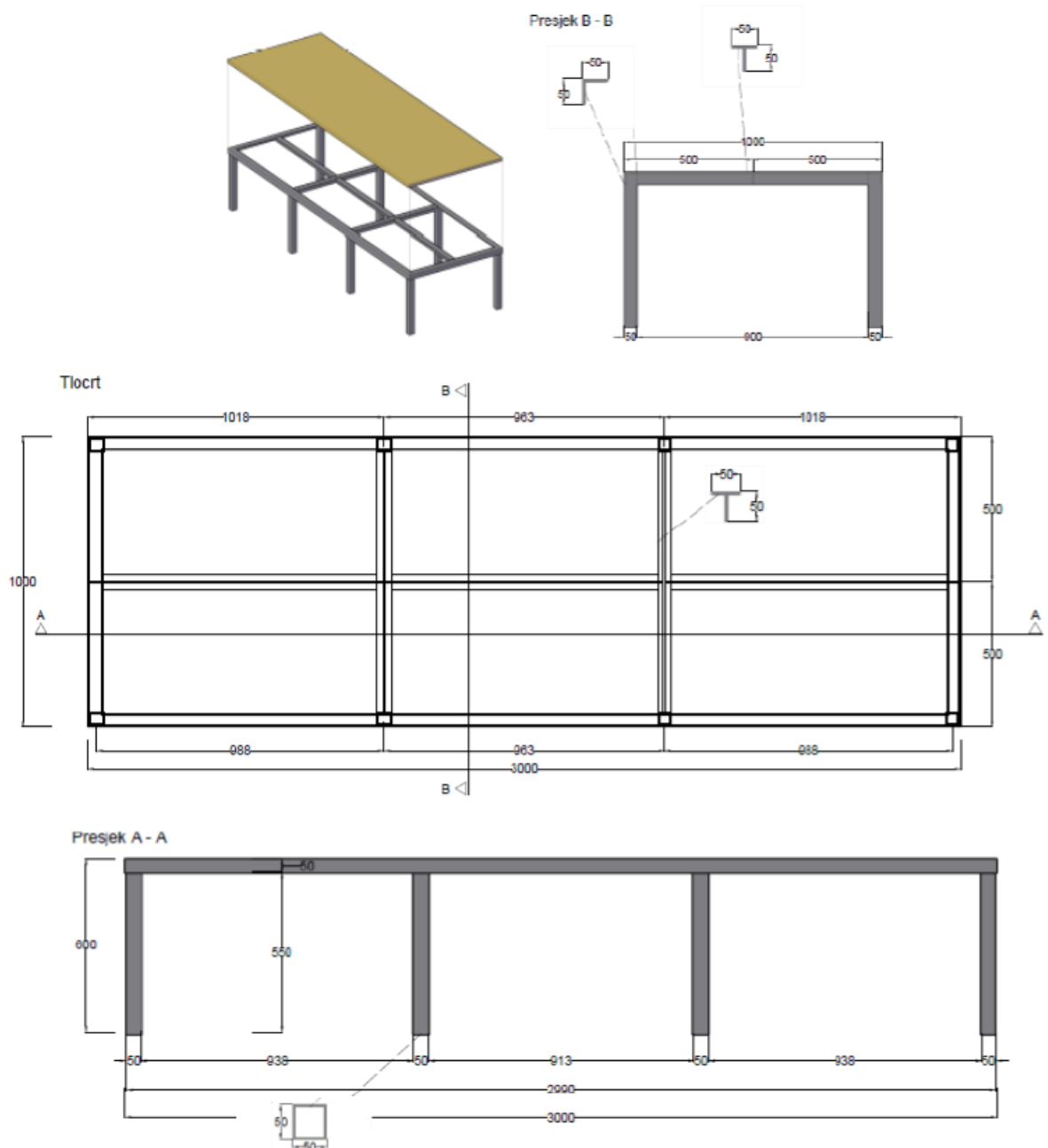
Fizičko modeliranje klizišta pomoću skaliranih modela klizišta uspostavljeno je krajem 1980-ih godina kada je u skaliranom fizičkom modelu ispitivano ponašanje klizišta i ukapljivanje kliznog materijala. Glavni zadatak modeliranja klizišta u posljednjih 25 godina bilo je istraživanje pokretanja, kretanja i nakupljanja brzih tokova poput klizanja uzrokovanih infiltracijom površinskih voda u padinu. Brojni uspostavljeni fizikalni modeli i istraživanja klizišta odnose se na glavni čimbenik izazivanja klizišta u statičkim uvjetima a to je utjecaj oborina. Promatranje kretanja klizišta u fizičkom modelu provodi se senzorskom mrežom za mjerenje pomaka, tlakova, sila i tlaka pora te inovativnom fotogrametrijskom opremom, uključujući zemaljski laserski skener i infracrvenu kameru. Izmjereni parametri iz fizičkog modela uključuju se u 3D numeričku simulaciju. Rezultati fizičkog i numeričkog modeliranja omogućuju bolje razumijevanje ponašanja sanacije klizišta. Metode analize stabilnosti korištene za projektiranje sanacije klizišta u inženjerskoj praksi još su uvijek grube i rezultiraju odabirom konzervativnih sanacijskih konstrukcija. Iz tog razloga, rezultati istraživanja predstavljali bi osnovu za nove pristupe projektiranju racionalnih sanacijskih konstrukcija klizišta u inženjerskoj praksi [27].

Model platforme za ispitivanje u statičkim uvjetima (slika 9) napravljen je od čelične nosive konstrukcije i pleksiglasa. Nosivi stol, koji omogućava stabilizaciju platforme pri različitim geometrijskim uvjetima te omogućava olakšano sastavljanje i rastavljanje modela, a na kojem je postavljena platforma, napravljen je od ploče vodootporne blažujke i čeličnih elemenata [9].



Slika 9: Shematski prikaz modela platforme za ispitivanje u statičkim uvjetima [9]

Dimenzije gornje plohe nosivog stola, napravljene od vodootporne blažujke, su 1,5 m x 3 m i debljine blažujke 27 mm. S jedne strane ploha je glatka, a s druge je hrapava. Na plohi su izbušene i rupe za prihvat postolja gornje platforme. Dimenzije i detalji dijelova nosivog stola prikazani su na Slici 10.

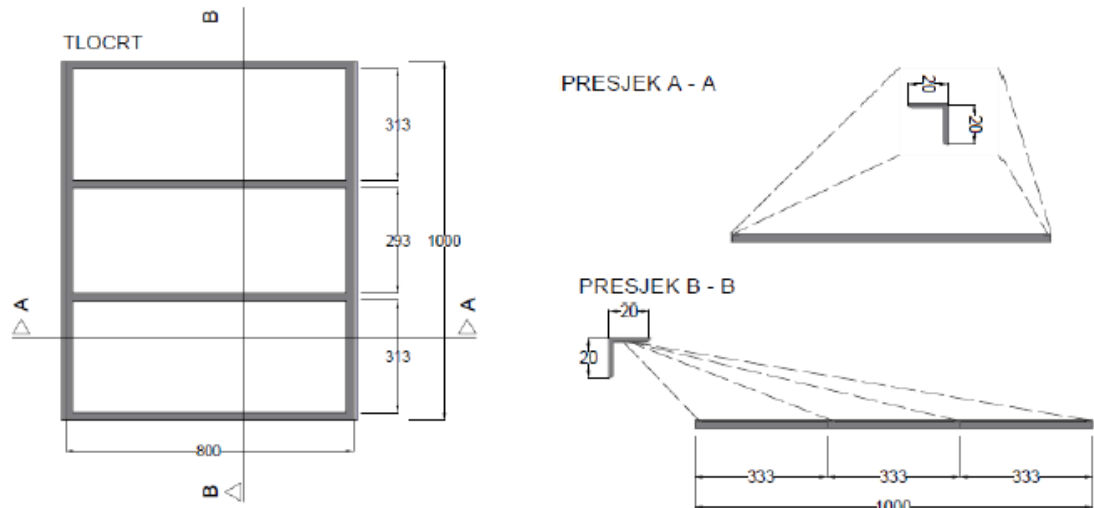


Slika 10: Shematski prikaz stola za statički model platforme [9]

U svrhu omogućavanja provođenja pokusa pri različitim nagibima modela kosine, platforma je napravljena od tri osnovna segmenta:

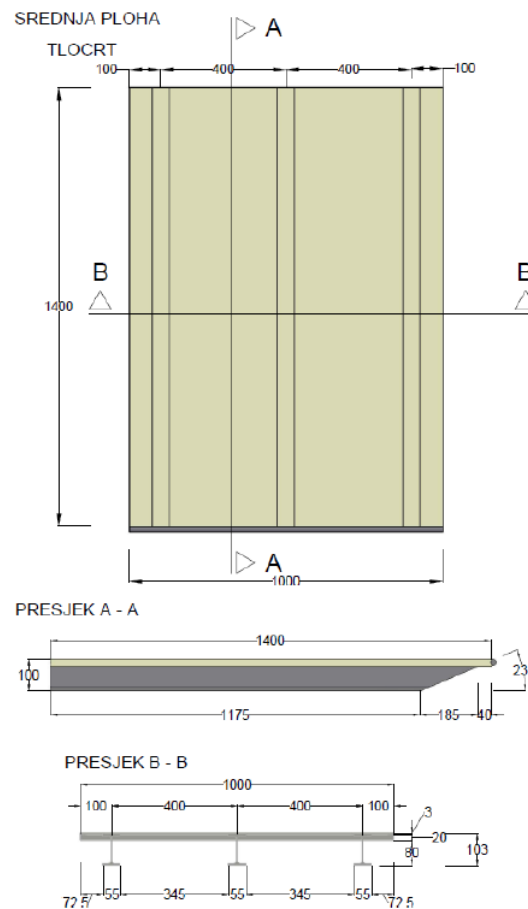
- Donje plohe, izravno položene na nosivi stol, dimenzija 800 mm x 1000 mm (slika 11)

DONJA PLOHA



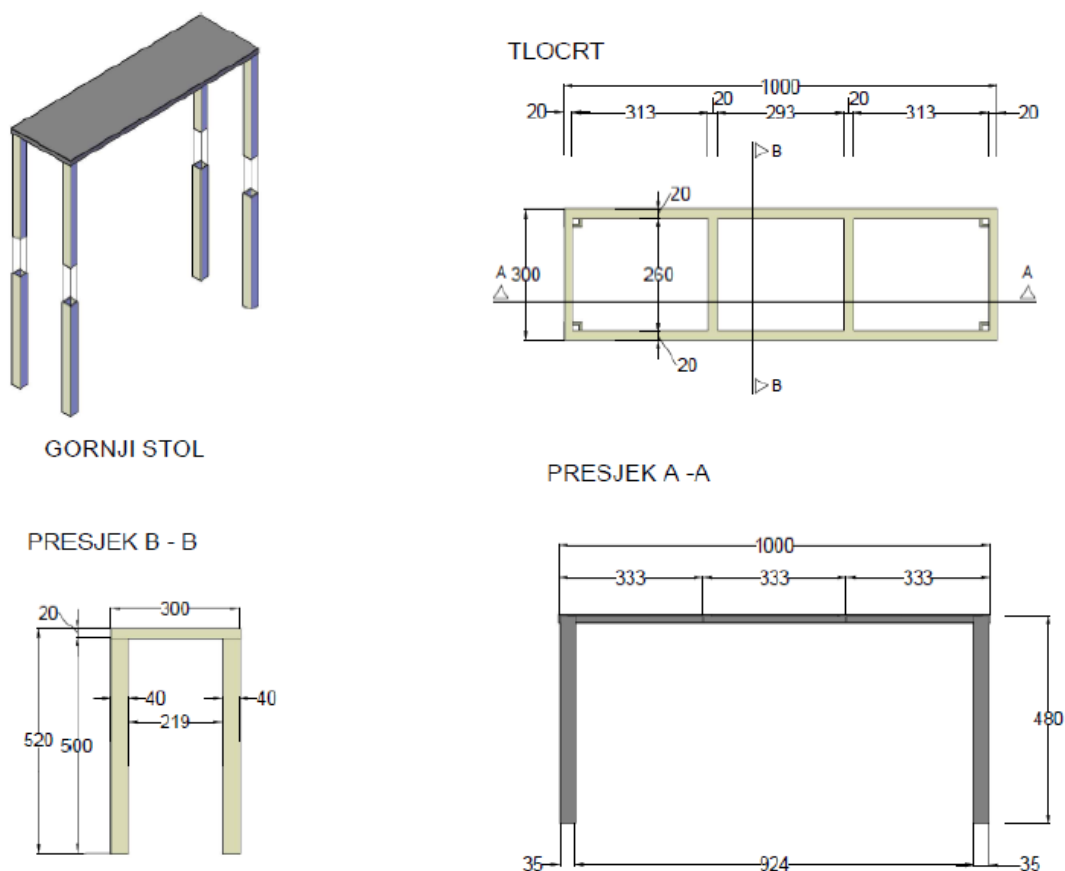
Slika 11: Donja ploha statičke platforme [9]

- Srednje plohe s ojačanjima na rubovima i omogućenom rotacijom na desnom i lijevom kraju, dimenzija 1400 mm x 1000 mm (slika 12)



Slika 12: Srednja ploha statičke platforme [9]

- Gornjeg stola kojemu je omogućena prilagodba visine ovisno o željenom kutu nagiba modela, dimenzija 300 mm x 1000 mm i visine 500 mm (slika 13).

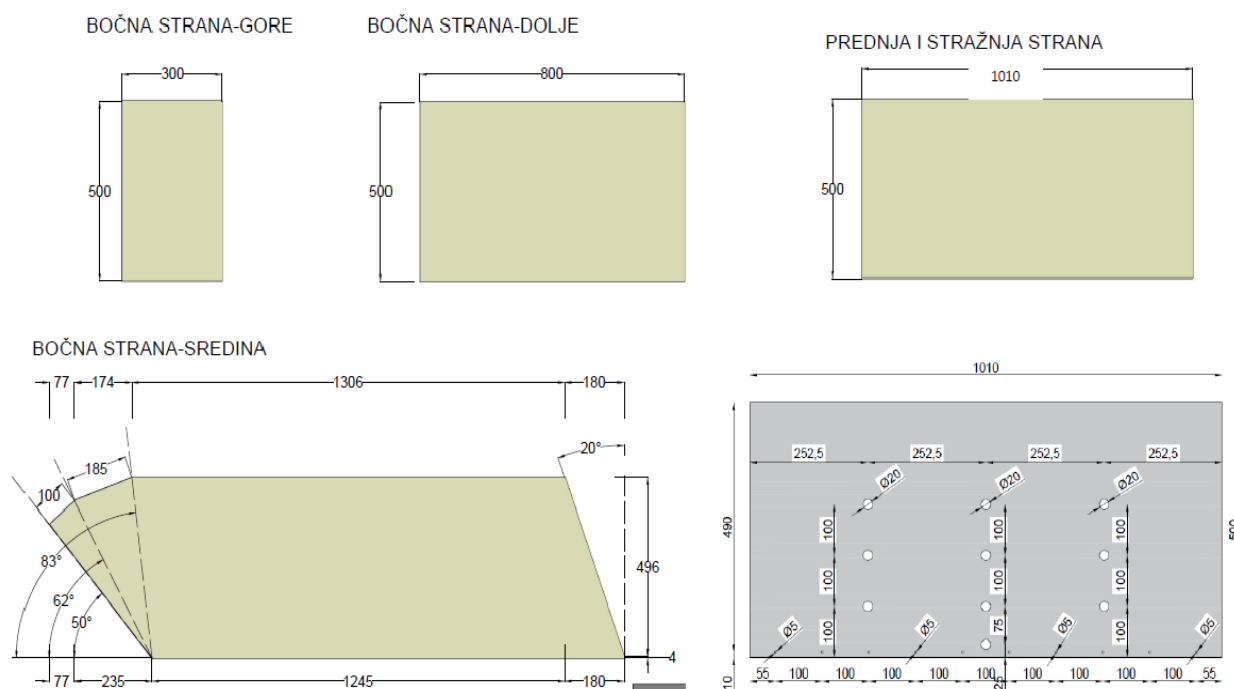


Slika 13: Gornja ploha statičke platforme [9]

Prije nego što se započne sa pokusom, ovisno o kutu nagiba modela kosine, potrebno je podesiti tlocrtni položaj i visinu gornjeg stola te pričvrstiti postolje za nosivi stol. Pričvršćivanje se obavlja pomoću vijaka, matica i podložnih pločica. Nakon što je gornja ploha pričvršćena, potrebno je rotirati srednju plohu do poravnanja zgloba sa utorima gornjeg stola, te istu pričvrstiti umetanjem predviđene čelične šipke. Kako bi se spriječilo klizanje na kontaktu tla ugrađenog u model i metalne površine, na metalnu površinu se postavlja i pričvršćuje geomreža ili neki drugi materijal koji je prikladan za povećanje trenja.

Nakon postavljanja platforme na željeni nagib, te neposredno prije ugradnje mjerne opreme i tla, postavljaju se pleksiglas stijenke. Model se sastoji od ukupno 8 pleksiglas stijenki (slika 14), od čega je 6 bočnih, te 1 stražnja i 1 prednja na kojoj se nalaze otvori za

drenažne elemente (slika 14). U svrhu omogućavanja kontroliranja razine vode u modelu te pražnjenja vode iz modela nakon pokusa, na prednjoj pleksiglas stijenci napravljeno je 10 otvora za spajanje drenažnih elemenata.



Slika 14: Dimenzije pleksiglas stijenki modela i otvori za drenažne elemente na prednjoj strani modela [9]

Nakon postavljanja i fiksiranja pleksiglas stijenki, potrebno je obaviti brtvljenje svih spojeva i otvora u modelu na kojima može doći do istjecanja vode prilikom trajanja pokusa. Za brtvljenje modela poželjno je koristiti prozirne brtvene mase, budući da se tijekom pokusa koristi i mjerna oprema kod koje se odvija vizualno praćenje mjernih točaka u modelu, a neprozirne brtvene mase mogu se koristiti za brtvljenje spojeva na dnu modela i mjesta zglobova i spojeva koji vizualno ne smetaju radu optičkih mjernih uređaja. Dio mjerne opreme moguće je po potrebi pričvrstiti na pleksiglas stijenske, na način da se minimalno ometa vidno polje između mjernih točaka modela i optičkog mjernog uređaja. U svrhu sprječavanja deformacija stijenki pleksiglase prilikom punog radnog opterećenja platforme, kao dodatna ojačanja dodane su dvije poprečne čelične ukrute na središnjem dijelu platforme te aluminijski profili na vrhu stijenki pleksiglase. Kada su obavljene sve prethodno navedene radnje, te se brtvena masa osuši, platforma je spreman za ugradnju mjerne opreme i materijala (slika 15).





Slika 15: Prikaz platforme za ispitivanje u statičkim uvjetima [9]

S ciljem da se osigura željeni stupanj zbijenosti tla unutar platforme, ugrađeni materijal se zbjija pomoću različitih nabijača u jednom ili više slojeva do postizanja konačne visine modela. Prije ugradnje modela potrebno je proračunima prethodno utvrditi početnu vlažnost tla, energiju i način zbijanja istog te potrebne količine materijala koji se ugrađuje u svakom pojedinom sloju.

Ugradnja mjernih uređaja na prethodno definiranim dubinama i pozicijama odvija se paralelno s ugradnjom materijala. Prilikom ugradnje pojedinog mjernog uređaja potrebno je voditi računa da se isti sukladno preporukama i uputstvima proizvođača, sigurno i pravilno ugrade. Također, kako bi se spriječilo moguće oštećenje mjernih uređaja, mora se pažljivo ugrađivati i zbijati materijal oko mjernih uređaja. Ako je potrebno, dio mjernih uređaja mogu se ugraditi i naknadno u model, a mjerne pozicije potrebno je odabrati na način da se uz minimalan utjecaj na rezultate mjerenja osiguraju traženi podaci [9]. Ugradnja mjerne opreme i materijala u modelu prikazano je na slici 16.



Slika 16: Ugradnja mjerne opreme i materijala u statičkom modelu [9]

Nakon što je ugrađen kompletni model sa traženim sensorima, potrebno je te iste senzore spojiti na odgovarajuće uređaje za prikupljanje i pohranu podataka (data loggere), s time da se pritom što manje ometa rad optičkih mjernih uređaja, te da se minimalizira utjecaj na rezultate pokusa. Nakon što su sve prethodno navedene radnje obavljene, model je spreman za početak ispitivanja. Prije početka pokusa po potrebi se provode različita inicijalna mjerenja te se uz rub stijenki pleksiglasa i na površini tla postavljaju mjerne

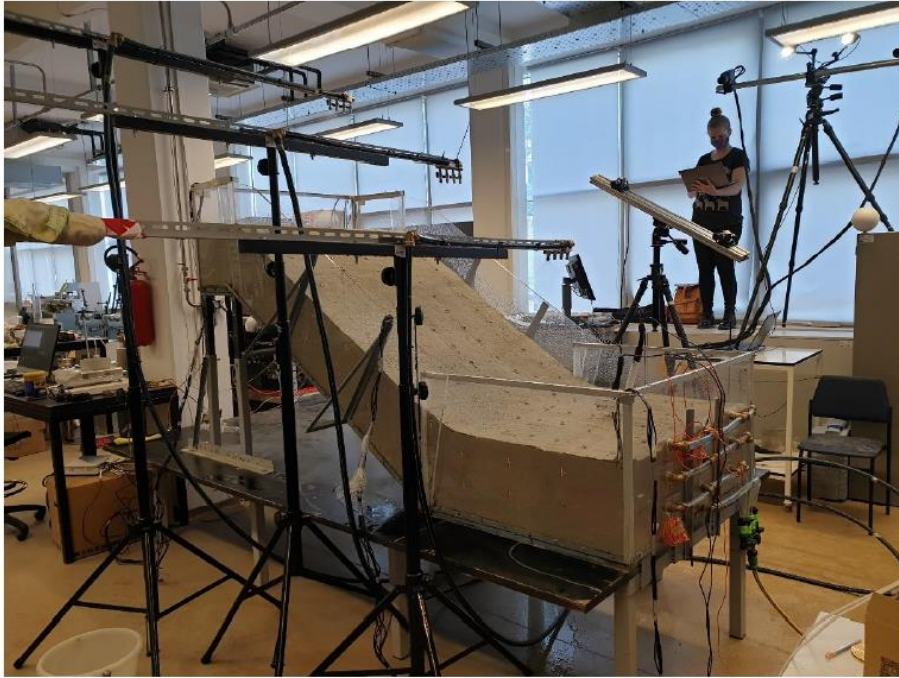
točke i elementi koji služe za praćenje ponašanja modele tijekom trajanja pokusa. Osim toga potrebno je obaviti i kalibraciju optičkih mjernih uređaja, definirati intervale mjerenja te pokrenuti snimanje na data loggerima.



Slika 17: Umanjeni fizički model kosine sa ugrađenom mjernom opremom i mjernim točkama na površini modela [9]

Također, prije samog početka ispitivanja, potrebno je spojiti i postaviti elemente simulatora oborina, te je pravilnim pozicioniranjem nosača mlaznica potrebno ostvariti ujednačenu pokrivenost cijelog modela oborinom. Različitim tipovima mlaznica i reguliranjem tlaka u sustavu osigurava se ciljani protok na mlaznicama, a isti je potrebno definirati prije početka pokusa. Kada je dostignut potrební tlak u sustavu, potrebno je ispustiti zrak iz sustava na način da se ispusti manja količina vode u posudu, te se na taj način ujednačava pritisak na svim mlaznicama.





Slika 18: Umanjeni fizički model pripremljen za početak ispitivanja [9]

#### 4.1. Mjerna oprema

Osim što je znanstveno korisno, prikupljanje podataka o klizištima korisno je i za procjenu opasnosti i rizika od pojave klizišta. Eksperimentalno proučavanje protoka tla znatno je teže od proučavanja protoka fluida [10]. Izbor mjerne opreme i tehnike u umanjenom statičkom modelu klizišta temelji se na pozitivnim saznanjima iz prakse vezanim za upotrebu istih na stvarnim klizištima [11]. Upravo zbog toga, oprema koja se koristi u umanjenom modelu klizišta može se koristiti i kod stvarnih klizišta.

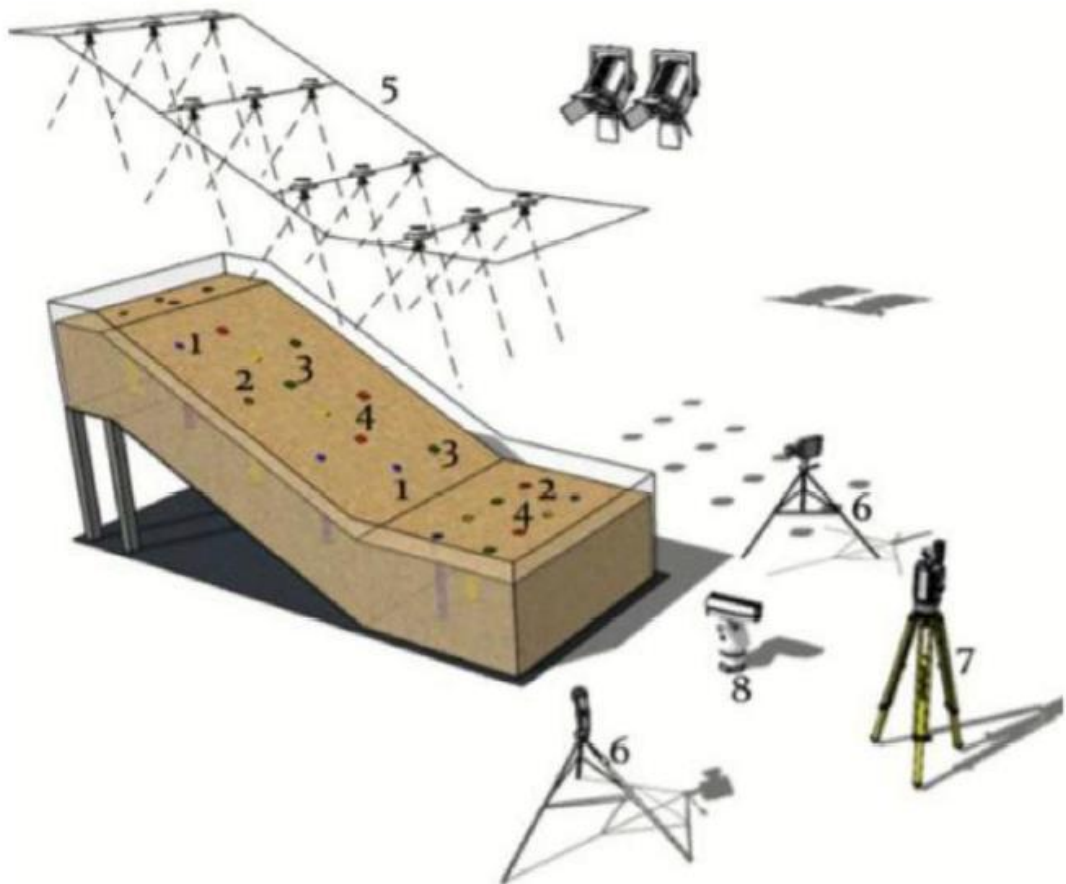
Oprema za monitoring klizišta u uvjetima statičkih djelovanja u umanjenim fizikalnim modelima sastoji se od dva osnovna dijela:

- Geotehničko praćenje ponašanja klizišta sastoji se od nekolicine senzora malih dimenzija koji daju podjednake rezultate kao i senzori koji se koriste za in situ praćenje ponašanja klizišta. Senzori koji se koriste u ovom dijelu monitoringa su senzori za mjerenje temperature i vlažnosti tla, sila i pritisaka, matrične sukucije i ukupnog potencijala vode u tlu, pozitivnih pornih pritisaka, rozete za mjerenje deformacija i MEMS3D akcelerometara. Svi prethodno navedeni senzori spajaju se na data loggere te se na taj način prikupljaju potrebni podaci. Prije ugradnje senzora u

model, potrebno je obaviti kalibraciju ili kondicioniranje uređaja, kako bi dobiveni podaci bili ispravni.

- Geodetsko praćenje ponašanja klizišta bazira se na fotogrametrijskoj opremi za više-vremensku analizu ponašanja klizišta uz pomoć niza stereo slika fotografiranih pomoću dvije moderne high speed kamere. Osim toga omogućena je i usporedba površine klizišta prije početka i nakon završetka pokusa pomoću terestičkog laserskog skenera i Structure from motion (SfM) fotogrametrijske tehnike [12].

Popis mjerne opreme korištene prilikom istraživanja u statičkom modelu prikazan je u nastavku (Tablica 1), a raspored istih prikazan je na slici 19.



Slika 19: Shema statičkog modela s pripadajućom opremom [11]

Tablica 1: Popis mjerne opreme

Oznaka opreme	Statički model
1	Tenziometri
2	Mjerači pornog pritiska
3	Mjerne trake
4	Akcelerometri
5	Simulator oborina
6	High speed kamere
7	TLS
8	Infracrvena kamera

#### 4.1.1. Mjerenje vlažnosti i pornih pritiska vode u tlu

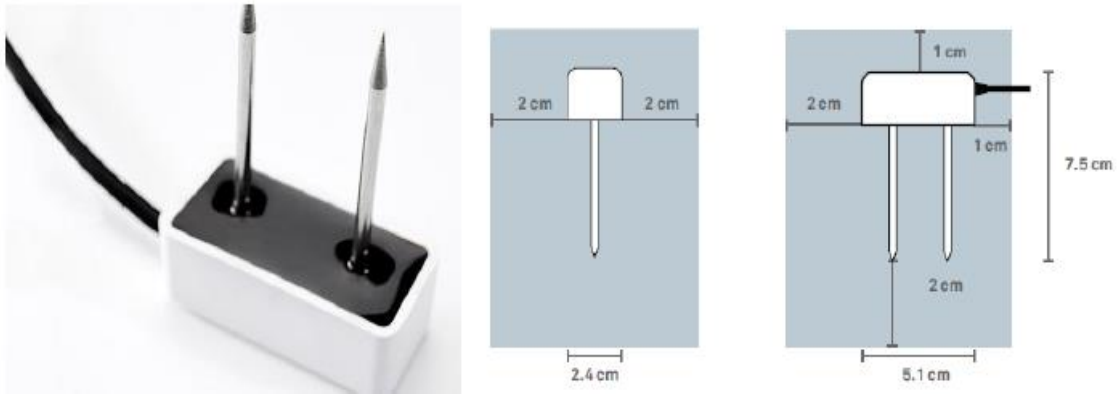
Iako su uvjeti koji dovode do pojave poremećaja padine opisani kao uzrokovani brzim porastom pornog pritiska i kao rezultat infiltracije, važni čimbenici koji pokreću poremećaje nisu adekvatno razjašnjeni jer različite vrste klizišta pokazuju različite vrste ponašanja kao odgovor na utjecaj oborina. Stoga je neophodno bolje razumijevanje učinaka lokalnih složenih čimbenika na nestabilnost klizišta uzrokovanu padalinama [13].

Iz tog razloga za potrebe pokusa u model se ugrađuju dva tipa senzora za mjerenje vlažnosti tla. Senzori koji se ugrađuju su TEROS 10, dimenzija 5.1 x 2.4 x 7.5 cm, za mjerenje volumetrijskog sadržaja vode u tlu, te TEROS 12, dimenzija 9.4 x 2.4 x 7.5 cm, također za mjerenje sadržaja vode u tlu, te osim toga i temperature tla i električne provodljivosti.

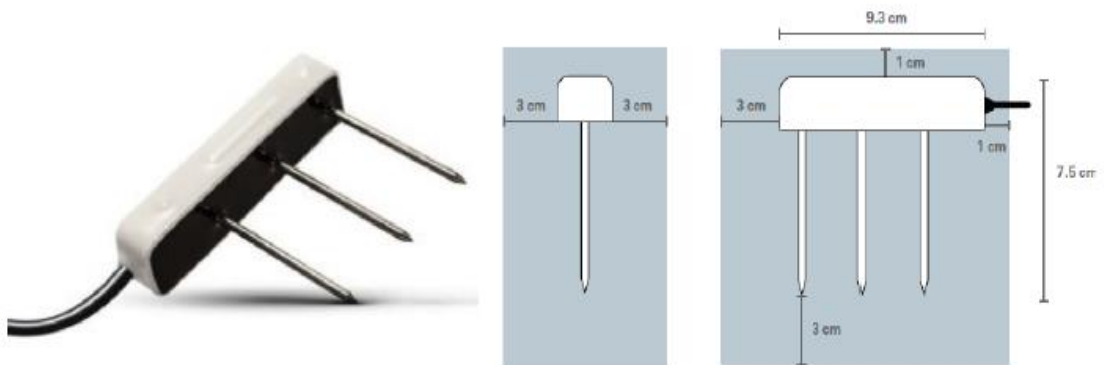
Vrijednost vlažnosti tla koristi se u kombinaciji s pornim pritiskom vode kako bi se utvrdilo efektivno naprezanje tla u nezasićenom stanju (Bishop 1959; Bishop and Blight 1963), a time i posmična čvrstoća materijala. Stoga je praćenje ovog parametra neophodno kako bi se procijenila stabilnost nezasićene kosine [14].

Oba mjerna uređaja su vrlo precizni te imaju široki raspon mjerenja, budući da je moguće provoditi mjerenja u različitim vrstama tla od glina do pijesaka. Senzor TEROS 10 (slika 20) je manjih dimenzija od senzora TEROS 12 (slika 21), stoga ga je lakše ugraditi u

model i ima manji utjecaj na mjereni volumen modela. S druge strane senzor TEROS 12 osim mjerenja vlažnosti tla, mjeri i temperaturu tla te električnu provodljivost, stoga je pomoću ovog senzora moguće dobiti više podataka mjerenja [9].



Slika 20: Senzor TEROS 10 [22]



Slika 21: Senzor TEROS 12 [23]

Tijekom ugradnje modela potrebno je paziti da se senzori ispravno ugrade i da ih se ne ošteti prilikom zbijanja tla, te da se spoje na data logger. Na data loggerima se tijekom pokusa sakupljaju podaci sa senzora koje je kasnije potrebno obraditi kako bi ih bilo moguće interpretirati. Specifikacije senzora dane su u Tablicama 2 i 3.

Tablica 2: Specifikacije senzora TEROS 10 [22]

Volumetrijski sadržaj vode (VWC)	
Raspon	
Kalibracija mineralnog tla	0.00-0.64 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Kalibracija medija bez tla	0.00-0.7 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Prividna dielektrična propusnost ( $\epsilon_a$ )	1 (zrak): 80 (voda)
<i>Bilješka: VWC raspon ovisi o mediju za koji se vrši kalibracija senzora. Prilagođena kalibracija prilagodit će</i>	
<i>potrebne raspone za većinu podloga</i>	
Rezulucija	0.001 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Točnost	
Kalibracija mineralnog tla	±0.03 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> tipična u mineralnim tlima koja imaju riješenje EC < 8 dS/m
Kalibracija medija bez tla	±0.05 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> tipična u mineralnim tlima koja imaju riješenje EC < 8 dS/m
Srednja specifična kalibracija	±0.01-0.02 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> u bilo kojem poroznom mediju
Prividna dielektrična propusnost ( $\epsilon_a$ )	1-40 (raspon tla), ±1 $\epsilon_a$ (bez jedinice) 40-80, 15% od mjerenja
Dielektrična mjerna frekvencija	
70 MHz	

Tablica 3: Specifikacije senzora TEROS 12 [23]

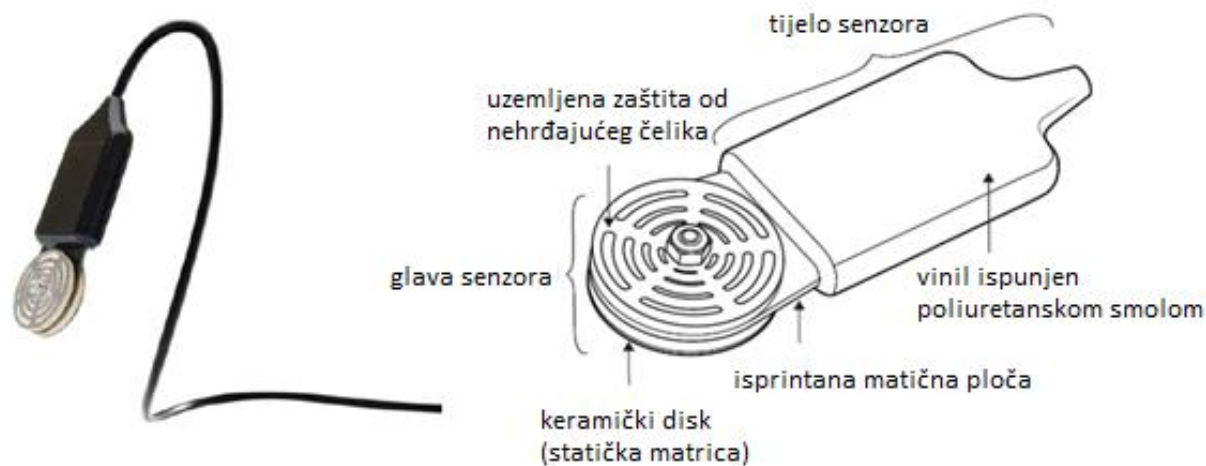
Volumetrijski sadržaj vode (VWC)	
Raspon	
Kalibracija mineralnog tla	0.00-0.70 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Kalibracija medija bez tla	0.00-1.0 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Prividna dielektrična propusnost ( $\epsilon_a$ )	1 (zrak): 80 (voda)
<i>Bilješka: VWC raspon ovisi o mediju za koji se vrši kalibracija senzora. Prilagođena kalibracija prilagodit će</i>	
<i>potrebne raspone za većinu podloga</i>	
Rezulucija	0.001 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Točnost	



Opća kalibracija	$\pm 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ tipična u mineralnim tlima koja imaju rješenje $\text{EC} < 8 \text{ dS/m}$
Srednja specifična kalibracija	$\pm 0.01\text{-}0.02 \text{ m}^3/\text{m}^3$ u bilo kojem poroznom mediju
Prividna dielektrična propusnost ( $\epsilon_a$ )	1-40 (raspon tla), $\pm 1 \epsilon_a$ (bez jedinice) 40-80, 15% od mjerenja
<b>Dielektrična mjerna frekvencija</b>	
70 MHz	
<b>Temperatura</b>	
Raspon	-40 do +60 °C
Rezolucija	0.1 °C
Točnost	$\pm 1 \text{ °C}$ od -40 do 0 °C
	$\pm 0.5 \text{ °C}$ od 0 do +60 °C

Porast pornog pritiska u vodi, koji predstavlja infiltraciju fronte vlaženja, zbog većeg intenziteta oborine na vrhu događa se brže u gornjem dijelu padine u usporedbi sa srednjim i donjim dijelovima [14].

Za potrebe mjerenja pornih pritisaka vode u tlu jedan od senzora koji se koristi prilikom pokusa u umanjenom modelu klizišta je senzor TEROS 21, dimenzija 9.6 x 3.5 x 1.5 cm (slika 22). Spomenutim senzorom moguće je indirektnom metodom izmjeriti temperaturu i potencijal vode u tlu na temelju poznate retencijske krivulje keramičkog diska i kalibracijske krivulje koja opisuje odnos između vlažnosti i dielektrične permitivnosti istoga [24]. Budući da ovaj senzor zahtjeva minimalno održavanje nakon ugradnje i pokriva vrlo široko mjerno područje (porni pritisci od -9 do -100 000 kPa) [9], bolji je za upotrebu od direktnih metoda mjerenja poput metoda tenziometara ili translahiranih osi. Zbog navedenih karakteristika ovaj uređaj prikladan je za korištenje u dugotrajnim laboratorijskim i terenskim mjerenjima u sitnozrnastim tlima. Međutim nedostatak ovih senzora je taj da se baziraju na mjernoj tehnici koja vrlo često zahtijeva dugotrajno vrijeme ekvibracije te im je preciznost ograničena pri potencijalima nižim od -100 kPa. Specifikacije uređaja dane su u tablici 4.



Slika 22: Senzor TEROS 21 [24]

Tablica 4: Specifikacije senzora TEROS 21 [24]

<b>Potencijal vode</b>	
Raspon	-5 do -100,000 kPa (1.70 do 6.00 pF)
Rezolucija	0.1 kPa
Točnost	$\pm(10\%$ od očitavanja + 2 kPa) od -100 do -5 kPa
Bilješka: TEROS 21 Gen 2 može očitavati do 0 kPa na putu vlaženja. Ulazak zraka u tlo ograničava performanse senzora do -5 kPa na krivulji sušenja	
Bilješka: TEROS 21 nije dobro kalibriran iznad -100 kPa.	
<b>Dielektrična mjerna frekvencija</b>	
70 MHz	
<b>Temperatura</b>	
Raspon	-40 do +60 °C
Rezolucija	0.1 °C
Točnost	$\pm 1$ °C

Osim navedenog uređaja za indirektno mjerenje pritiska vode u tlu u model se ugrađuju i digitalni mini-tenziometri TEROS 31, duljine 2 cm i digitalni tenziometri TEROS 32, duljine 40 cm, za direktno mjerenje pritiska vode u tlu.

Digitalni mini-tenziometar TEROS 31 (slika 23) je zbog svojih malih dimenzija pogodan za upotrebu u laboratorijskim uvjetima, a zbog takvih dimenzija vrlo brzo reagiraju na promjene pritiska vode u tlu, te je za ekvilibraciju uređaja potrebno vrlo

kratko razdoblje. Pomoću ovog uređaja moguće je mjeriti pozitivni i negativni porni pritisak u rasponu od +50 do -85 kPa, odnosno do pojave heterogene kavitacije uz mjerenje temperature porne vode u rasponu od -30 do +60°C. Tehničke karakteristike senzora prikazane su u tablici 5 [25].



Slika 23: Senzor TEROS 31 [25]

Tablica 5: specifikacije senzora TEROS 31 [25]

<b>Potencijal vode</b>	
Raspon	-85 do +50 kPa (do -150 kPa tijekom usporavanja vrenja)
Rezolucija	±0.0012 kPa
Točnost	±0.15 kPa
<b>Temperatura</b>	
Raspon	-30 do +60 °C
Rezolucija	±0.01 °C
Točnost	±0.5 °C
<i>Bilješka: Ako senzor nije zatrpan materijalom, izmjerena temperatura može se razlikovati od temperature tla</i>	

Pomoću digitalnog tenziometra TEROS 32 (slika 24), moguće je direktno precizno mjeriti matričnu sukciju do -85 kPa, odnosno do pojave heterogene kavitacije do +50 kPa pozitivnog pritiska vode [26]. Ovaj tip tenziometra moguće je kondicionirati i ponovno

puniti bez uklanjanja uređaja iz tla. Uređaj je duljine 40 cm i promjera šipke 2.5 cm, a tehničke karakteristike dane su u tablici 6.



Slika 24: Senzor TEROS 32 [26]

Tablica 6: specifikacije senzora TEROS 32 [26]

<b>Potencijal vode</b>	
Raspon	-85 do +50 kPa
Rezolucija	$\pm 0.0012$ kPa
Točnost	$\pm 0.15$ kPa
<b>Temperatura</b>	
Raspon	-30 do +60 °C
Rezolucija	$\pm 0.01$ °C
Točnost	$\pm 0.1$ °C između -20 i +40 °C ( $\pm 1$ °C izvan ovog raspona)

Prije ugradnje, potrebno je kondicionirati sve uređaje za direktno mjerenje pornih pritisaka, a kada se završi sa pokusom iste je potrebno čuvati potopljenima u vodi kako bi se spriječila desaturacija poroznih kamena [9].

## 5. MJERENJA IZ EKSPERIMENATA I REZULTATI NUMERIČKIH MODELA

U tablici 7 su prikazana osnovna fizikalna svojstva mješavine pijeska-kaolina sa 10 % mase kaolina ugrađenog u model i početnim uvjetima na početku ispitivanja.

Tablica 7: proračun masa za Kaoland

Proračun masa za Kaoland (pijesak + kaolin 10 %)		
Parametar	Simbol	mješavina pijesak-kaolin
specifična gravitacija	$G_s$	2.69
minimalni omjer praznina	$e_{min}$	0.647
maksimalni omjer praznina	$e_{max}$	1.121
kut trenja	$F$ (°)	31.3
kohezija	$c$ (kN/m <sup>2</sup> )	3.9
početna poroznost	$n_i$	0.469
početna relativna gustoća	$D_{r_i}$	0.5
početni sadržaj vode	$w_i$ (%)	5
stupanj saturacije	$S$	1

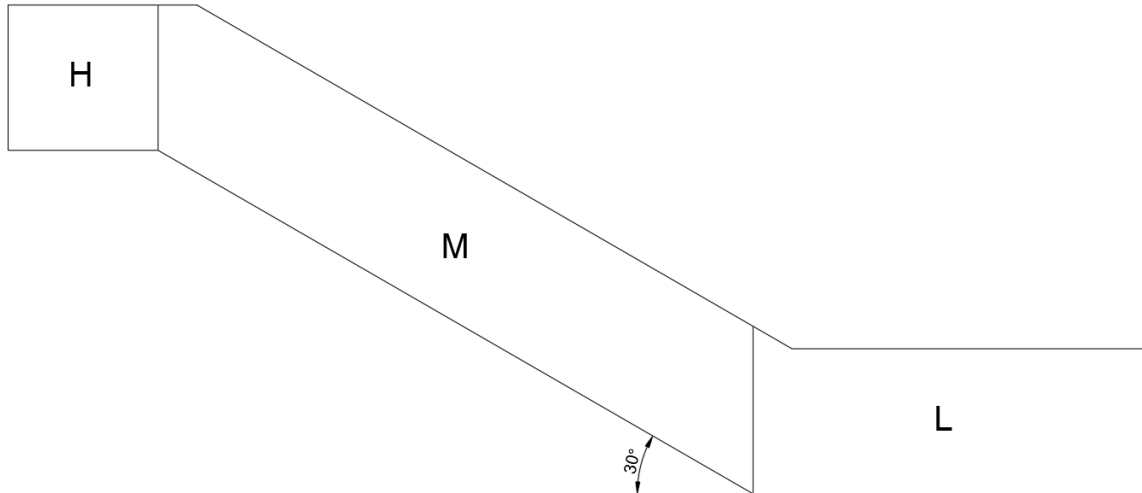
$$\gamma_s = G_s \cdot \gamma_w \quad \gamma_s = 2,69 \cdot 9,81 \quad \gamma_s = 26,39 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma = (1-n) \cdot \gamma_s + n \cdot s \cdot \gamma_w \quad \gamma = (1-0,469) \cdot 26,39 + 0,469 \cdot 1 \cdot 9,81 \quad \gamma = 18,61 \text{ kN/m}^3$$

$$e = \frac{e_{min} + e_{max}}{2} = \frac{0,647 + 1,121}{2} = 0,884$$

Prethodno opisana mješavina pijeska i kaolina ugrađena je u model u pet slojeva, debljine svakog sloja od 6 cm do ukupne visine od 30 cm. Unaprijed pripremljena mješavina sa udjelom vode od  $w = 5\%$  ugrađuje se metodom podkompakcije. Svaki sloj zbija se ručnim zbijanjem do srednje gustih uvjeta relativne gustoće  $D_r = 50\%$ . Prije ugradnje svakog sljedećeg sloja, prethodni sloj se malo nabrazdi i popraska vodom kako bi se očuvala početna vlažnost i osigurala najbolja moguća veza između slojeva. S ciljem

postizanja homogenosti materijala ugrađenog u kosinu i relativno ujednačenih uvjeta ugrađenog materijala, model se sastoji od tri segmenta – donjeg (L), srednjeg (M) i gornjeg (H), što je prikazano na slici 25 i slici 26. Materijal se ugrađuje počevši od nožice prema vrhu kosine. Detalji ugrađenih slojeva i dimenzija modela sa pripadajućim karakteristikama dani su u nastavku.



Slika 25: Fizikalni model pod kutom od 30°

Proračun volumena za  $\alpha = 30^\circ$  je dan u nastavku:

$$V_H / V_M / V_L = 0,093 / 0,424 / 0,245 \text{ m}^3$$

$$V_{TOT} = A_{TOT} * B = 0,762 * 1\text{m} = 0,762 \text{ m}^3$$

$$n = \frac{W}{V_{TOT}} = 0,469 \rightarrow V_V = 0,469 * 0,762 = 0,357 \text{ m}^3$$

$$V_V^H = n * V_H = 0,469 * 0,093 = 0,044 \text{ m}^3$$

$$V_S^H = V_H - V_V^H = 0,093 - 0,044 = 0,049 \text{ m}^3$$

$$m_S^H = G_s * V_S^H = 2,69 * 10^3 * 0,049 = 131,81 \text{ kg}$$

$$m_V^H = w * m_S^H = 0,05 * 131,81 = 6,59 \text{ kg}$$

$$V_V^M = n * V_M = 0,469 * 0,424 = 0,199 \text{ m}^3$$

$$V_S^M = V_M - V_V^M = 0,424 - 0,199 = 0,225 \text{ m}^3$$

$$m_S^M = G_s * V_S^M = 2,69 * 10^3 * 0,225 = 605,25 \text{ kg}$$

$$m_V^M = w * m_S^M = 0,05 * 605,25 = 30,26 \text{ kg}$$

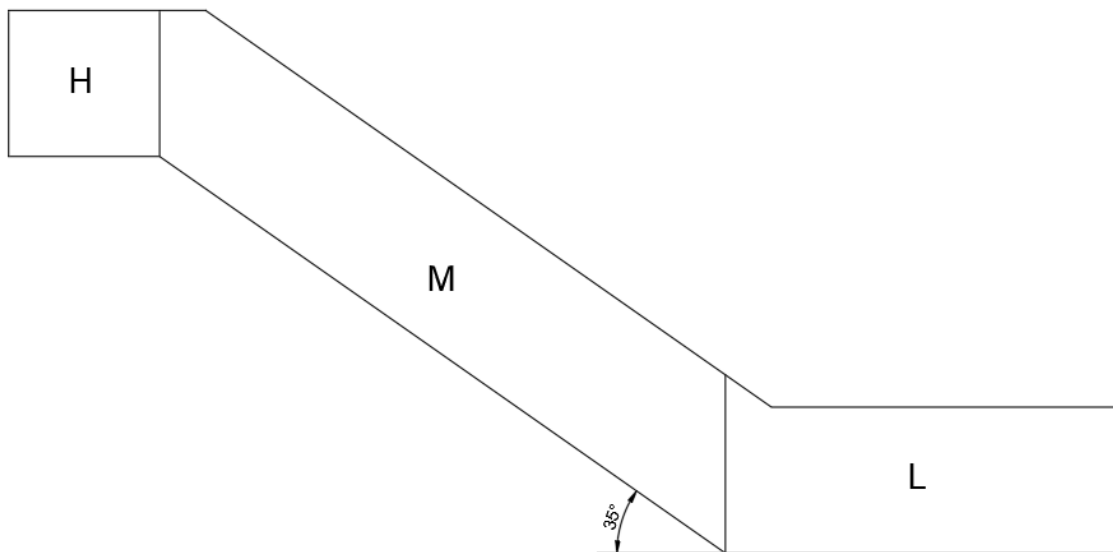
$$V_V^L = n * V_L = 0,469 * 0,245 = 0,115 \text{ m}^3$$

$$V_S^L = V_L - V_V^L = 0,245 - 0,115 = 0,13 \text{ m}^3$$

$$m_S^L = G_s * V_S^L = 2,69 * 10^3 * 0,13 = 349,7 \text{ kg}$$

$$m_V^L = w * m_S^L = 0,05 * 349,7 = 17,49 \text{ kg}$$

$$m_S^{\text{TOT}} = m_d^{\text{TOT}} = 1086,76 \text{ kg} ; m_w^{\text{TOT}} = 54,34 \text{ kg}$$



Slika 26: Fizikalni model pod kutom od 35°

Proračun volumena za  $\alpha = 35^\circ$  je dan u nastavku:

$$V_H / V_M / V_L = 0,093 / 0,423 / 0,246 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{TOT}} = A_{\text{TOT}} * B = 0,762 * 1 = 0,762 \text{ m}^3$$

$$n = \frac{w}{V_{\text{TOT}}} = 0,469 \rightarrow V_V = 0,469 * 0,762 = 0,357 \text{ m}^3$$

$$V_V^H = n * V_H = 0,469 * 0,093 = 0,044 \text{ m}^3$$

$$V_S^H = V_H - V_V^H = 0,093 - 0,044 = 0,049 \text{ m}^3$$

$$m_S^H = G_s * V_S^H = 2,69 * 10^3 * 0,049 = 131,81 \text{ kg}$$

$$m_V^H = w * m_S^H = 0,05 * 131,81 = 6,59 \text{ kg}$$

$$V_V^M = n * V_M = 0,469 * 0,423 = 0,198 \text{ m}^3$$

$$V_S^M = V_M - V_V^M = 0,423 - 0,198 = 0,225 \text{ m}^3$$

$$m_S^M = G_s * V_S^M = 2,69 * 10^3 * 0,225 = 605,25 \text{ kg}$$

$$m_V^M = w * m_S^M = 0,05 * 605,25 = 30,26 \text{ kg}$$

$$V_V^L = n * V_L = 0,469 * 0,246 = 0,115 \text{ m}^3$$

$$V_S^L = V_L - V_V^L = 0,246 - 0,115 = 0,131 \text{ m}^3$$

$$m_S^L = G_s * V_S^L = 2,69 * 10^3 * 0,131 = 352,39 \text{ kg}$$

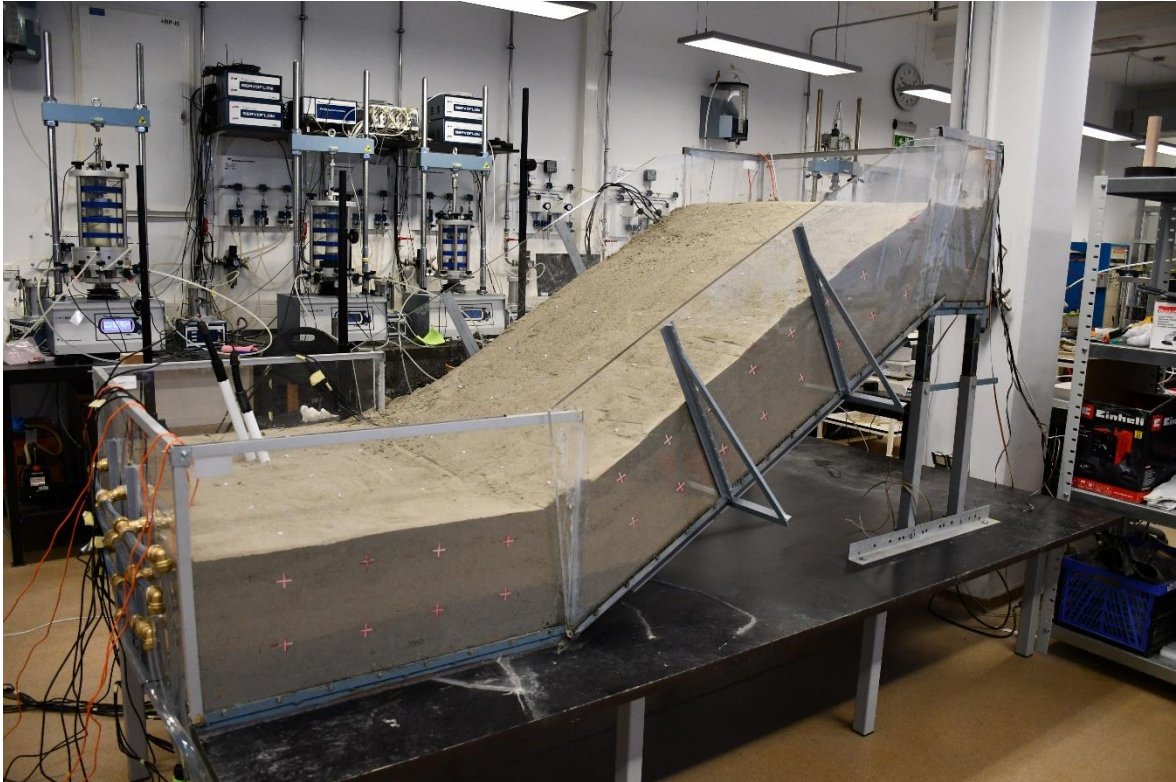
$$m_V^L = w * m_S^L = 0,05 * 352,39 = 17,62 \text{ kg}$$

$$m_S^{\text{TOT}} = m_d^{\text{TOT}} = 1089,45 \text{ kg} ; m_w^{\text{TOT}} = 54,47 \text{ kg}$$

### 5.1. Pokus br.1, $\alpha = 30^\circ$

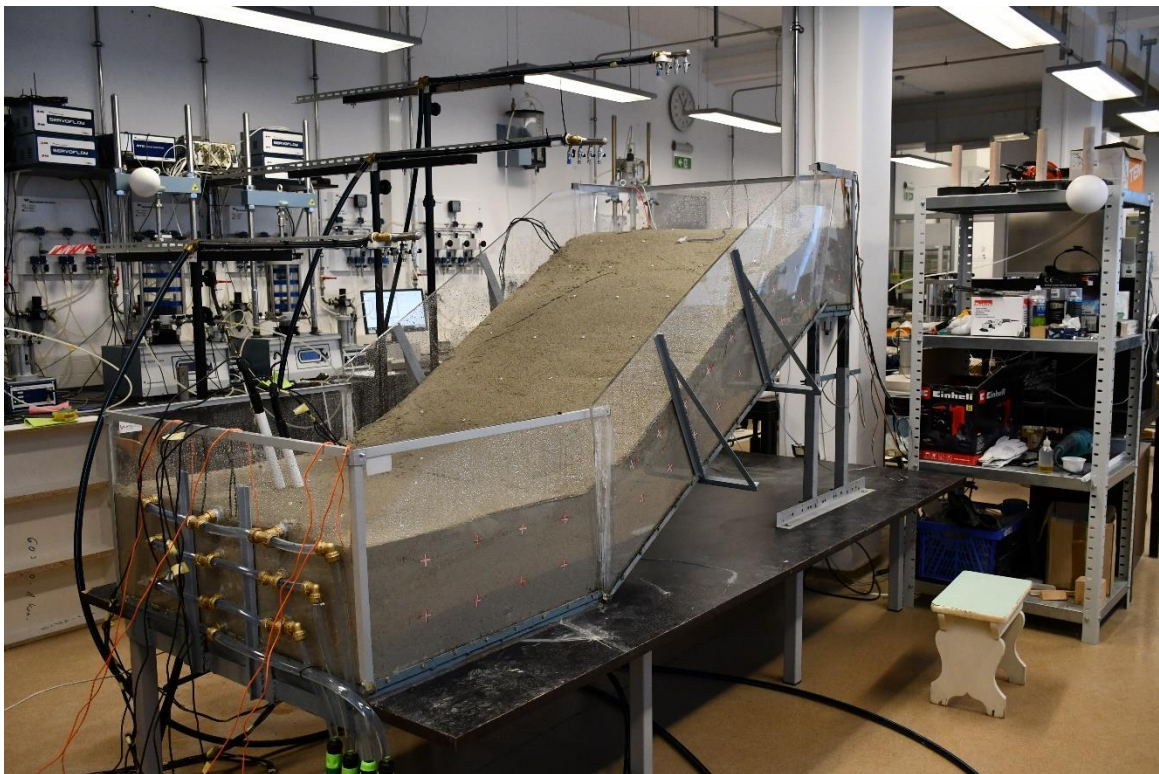
Prvi pokus proveden je 21.12.2020. sa početkom u 11:20. U ovom pokusu koriste se mlaznice 420.326, sa kutom prskanja od  $90^\circ$  pri 2 bara, koje imaju protok od 0,4 l/min. Na slici 27 je prikazan model neposredno prije početka pokusa.





Slika 27: Prikaz modela prije pokusa 1

Nedugo nakon početka pokusa, točnije samo 10 minuta od početka pokusa pojavljuje se prva pukotina, koja je prikazana na slici 28.



Slika 28: Pojava prve pukotine u pokusu 1



Na slici 29 prikazane su pukotine koje su nastale 120 minuta nakon početka pokusa.



Slika 29: Prikaz pukotina tijekom pokusa 1

Na slici 30 prikazana je pojava sloma tla, a na slici 31 prikazano je kretanje kliznog tijela.



Slika 30: Pojava sloma tla u pokusu 1





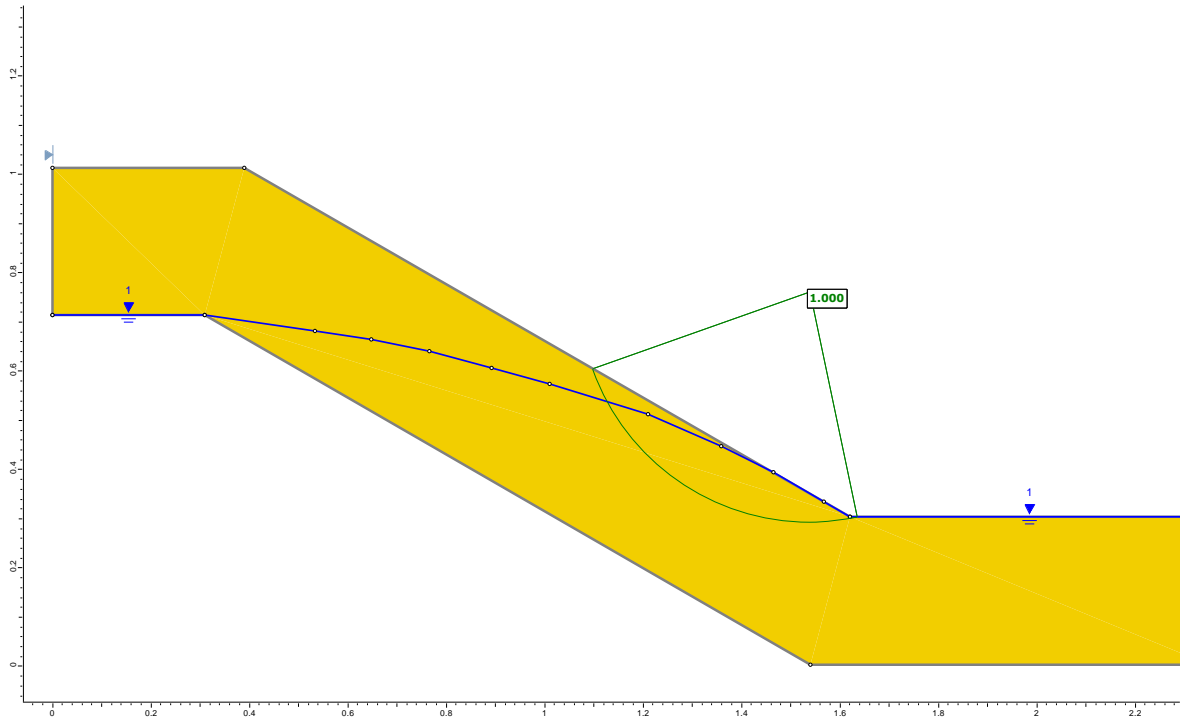
Slika 31: Prikaz kretanja kliznog tijela u pokusu 1

Nakon 150 minuta od početka pokusa uslijedilo je zatvaranje najniže mlaznice, te dolazi do promjene intenziteta oborine, nakon čega postepeno dolazi do površinskog ispiranja materijala tla, što je prikazano na slici 32. Pokus je završio nakon 180 minuta, u 14:20.



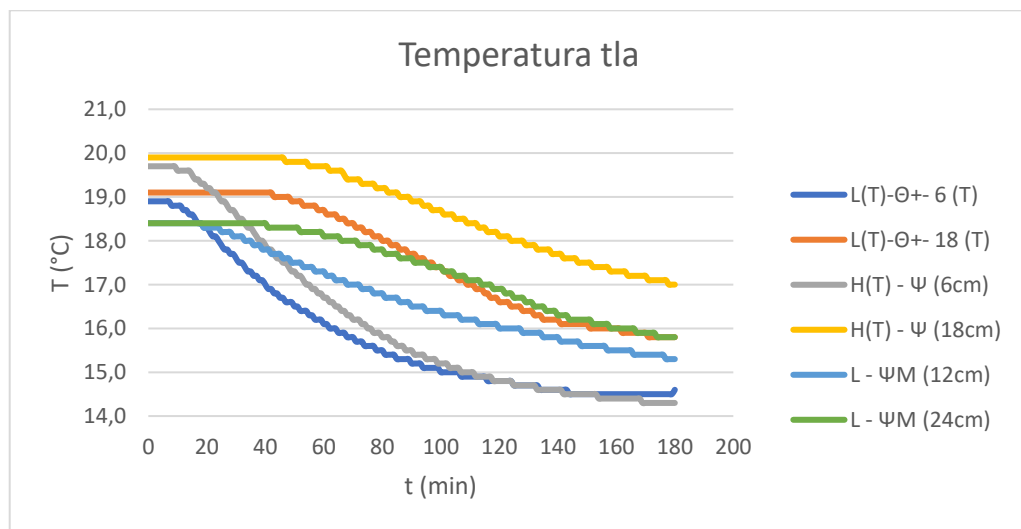
Slika 32: Površinsko ispiranje materijala

Na slici 33 prikazana je klizna ploha i faktor sigurnosti za umanjeni model klizišta, sa nagibom platforme od 30°, kohezijom  $c=18$  kPa, povećanjem unutarnjeg kuta trenja na  $\Phi=34^\circ$ , te podzemnom vodom koja se nalazi na 30 cm od dna modela



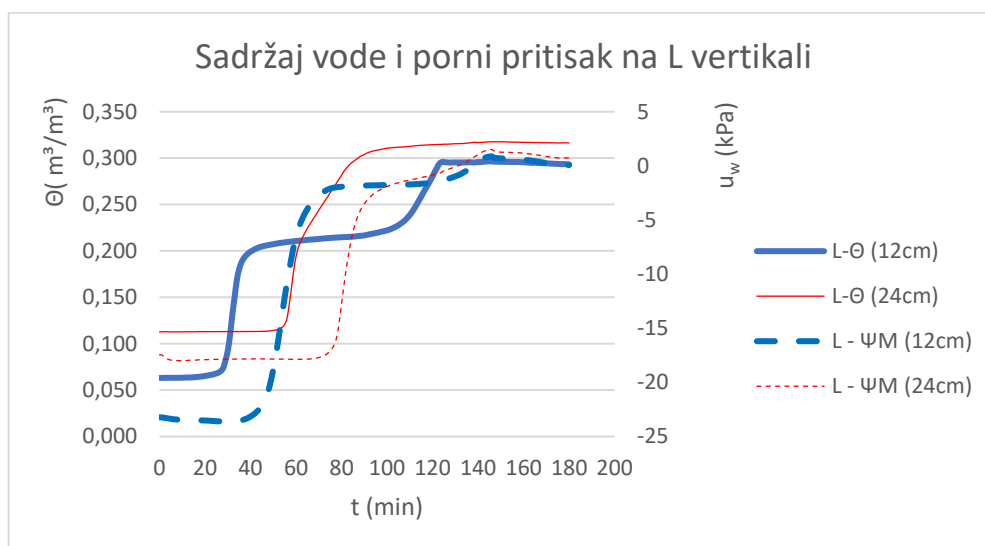
Slika 33: Prikaz klizne plohe i faktora sigurnosti za umanjeni model u pokusu 1

Sa dijagrama prikazanog na slici 34 može se primijetiti da temperatura tla u pokusu 1 najbrže opada u donjem segmentu modela, a najsporije u gornjem segmentu modela. Takav princip opadanja temperature tla možemo pripisati tome da se razina podzemne vode najprije počne podizati u donjem segmentu modela i u tom segmentu najbrže dolazi do hlađenja ugrađenog materijala.



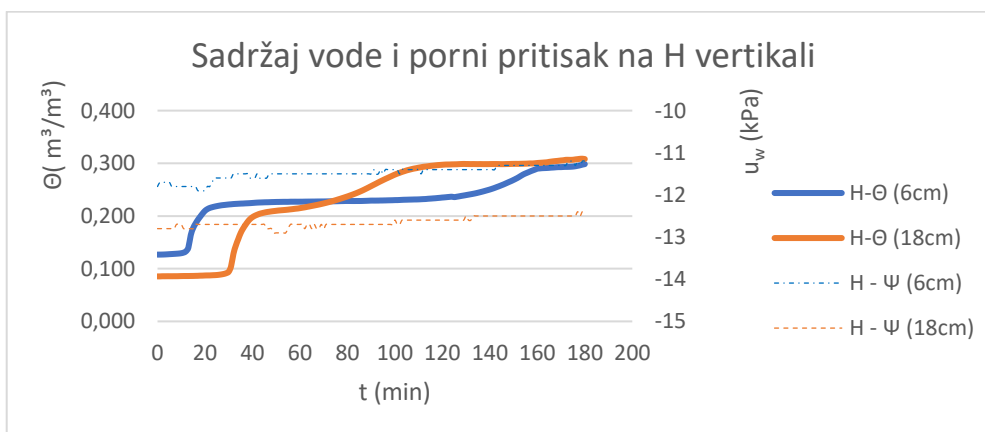
Slika 34: Temperatura tla ugrađenog u modelu u pokusu 1

Sadržaj vode i porni pritisak na L vertikali prikazani su na dijagramu na slici 35. Iz dijagrama se može očitati da sadržaj vode prije poraste u višim slojevima nego u nižim što možemo pripisati porastu razine podzemne vode. U dubljim slojevima sadržaj vode počinje rasti malo kasnije, ali zato kada počne rasti, dolazi do naglog porasta sadržaja vode. Porni pritisak u oba slučaja ima istu tendenciju kao i sadržaj vode, ali se događa sa određenim vremenskim razmakom.



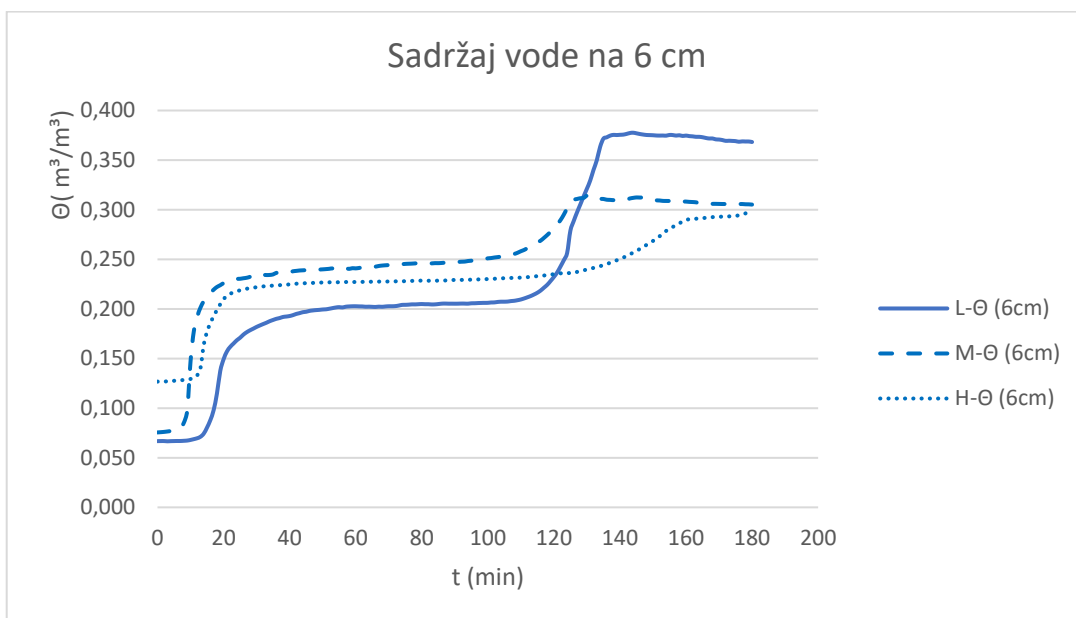
Slika 35: Sadržaj vode i porni pritisak na L vertikalima

Sadržaj vode i porni pritisak na H vertikalima prikazani su na dijagramu na slici 36. Iz ovog dijagrama se može zaključiti da sadržaj vode prije poraste u višim slojevima nego u nižim što možemo pripisati tome da voda koja padne na površinu ne dolazi odmah do dubljih slojeva po H vertikalima nego otječe prema donjim segmentima modela te onda postepeno dolazi do podizanja razine podzemne vode od nožice prema vrhu modela. Porni pritisak u oba slučaja ima tendenciju laganog porasta.



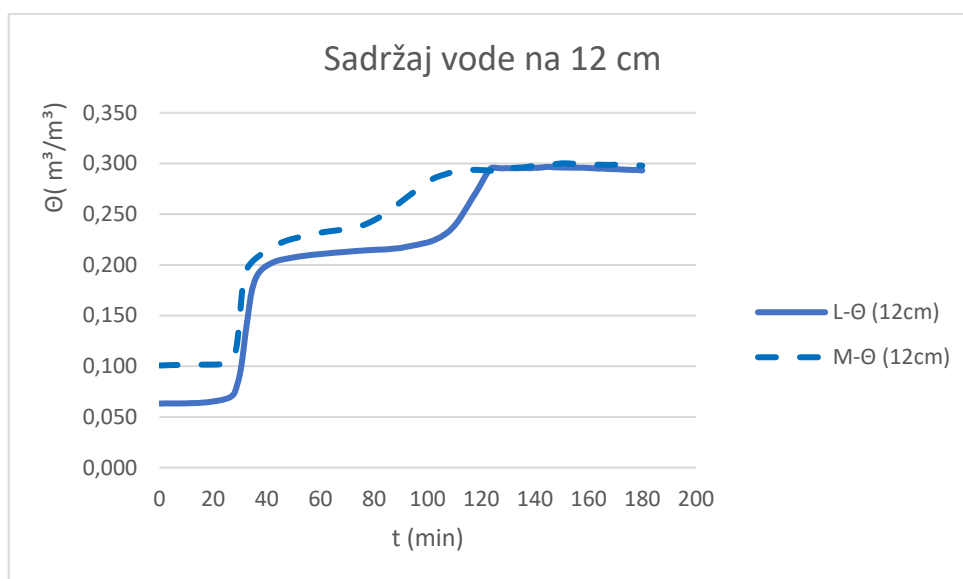
Slika 36: Sadržaj vode i porni pritisak na H vertikalima

Sadržaj vode na dubini od 6 cm je prikazan na slici 37. Dijagrami sadržaja vode u svim segmentima su prilično ujednačeni sve do 120 min trajanja pokusa, jedino što se događaju sa određenim vremenskim razmakom. Nagla promjena sadržaja vode nakon 120 min u donjem i nešto manji porast u srednjem segmentu modela može se pripisati nakupljanju vode i porastu razine podzemne vode u tim dijelovima modela.



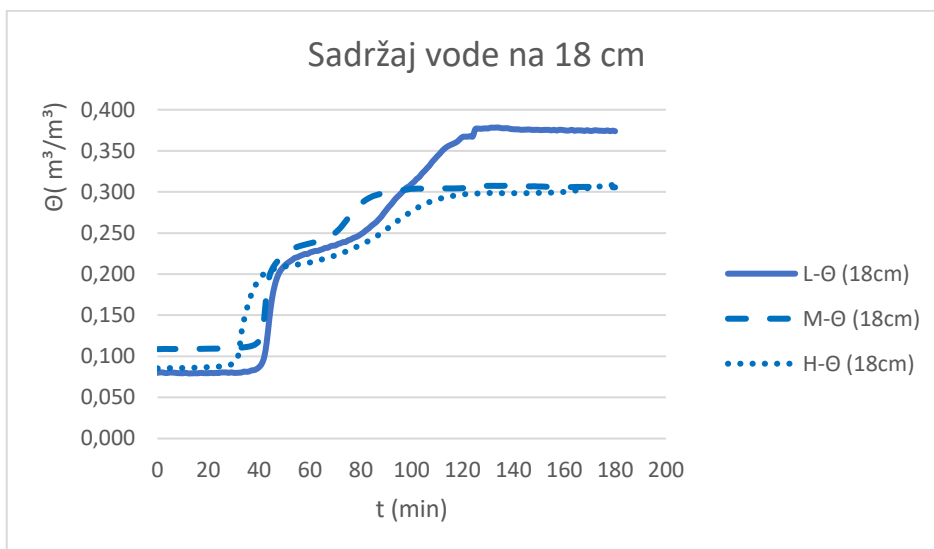
Slika 37: Sadržaj vode na dubini od 6 cm

Sadržaj vode na dubini od 12 cm očitavan je u donjem (L) i srednjem (M) segmentu modela, što je prikazano na slici 38. Može se uočiti da je promjena sadržaja vode u ovim segmentima poprilično ujednačena i da se događa sa malim vremenskim odmakom.



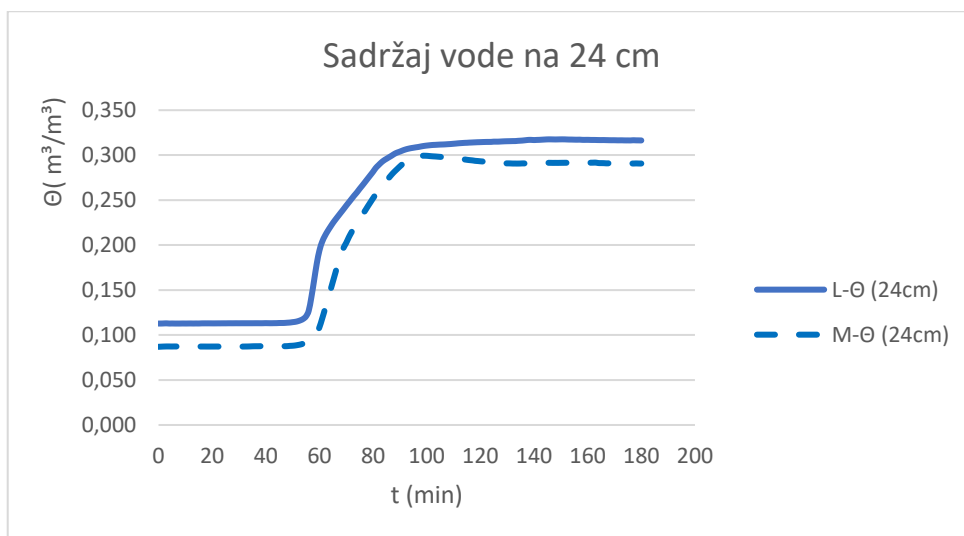
Slika 38: Sadržaj vode na dubini od 12 cm

U svim segmentima modela očitavan je sadržaj vode na dubini od 18 cm. Sa slike 39. može se zamijetiti da se sadržaj vode na ovoj dubini podjednako mijenja u svim segmentima modela sve do 100 min kada dolazi do naglog porasta sadržaja vode u donjem (L) segmentu modela. Nagli porast sadržaja vode u donjem segmentu modela može se pripisati nakupljanju vode u nožici modela koje rezultira povećanjem razine podzemne vode u modelu.



Slika 39: Sadržaj vode na dubini od 18 cm

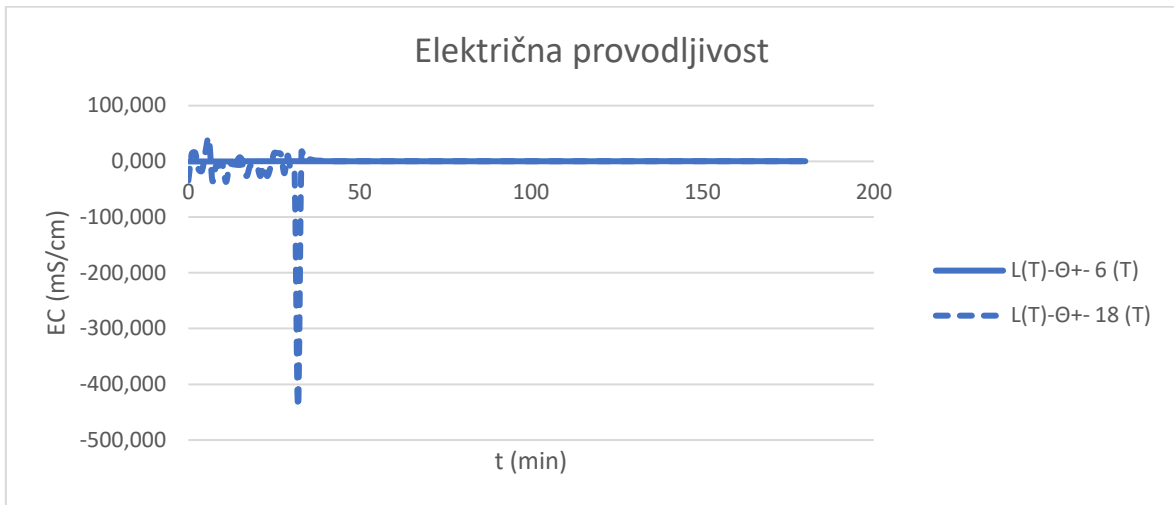
Na slici 40. prikazan je sadržaj vode na dubini od 24 cm u donjem (L) i srednjem (M) segmentu modela. Iz dijagrama je vidljivo da u promatranim segmentima na ovoj dubini sadržaj vode podjednako raste, samo sa malim vremenskim odmakom u srednjem segmentu u odnosu na donji segment.



Slika 40: Sadržaj vode na dubini od 24 cm



Električna provodljivost materijala prilikom pokusa broj 1 prikazana je na slici 41.



Slika 41: Električna provodljivost materijala

## 5.2. Pokus br. 2, $\alpha = 35^\circ$

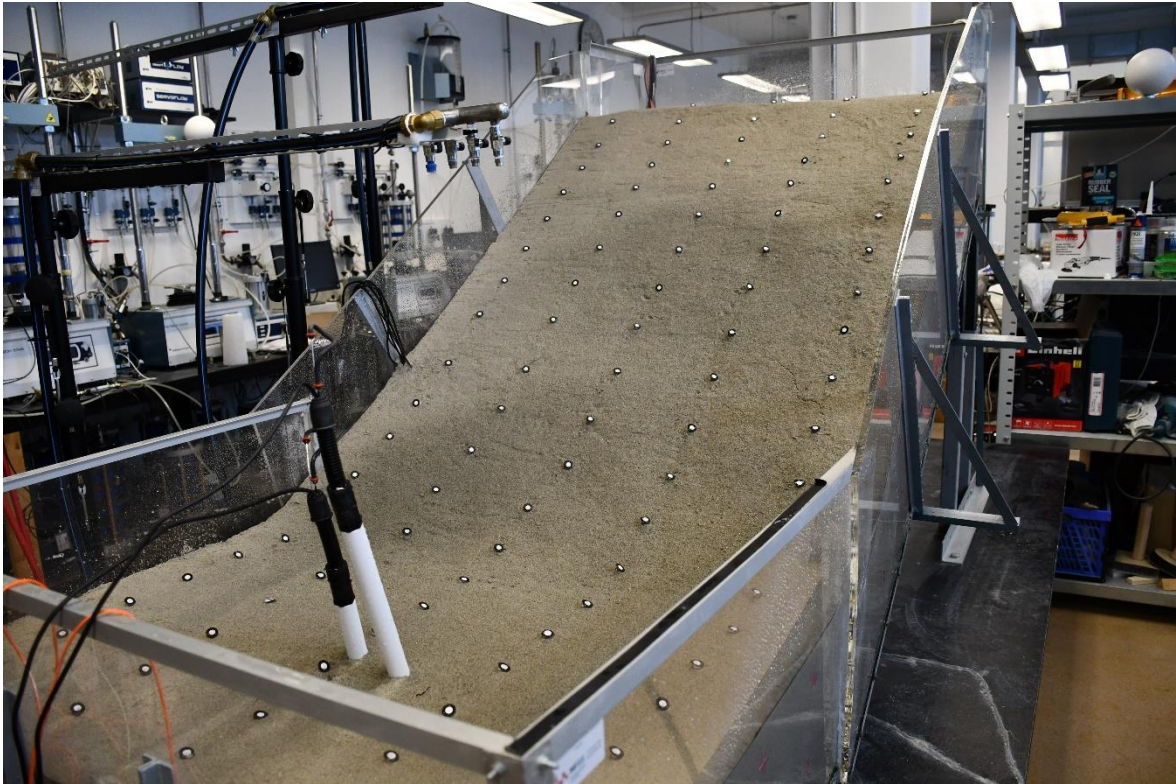
Drugi pokus proveden je 02.04.2020. sa početkom u 10:15. U ovom pokusu koriste se mlaznice 420.326, sa kutom prskanja od  $90^\circ$  pri 2 bara, koje imaju protok od 0,4 l/min. Na slici 42 prikazan je model neposredno prije početka pokusa.



Slika 42: Prikaz modela prije pokusa 2



Na slici 43 prikazana je prva pukotina koja se pojavila 25 minuta nakon početka pokusa, a nedugo nakon pojave prve pukotine nastaje i još nekoliko pukotina što je vidljivo na slici 44.



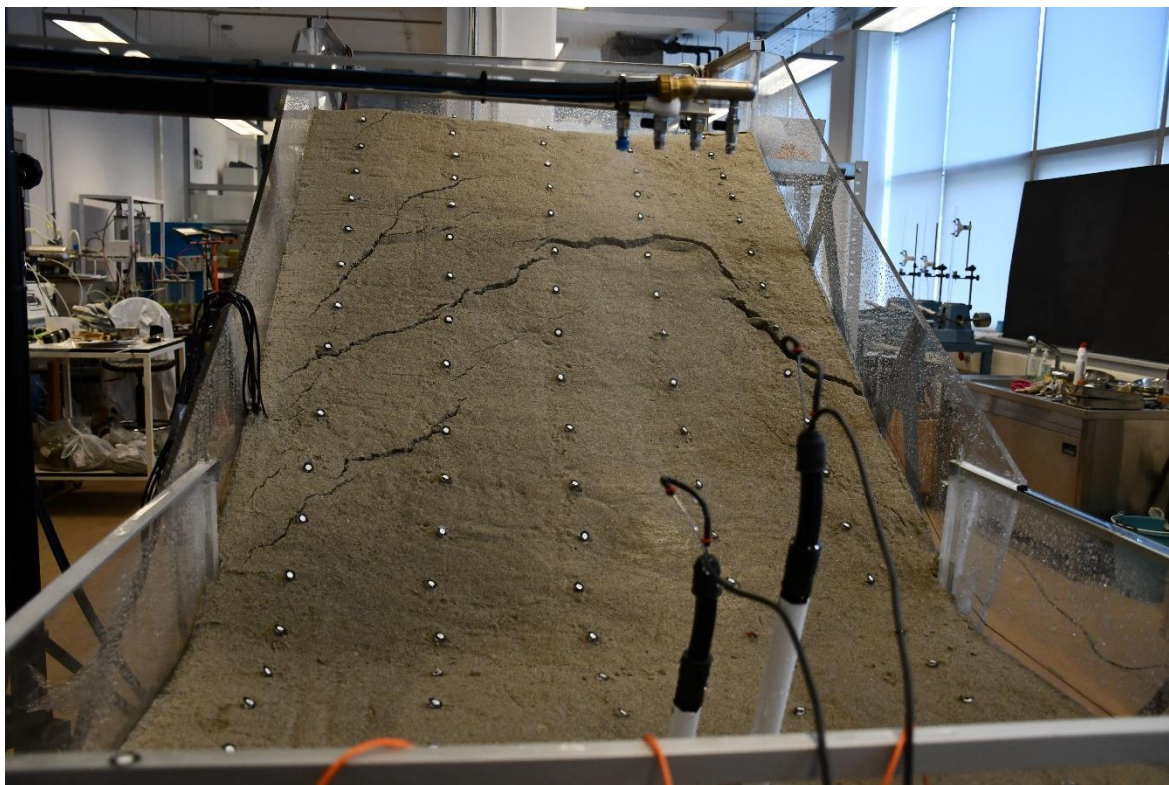
Slika 43: Prikaz prve pukotine u pokusu 2



Slika 44: Prikaz nastanka nekoliko pukotina u pokusu 2



Na slici 45 prikazana je pojava sloma tla, a na slici 46 prikazano je kretanje kliznog tijela.



Slika 45: Prikaz plohe sloma u pokusu 2



Slika 46: Kretanje kliznog tijela u pokusu 2

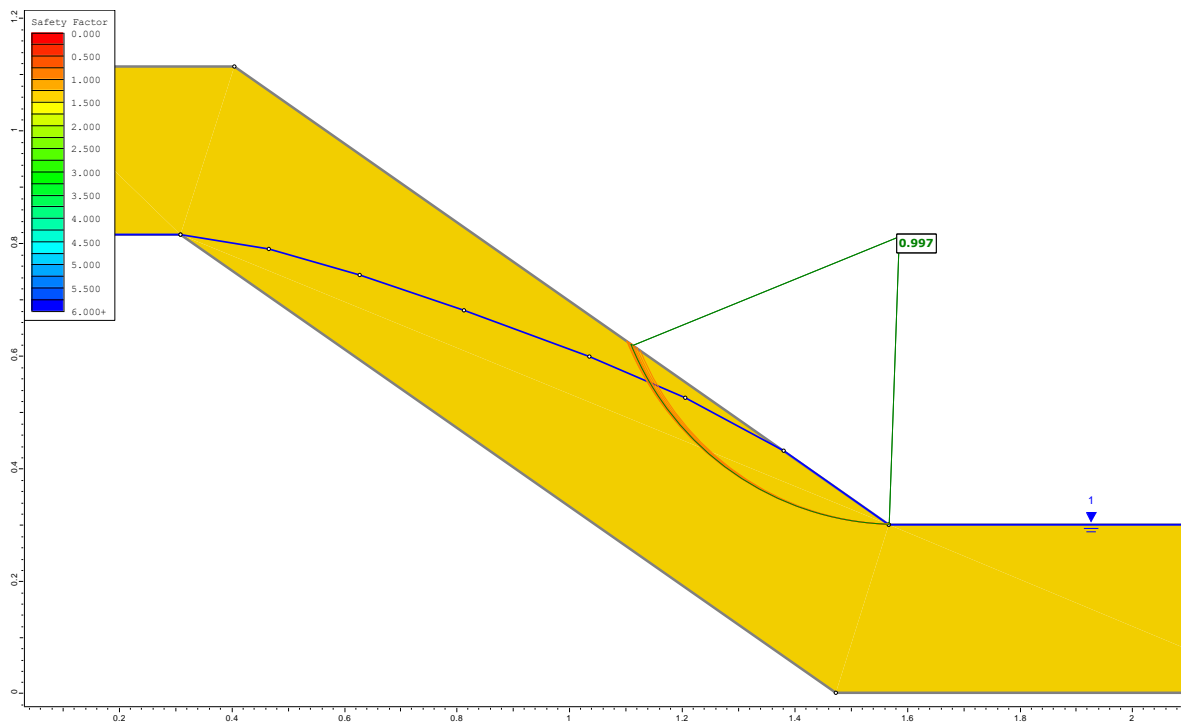
Na slici 47 prikazano je kretanje kliznog tijela nakon 210 minuta, te prikaz potopljene nožice modela. Nedugo nakon što je nožica potopljena, točnije 10 minuta kasnije dolazi do zatvaranja najniže mlaznice te ujedno i do promjene intenziteta oborine. Pred sam kraj pokusa dolazi do povećanja intenziteta oborine, korištenjem mlaznice 490.524, sa kutom prskanja od  $60^\circ$  pri 2 bara, protoka mlaznice od 2 l/min. Nakon stavljanja u upotrebu navedene mlaznice dolazi do pojačanog ispiranja materijala sa površine, koje traje sve dok kraja pokusa koji je bio u 14:55.





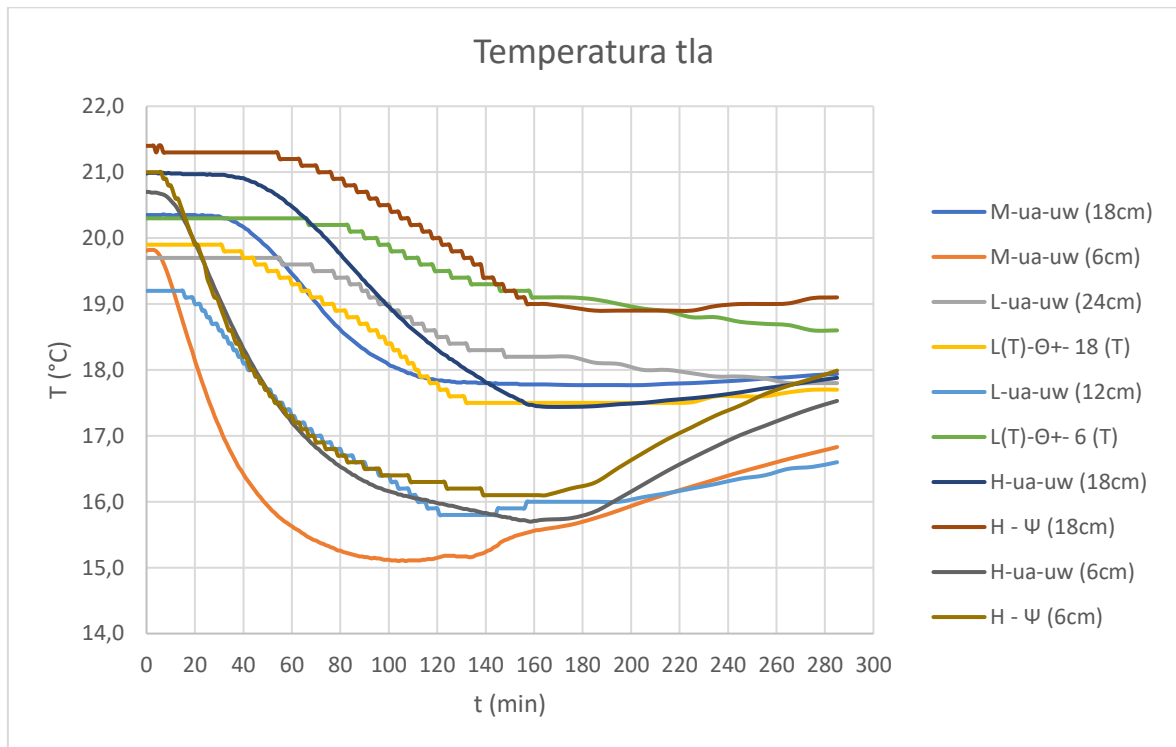
Slika 47: Prikaz kliznog tijela i potopljene nožice modela u pokusu 2

Na slici 48 prikazana je klizna ploha i faktor sigurnosti za umanjeni model klizišta, sa nagibom platforme od  $35^\circ$ , kohezijom  $c=18$  kPa, povećanjem unutarnjeg kuta trenja na  $\Phi=43^\circ$ , te podzemnom vodom koja se nalazi na 30 cm od dna modela



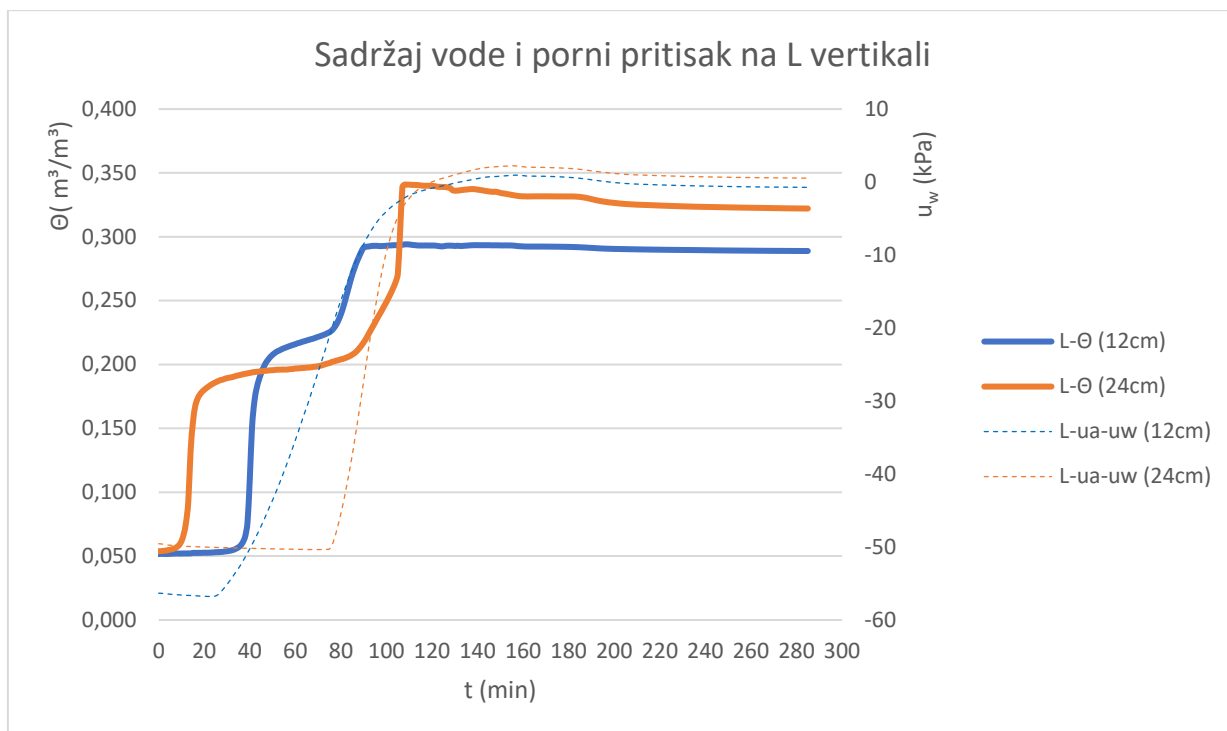
Slika 48: Prikaz klizne plohe i faktora sigurnosti za umanjeni model u pokusu 2

Sa dijagrama prikazanog na slici 49 može se primijetiti da temperatura tla u pokusu 2 najbrže opada u donjem segmentu modela, a najsporije u gornjem segmentu modela. Princip opadanja temperature tla u pokusu 2 možemo poistovjetiti sa opadanjem temperature tla u pokusu 1.



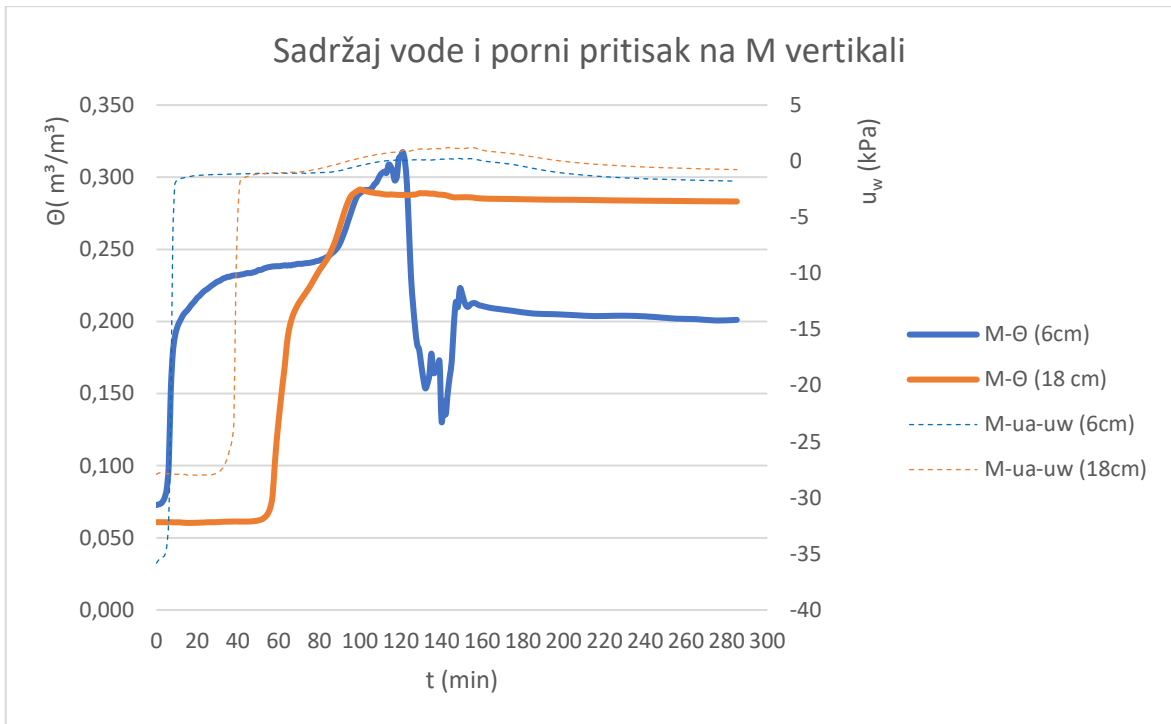
Slika 49: Temperatura tla ugrađenog u modelu u pokusu 2

Sadržaj vode i porni pritisak na L vertikali prikazani su na dijagramu na slici 50. Iz dijagrama se može očitati da sadržaj vode prije poraste u dubljim slojevima nego u plitkim što je rezultat porasta razine podzemne vode. Porni pritisak u oba slučaja ima istu tendenciju kao i sadržaj vode, ali se događa sa određenim vremenskim razmakom.



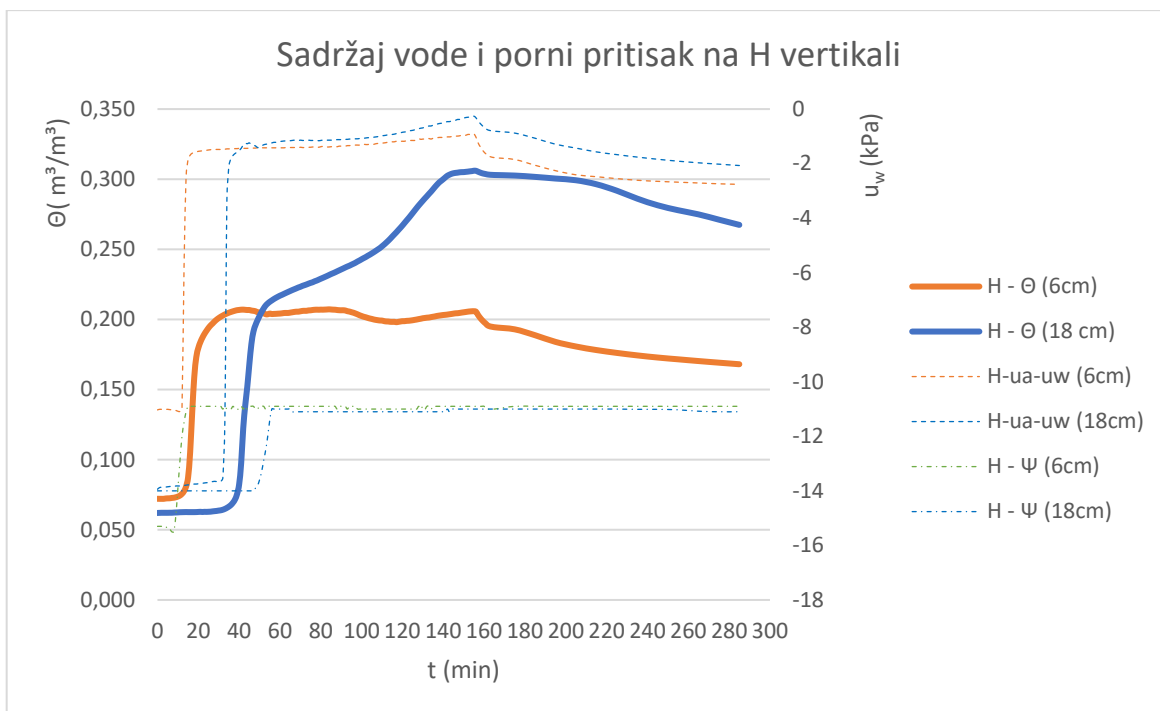
Slika 50: Sadržaj vode i porni pritisak na L vertikali

Sadržaj vode i porni pritisak na M vertikali prikazani su na dijagramu na slici 51. Iz dijagrama se može očitati da sadržaj vode, prije poraste u višim slojevima nego u nižim što je rezultat simulacije oborina i procjeđivanja vode kroz gornje slojeve. Na većim dubinama sadržaj vode počinje rasti malo kasnije, ali zato kada počne rasti, dolazi do naglog porasta sadržaja vode. Oko 120 minute dolazi do pada sadržaja vode u gornjim slojevima, a to se dogodilo zato što je tada nastao slom tla. Porni pritisak u oba slučaja ima istu tendenciju porasta kao i sadržaj vode, ali se događa sa određenim vremenskim razmakom.



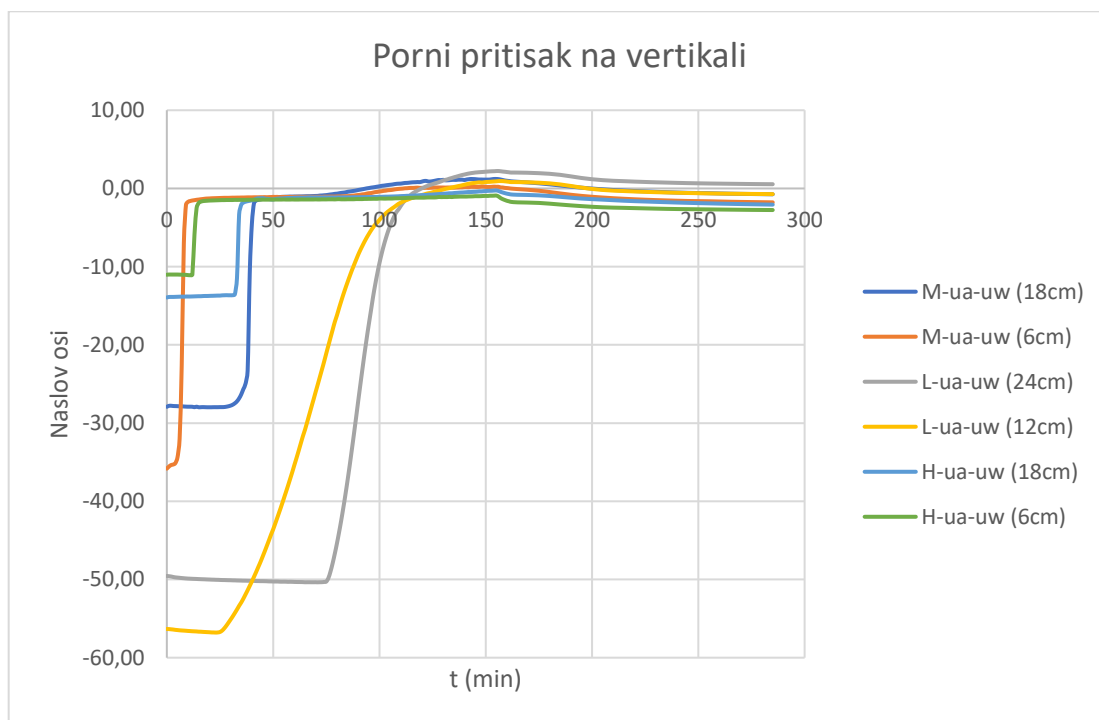
Slika 51: Sadržaj vode i porni pritisak na M vertikali

Sadržaj vode i porni pritisak na H vertikali prikazani su na dijagramu na slici 52. Iz dijagrama se može očitati da sadržaj vode prije poraste u slojevima bliže površini modela nego u dubljim slojevima što je rezultat simulacije oborina i procjeđivanja kroz materijal pokosa. Sadržaj vode u gornjim slojevima nakon što relativno brzo naraste ima tendenciju opadanja, što je rezultat otjecanja vode u dublje slojeve i putovanja vode gravitacijski prema nižim segmentima modela. Na senzoru koji je postavljen na većoj dubini sadržaj vode počinje rasti nešto kasnije nego što je to slučaj u višim slojevima, no kada počne rasti dolazi do naglog porasta i sadržaj vode raste sve dok ne dođe do potpunog zasićenja materijala vodom. U oba slučaja porni pritisak ima skoro identičan trend, ali se događa sa određenim vremenskim razmakom.



Slika 52: Sadržaj vode i porni pritisak na H vertikali

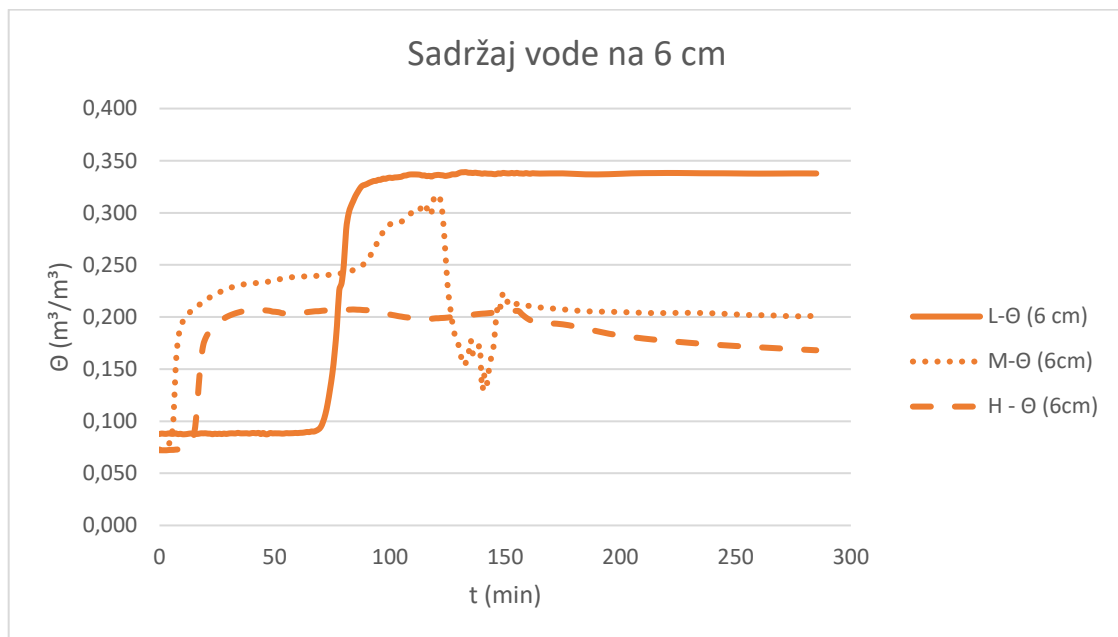
Na slici 53 prikazan je dijagram pornih pritisaka na vertikali u svim segmentima modela po slojevima na kojima se nalaze senzori.



Slika 53: Porni pritisak po vertikali

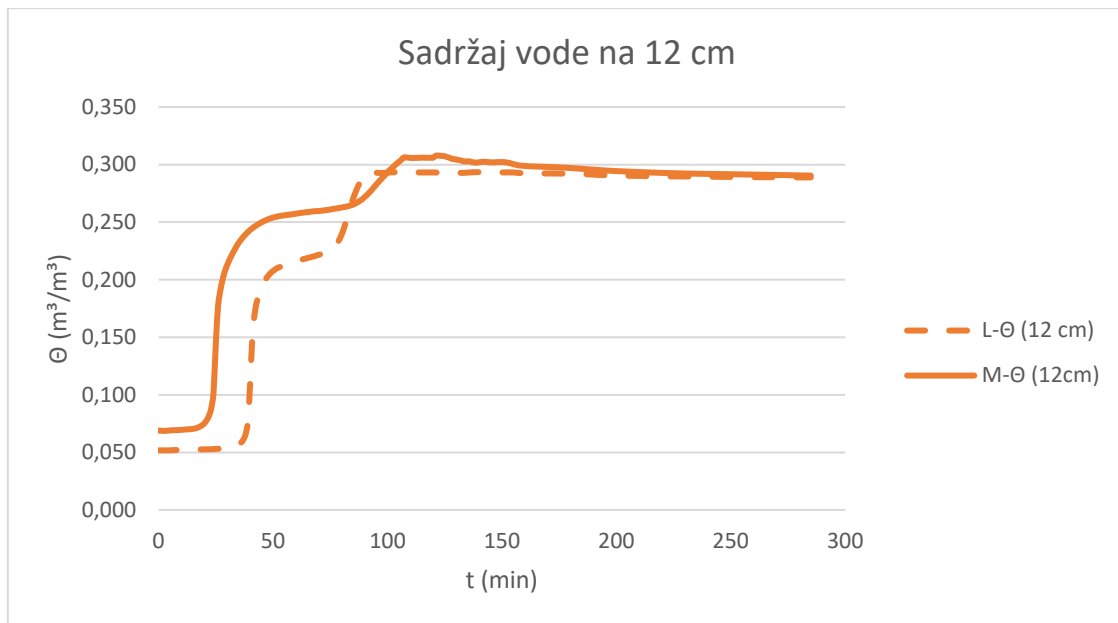


U svim segmentima modela očitavan je sadržaj vode na dubini od 6 cm. Sa slike 54 vidljivo je da najbrže dolazi do porasta vlažnosti u srednjem segmentu, a nedugo nakon toga i u gornjem segmentu. Promjena vlažnosti u donjem segmentu nastaje tek nakon 60 minuta, kada dolazi do naglog povećanja vlažnosti iz čega se može zaključiti da se razina podzemne vode u nožici modela naglo podigla. Promatrajući krivulju vlažnosti srednjeg segmenta na promatranoj dubini od 6 cm, vidljivo je da nakon 120 minute dolazi do naglog pada vlažnosti, što se može pripisati pojavi plohe sloma i klizanju materijala tla.



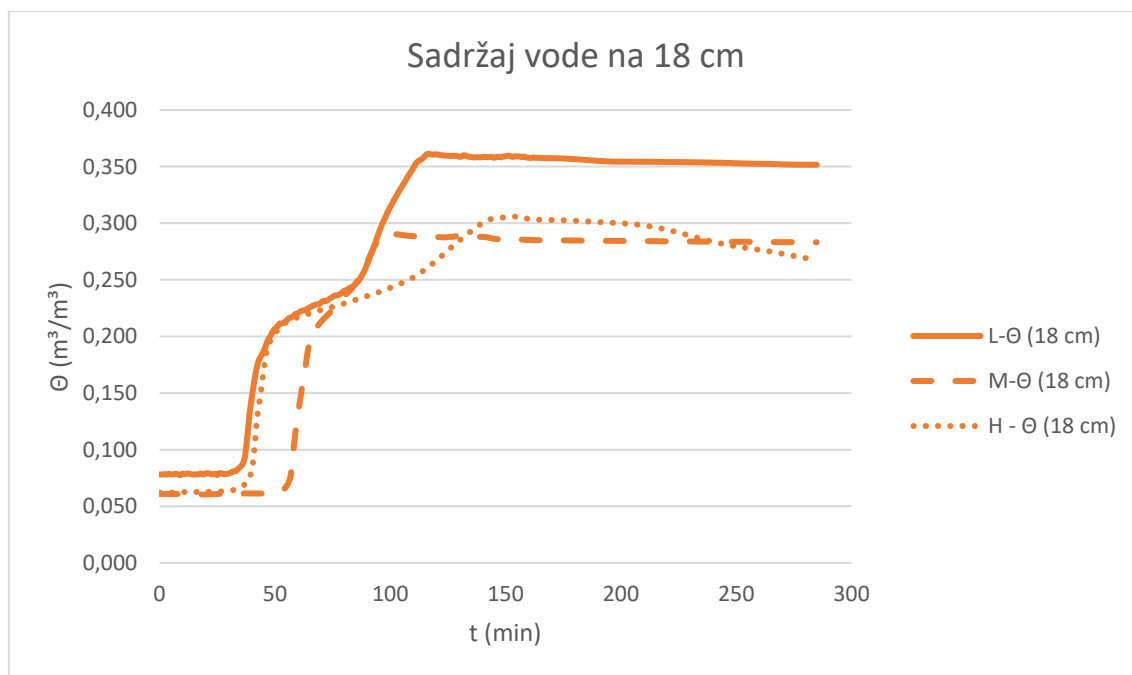
Slika 54: Sadržaj vode na dubini od 6 cm

Sadržaj vode na dubini od 12 cm očitavan je u donjem (L) i srednjem (M) segmentu modela, što je prikazano na slici 55. Može se uočiti da je promjena sadržaja vode u ovim segmentima poprilično ujednačena i da se događa sa malim vremenskim odmakom.



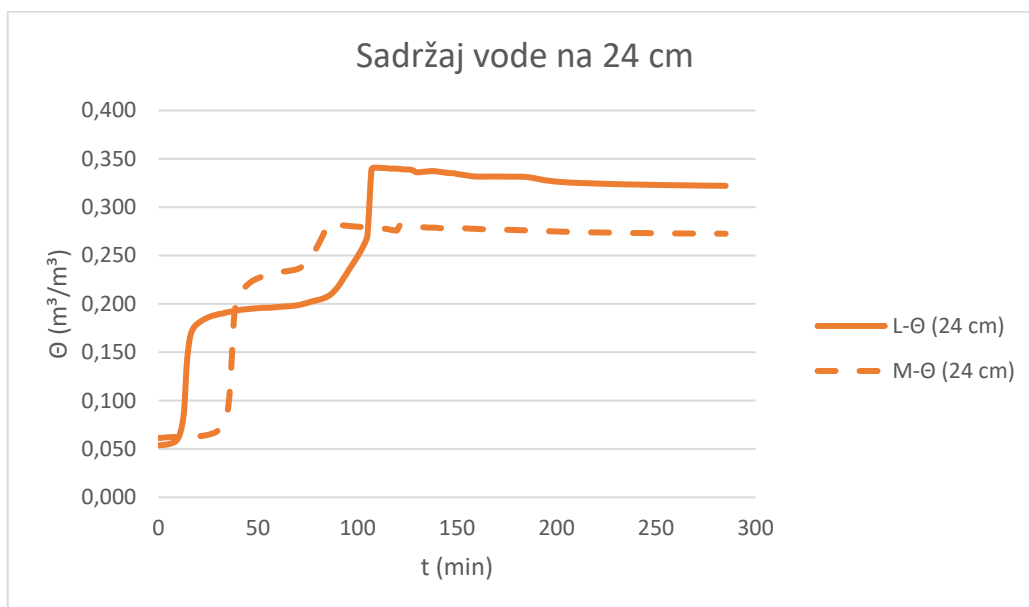
Slika 55: Sadržaj vode na dubini od 12 cm

U svim segmentima modela očitavan je sadržaj vode na dubini od 18 cm. Sa slike 56. može se zamijetiti da se sadržaj vode na ovoj dubini podjednako mijenja u svim segmentima modela sve do 90 min kada dolazi do naglog porasta sadržaja vode u donjem (L) segmentu modela. Nagli porast sadržaja vode u donjem segmentu modela može se pripisati nakupljanju vode u nožici modela koje rezultira povećanjem razine podzemne vode u modelu.



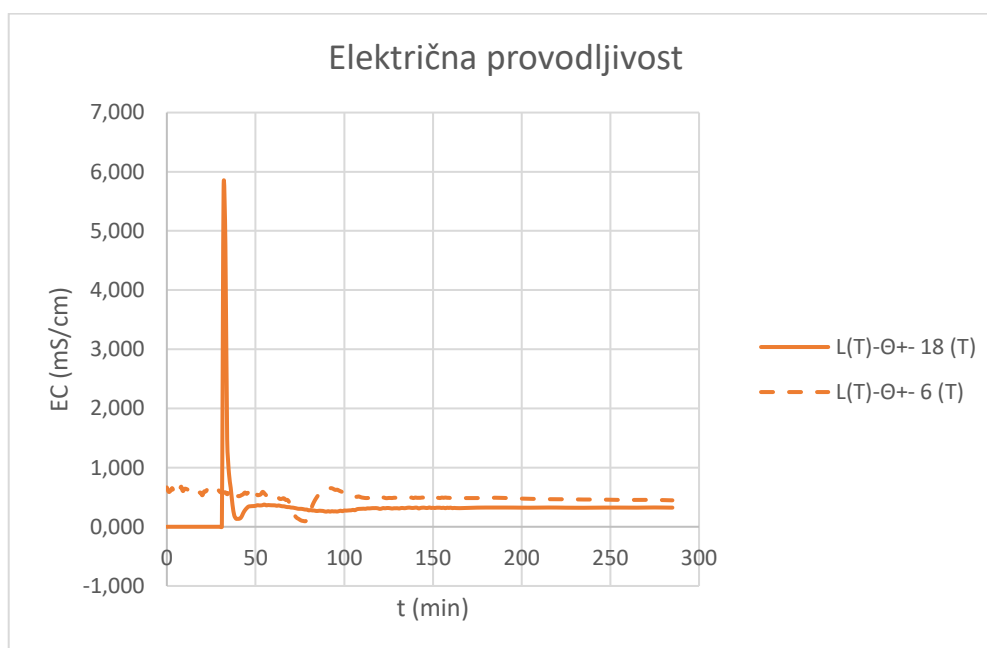
Slika 56: Sadržaj vode na dubini od 18 cm

Sadržaj vode na dubini od 24 cm očitavan je u donjem (L) i srednjem (M) segmentu modela, što je prikazano na slici 57. Može se uočiti da se povećanje sadržaja vode u donjem segmentu događa prije i intenzivnije nego u srednjem (M) segmentu, iz čega se može zaključiti da je došlo do nakupljanja vode u nožici modela, koje rezultira porast razine podzemne vode u modelu.



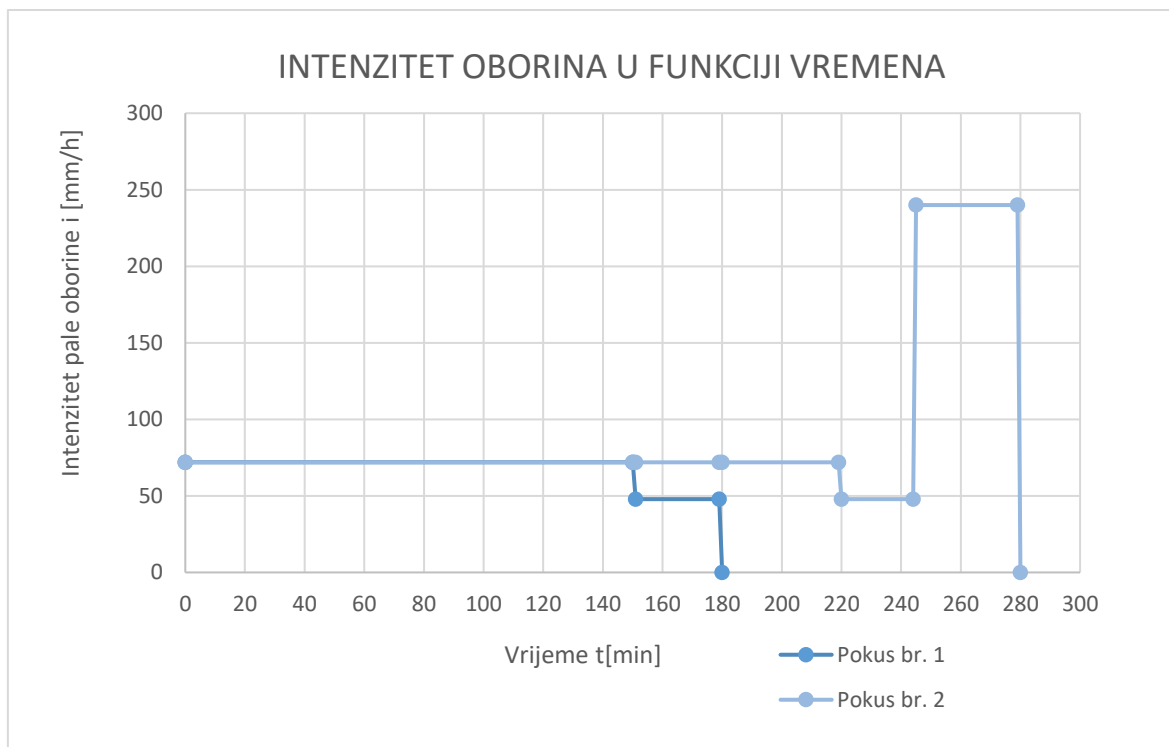
Slika 57: Sadržaj vode na dubini od 24 cm

Električna provodljivost materijala prilikom pokusa broj 2 prikazana je na slici 58.



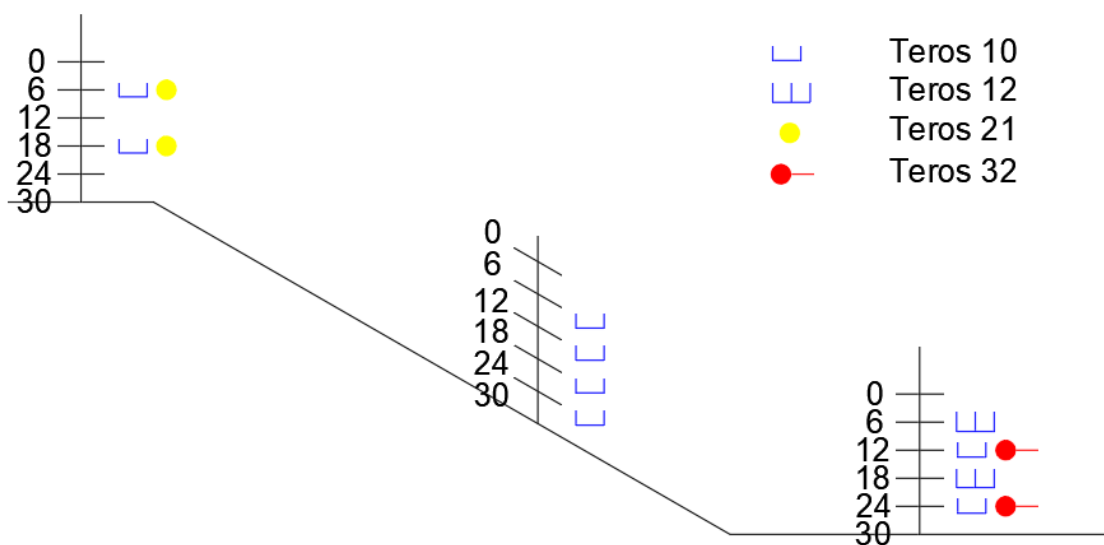
Slika 58: Električna provodljivost materijala

Na slici 59 dan je grafički prikaz intenziteta oborina u funkciji vremena. Na početku pokusa 1 i pokusa 2 za simulaciju padanja oborina korištene su iste mlaznice 460.326 sa kutom prskanja od 90°. Te mlaznice pri tlaku od 2 bara imaju protok od 0,4 l/min. U pokusu 1 nakon 151 min dolazi do zatvaranja najniže mlaznice i tim činom se ujedno smanjuje intenzitet oborine u pokusu. U pokusu 2, nakon 220 min također dolazi do zatvaranja najniže mlaznice i smanjenja intenziteta oborine. U 245 min trajanja pokusa 2 dolazi do promjene intenziteta i otvara se mlaznica 490.524, sa kutom prskanja od 60°. Navedena mlaznica je povećala intenzitet oborine u pokusu i ona je bila u funkciji sve do kraja ispitivanja u modelu.



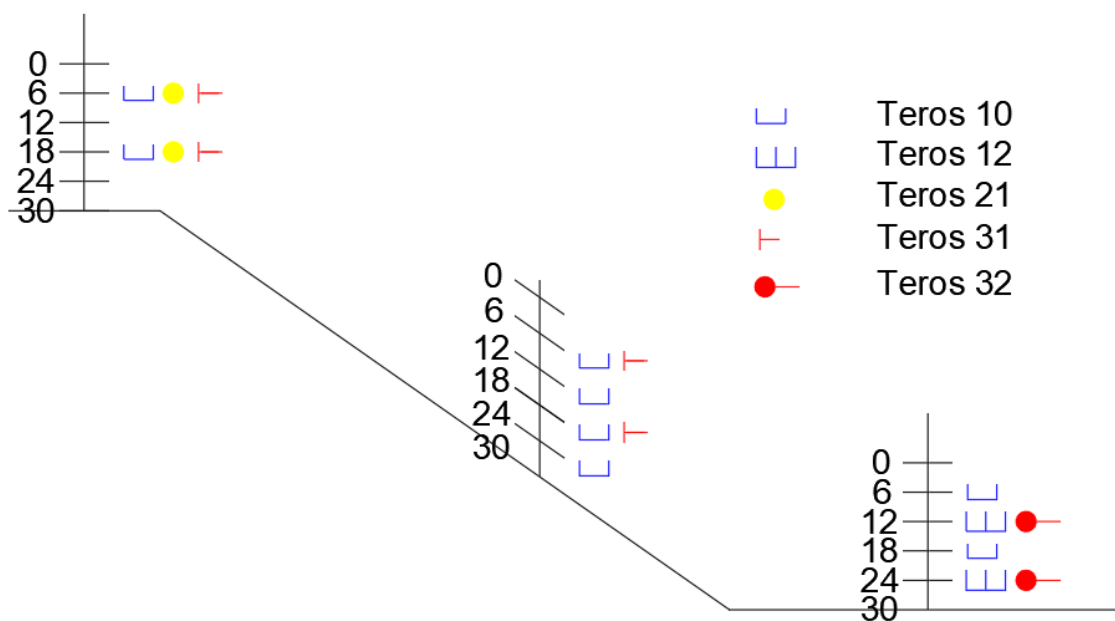
Slika 59: Grafički prikaz intenziteta oborina u funkciji vremena

Na slici 60 prikazane su debljine ugrađenih slojeva te vrsta senzora i pozicija ugradnje senzora u modelu za pokus br. 1.



Slika 60: Pozicije senzora u pokusu 1

Na slici 61 prikazane su debljine ugrađenih slojeva te vrsta senzora i pozicija ugradnje senzora u modelu za pokus br. 2.



Slika 61: Pozicije senzora u pokusu 2

## 6. ZAKLJUČAK

Tema ovog diplomskog rada je osvrt na stabilnost umanjenih modela klizišta koje se simuliraju kišom. Da bi se bolje razumjela problematika stabilnosti kosina razrađeni su osnovni pojmovi vezani za stabilnost kosina.

Glavni zadatak ovog diplomskog rada je analizirati stabilnost umanjenog modela klizišta koje se simulira kišom.

U geotehničkom inženjerstvu, zbog značajnih utjecaja i posljedica klizišta na stanovništvo i okoliš, klizišta su jedna od najpopularnijih, a ujedno i najkompleksnijih tema. Klizanje predstavlja veoma ozbiljan problem čak i ako se ne radi o katastrofalnim klizanjima.

Jedan od primarnih uzroka aktivacije klizišta je saturacija tla vodom, a može se pojaviti uslijed intenzivnih oborina ili promjena u režimu podzemne vode. Promatranjem hidrogeoloških uvjeta u tlu vidljivo je da nije moguća brza evakuacija procjedne vode iz kosine, pa se iz tog razloga ona nakuplja u tlu, što za posljedicu ima povećanje poretnih pritisaka u tlu. Na temelju navedenih saznanja može se zaključiti da su kretanja procjednih voda zasigurno značajna i da su uzrok destabilizacije kosine i formiranja klizišta. Izbijanjem vode u nožici klizišta potvrđuju se saturirani uvjeti u kliznom tijelu.

Iz provedenih ispitivanja na modelima zaključuje se da je glavni razlog nastanka pomaka i razvoja klizišta destabilizacija nožice kosine i visoka razina procjednih voda. Stabilizaciju kosine moguće je izvesti snižavanjem razine podzemnih voda, a isto je moguće postići uređenjem površinske odvodnje te izvedbom drenova.

Umanjeni model koristi se za eksperimentalno proučavanje neke pojave u vremenu i prostoru, a rezultati eksperimenta mogu se prenijeti na bilo koji proces u prirodi čije su veličine proporcionalne sa veličinama iz modela. Pomoću umanjenog modela moguće je predvidjeti ponašanje nekog fizikalnog procesa. Zbog svojih malih dimenzija umanjeni model omogućava jednostavno i relativno jeftino prikupljanje podataka u odnosu na složeni proces prikupljanja podataka u prirodi. Jedna od prednosti umanjenih modela je i ta da je pokuse moguće ponavljati, te da se model nalazi u kontroliranim uvjetima. Da bi se model smatrao pravovaljanim on mora biti ispravno projektiran, a ako nije onda i uz

korištenje najsofisticiranije opreme i metode mjerenja može služiti jedino za donošenje krivog zaključka.

Podaci sa mjernih uređaja, poput vlažnosti tla, površnih pritisaka u tlu i električne provodljivosti, koji se mogu dobiti tijekom trajanja ispitivanja služe za dobivanje boljeg uvida u problematiku promatranog modela klizišta, te se na temelju tih podataka može zaključiti da promjenom vlažnosti materijala tla i povećanjem razine podzemne vode dolazi do destabilizacije pokosa.

Iz promatranih pokusa proizlazi zaključak da postepenim povećanjem razine podzemne vode i povećanjem nagiba kliznog tijela ubrzano dolazi do smanjenja kohezije unutar materijala tla te brže nastaju pukotine koje nakon nekog vremena rezultiraju narušavanjem stabilnosti kosine i pojavom sloma tla.

## 7. LITERATURA I IZVORI

- [1] Effect of Groundwater on Landslide Triggering, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, Switzerland, 2011
- [2] Rahardjo H, Lee T.T, Leong E.C., Rezaur R.B. (2004) A Flume for Assessing Flux Boundary Characteristics in Rainfall-Induced Slope Failure Studies, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 2
- [3] Nonveiller, E., *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Školska knjiga, Zagreb, 1979.
- [4] Cao L, Zhang J, Wang Z, Liu F, Liu Y, Zhou Y (2019) Dynamic response and dynamic failure mode of the slope subjected to earthquake and rainfall, *Landslides* (2019) 16:1467-1482
- [5] Highland L M and Bobrowsky P 2008 *The landslide Handbook - A guide to understanding landslides* US Geol. Surv. Circ. 1 147
- [6] Cruden , D . M . , Varnes D . J . 1996 *Landslides: Investigation and Mitigation* Environ. Eng. Geosci. IV 277 8
- [7] Varnes D 1978 *Slope Movement Types and Processes* Transp. Res. Board Spec. Rep.
- [8] Iltad T., Marr J.G., Elverhoi A., Harbitz C.B. (2004) Laboratory studies of subaqueous debris flows by measurements of pore-fluid pressure and total stress, *Marine Geology* 213 403– 414
- [9] Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Priručnik za upotrebu platforme za fizički model ispitivanja klizišta, Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja IP-01-2018-1503, ModLandRemSS
- [10] Hungr O, Morgenstern N.R. (1984) Experiments on the flow behaviour of granular materials at high velocity in an open channel, *Geotechnique* 34, No. 3, 405-413
- [11] Arbanas Ž, Pajalić S, Jagodnik V, Peranić J, Vivoda Prodan M, Đomlija P, Dugonjić Jovančević S, Čeh N (2019) Development of physical model of landslide remedial constructions' behaviour. Proc of 4th Regional Symposium on Landslides in Adriatic Balkan Region, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 23–25 October 2019. Geotechnical Society of Bosnia and Herzegovina, Sarajevo, pp 103–108
- [12] Arbanas Ž, Jagodnik V, Peranić J, Pajalić S, Vivoda Prodan M, Čeh N (2020) Physical Model of Rainfall Induced Landslide in Flume Test: Preliminary Results. Proc. of



4th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Lulea University of Technology, pp 115–122

[13] Sharma R.H., Nakagawa H. (2010) Numerical model and flume experiments of single- and two-layered hillslope flow related to slope failure, *Landslides* (2010) 7:425-432

[14] Askarinejad A, Akca D, Springman S.M., (2018) Precursors of instability in a natural slope due to rainfall: a full-scale experiment, *Landslides* 15:1745–1759

[15] Iverson R.M., Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches, (2012) *Journal of geophysical research*, vol. 117

[16] Acharya G., Cochrane T.A., Rainfall induced shallow landslides on sandy soil and impacts on sediment discharge: A flume based investigation, (2008) *The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*

[17] Beddoe R.A., Take W.A., Loss of slope support due to base liquefaction: comparison of 1g and centrifuge landslide flume experiments, (2016) *Soils and Foundations*, vol. 56, Issue 2, pages 251-264

[18] Catane S.G., Zarco M.A.H., Cordero C.J.N., Kaimo R.A.N., Saturay, Jr. R.M., Laboratory experiments on steady state seepage-induced landslides using slope models and sensors, (2011) *Science Diliman* 23:1, 17-30

[19] Egeli I., Firat Pulat H., Mechanism and modelling of shallow soil slope stability during high intensity and short duration rainfall, *Scientia Iranica A* (2011) 18 (6), 1179-1187

[20] Hakro M.R., Harahap I.S.H., Memon I.A., Model experiment on rainfall-induced slope failures with moisture content measurements, (2016) *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology* 13(2): 122-130

[21] Wang G., Sassa K., Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests, (2001) *Geotechnique* 51, No. 7, 587-599

[22] METER Group, Inc. USA, TEROS 10 Manual web, 18241-03, 30.11.2020.

[23] METER Group, Inc. USA, TEROS 11/12 Manual web, 18225-04, 6.1.2020.

[24] METER Group, Inc. USA, TEROS 21 Manual web, 18405-00, 30.6.2020.

[25] METER Group, Inc. USA, TEROS 31 Manual web, 18385-00, 31.12.2020.

[26] METER Group, Inc. USA, TEROS 32 Manual web, 18312-01, 27.3.2020.

[27] [https://modland.uniri.hr/?page\\_id=4067&lang=en](https://modland.uniri.hr/?page_id=4067&lang=en) 30.08.2021.