

# Analiza utjecaja gabionske potporne konstrukcije na stabilnost kosine u umanjenom modelu

---

Tomljanović, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:104723>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-11**



Repository / Repozitorij:

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



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Ante Tomljanović**

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

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2022.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij Građevinarstvo  
Smjer: Hidrotehnika  
Kolegij: Stabilnost kosina**

**Ante Tomljanović  
JMBAG: 0082050830**

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

**Diplomski rad**

**Rijeka, studeni 2022.**

Rijeka, 7. studenoga 2022.

Zavod: **Zavod za hidrotehniku i geotehniku**  
Predmet: **Stabilnost kosina**  
Grana: **2.05.01 geotehnika**

## DIPLOMSKI ZADATAK br. 119

Pristupnik: **Ante Tomljanović (0082050830)**  
Studij: **Građevinarstvo**  
Modul: **Hidrotehnika**

Zadatak: **STABILNOST KOSINA U UMANJENOM MODELU KLIZIŠTA**

Opis zadatka:

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 mornoj 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.

Zadatak uručen pristupniku: 15. ožujka 2022.  
Rok za predaju rada: 7. studenoga 2022.

Mentor:

---

Prof. dr. sc. Željko Arbanas

---

Doc. dr. sc. Josip Peranić (komentor)

## **IZJAVA**

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

---

Ante Tomljanović

U Rijeci, 2. studenog 2022

Naziv studija: Diplomski studij Građevinarstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

## **IZJAVA**

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

Voditelj projekta: Prof.dr.sc. Željko Arbanas

Šifra projekta: IP-2018-01-1503

Financijer projekta: Hrvatska naklada za znanost

Pravna nadležnost: Građevinski fakultet Sveučilište u Rijeci

U Rijeci, 07. studeni 2022.

Mentor:

Prof.dr.sc. Željko Arbanas

## **ZAHVALA**

*Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Željku Arbanasu na vodstvu prilikom izrade diplomskog rada i svom prenesenom stručnom znanju na brojnim kolegijima tijekom studiranja*

*Također se zahvaljujem, komentoru dr.sc. Josipu Peraniću na stručnom vodstvu tijekom provođenja pokusa izdvojenom vremenu prilikom konzultacija, te smjernicama prilikom izrade ovog diplomskog rada*

## SAŽETAK

Prema Crudenu klizište se definira kao pomicanje mase stijena, krhotina ili zemlje niz padinu. Do klizanja tla dolazi kada se poremeti njegova stabilnosti, a mogu je prouzročiti prirodne pojave ili čovjek svojim djelovanjem. Takve pojave klizanja tla su učestale, vrlo opasne te prouzrokuju velike materijalne štete i ljudske žrtve diljem svijeta. Zadatak ovog diplomskog rada je utvrditi kako mjere sanacije utječu na stabilnost klizišta provedbom laboratorijskih ispitivanja umanjenog fizičkog modela klizišta. Ovakvim ispitivanjima dobivamo korisne podatke o klizištima i načinima na koje možemo provoditi sanacije kosina na kojima bi se potencijalno moglo pojaviti klizanje tla. Preko brojnih senzora ugrađenih u model saznajemo na koji se način mijenjaju vlažnost i porni tlakovi u modelu. Temeljem analize tih podataka možemo promatrati razlike u ponašanju modela na kojem su provedene mjere sanacije u odnosu na model na kojem to nije učinjeno.

**Ključne riječi:** stabilnost kosina, model klizišta, mjere sanacije, vlažnost, porni tlak, analize mjerenja, vlažnost,

## ABSTRACT

According to Cruden, a landslide is defined as the movement of a mass of rock, debris or soil down a slope. Land slippage occurs when its stability is disturbed, and it can be caused by natural phenomena or by human action. Such occurrences of landslides are frequent, very dangerous and cause great material damage and human casualties all over the world. The task of this thesis is to determine how rehabilitation measures affect the stability of the landslide by conducting laboratory tests of a reduced physical model of the landslide. Through these tests, we get useful information about landslides and the ways in which we can carry out rehabilitation of slopes where landslides could potentially occur. Through numerous sensors built into the model, we find out how humidity and pore pressures change in the model. Based on the analysis of these data, we can observe the differences in the behavior of the model on which rehabilitation measures were implemented compared to the model on which this was



not done. **Key words:** slope stability, landslide model, rehabilitation measures, humidity, pore pressure, measurement analysis, humidity,

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. KLIZIŠTA .....	2
2.1 Elementi klizišta .....	7
2.2 Tipovi klizišta .....	7
2.3 Uzroci klizišta.....	14
2.4 Podaci potrebni za projektiranje zaštite i sanacije.....	15
3. UMANJENI MODELI KLIZIŠTA SIMULIRANIH KIŠOM.....	17
4. PLATFORMA ZA ISPITIVANJE KLIZIŠTA PRI STATIČKOM OPTEREĆENJU .	20
4.1 Mjerna oprema.....	23
5. MJERENJA PROVEDENA U EKSPERIMENTIMA I NUMERIČKA ANALIZA ...	30
5.1 Model bez mjera sanacije .....	31
5.2 Model saniran gabionskom potpornom konstrukcijom .....	44
5.3 Usporedba modela .....	56
6. ZAKLJUČAK.....	61
7. LITERATURA I IZVORI .....	63

## POPIS TABLICA

Tablica 1: uzroci pojave klizišta Highland i Bobrowsky (2008.) [3] .....	6
Tablica 2: Specifikacije senzora TEROS 10. [15] .....	24
Tablica 3: Specifikacije senzora TEROS 12. [16] .....	25
Tablica 4: Specifikacije senzora TEROS 21. [17] .....	26
Tablica 5: Specifikacije senzora TEROS 31. [18] .....	28
Tablica 6: Specifikacije senzora TEROS 32. [29] .....	29
Tablica 7: fizikalna svojstva mješavine pijeska i kaolina .....	30

## POPIS SLIKA

Slika 1. Faze pomicanja tla na kosini [3] .....	3
Slika 2. Povećanje razine vode uslijed erozije vodotoka [3] .....	5
Slika 3. Elementi klizišta [7] .....	7
Slika 4. Shema prevrtanja [7] .....	8
Slika 5. Shema odrona [7] .....	9
Slika 6. Shema rotacijskog klizišta [7] .....	10
Slika 7. Shema translacijskog klizišta [7] .....	11
Slika 8. Shema bočnog širenja tla [7] .....	12
Slika 9. Shema toka [7] .....	13
Slika 10. Shema modela platforme za ispitivanje klizišta u statičkim uvjetima [13] .....	20
Slika 11. Oznake segmenata na umanjenom modelu klizišta [14] .....	21
Slika 12. Dimenzije pleksiglas stijenki modela i drenažnih otvora [13] .....	21
Slika 13. Ugradnja mjerne opreme i materijala [13] .....	22
Slika 14: Senzor TEROS 10 [14] .....	23
Slika 15: Senzor TEROS 12 [15] .....	23
Slika 16: Senzor TEROS 21 [17] .....	26
Slika 17: Senzor TEROS 31 [18] .....	27
Slika 18: Senzor TEROS 32 [19] .....	28
Slika 19: Model bez mjera sanacije prije početka pokusa .....	31
Slika 20: Pojava prve pukotine u modelu bez mjera sanacije .....	32
Slika 21: Pojava nekoliko pukotina u modelu bez mjera sanacije (t=35 min) .....	32

Slika 22: Pojava plohe sloma u modelu bez mjera sanacije (t=40 min).....	33
Slika 23: Gibanje kliznog tijela u modelu bez mjera sanacije (t=120 min) .....	34
Slika 24: Klizno tijelo i potopljena noica modela bez mjera sanacije.....	35
Slika 26: Sadržaj vode i porni tlak na M vertikali.....	37
Slika 27: Sadržaj vode i porni tlak na H vertikali.....	38
Slika 28: Porni tlak po svim vertikalama .....	39
Slika 29: Sadržaj vode na 6 cm dubine.....	40
Slika 31: Sadržaj vode na 18 cm dubine.....	41
Slika 32: Sadržaj vode na 24 cm dubine.....	42
Slika 33: Klizna ploha i faktor sigurnosti za umanjeni model u pokusu bez mjera sanacije i bez vode .....	43
Slika 34: Kritična klizna ploha i razina podzemne vode za umanjeni model bez mjera sanacije .....	43
Slika 35: Model prije početka pokusa .....	44
Slika 36: Pojava prve pukotine u gornjoj zoni modela (t=35 min) .....	45
Slika 37: Potpuno potapanje nožice (t=135 min) .....	46
Slika 38: Ispiranje materijala preko zone sanacije .....	47
Slika 39: Sadržaj vode i porni tlak na L vertikali.....	48
Slika 40: Sadržaj vode i porni tlak na M vertikali.....	49
Slika 41: Sadržaj vode i porni tlak na H vertikali.....	50
Slika 42: Porni tlak po svim vertikalama .....	51
Slika 43: Sadržaj vode na 6 cm dubine.....	52
Slika 44: Sadržaj vode na 12 cm dubine.....	52
Slika 45: Sadržaj vode na 18 cm dubine.....	53
Slika 46: Sadržaj vode na 24 cm dubine.....	54
Slika 47: Klizna ploha i faktor sigurnosti u pokusu sa mjerama sanacije bez vode.....	55
Slika 48: Kritična klizna ploha i razina podzemne vode za umanjeni model sa mjerama sanacije .....	55
Slika 49: Pozicije senzora u oba pokusa.....	56
Slika 50: Usporedba sadržaja vode na 6 cm dubine u oba pokusa .....	57
Slika 51: Usporedba sadržaja vode na 12 cm dubine u oba pokusa .....	58
Slika 52: Usporedba sadržaja vode na 18 cm dubine u oba pokusa .....	59
Slika 53: Usporedba sadržaja vode na 24 cm dubine u oba pokusa .....	60

## 1. UVOD

Zadatak ovog diplomskog rada je utvrditi kako mjere sanacije utječu na stabilnost klizišta provedbom laboratorijskih ispitivanja umanjenog fizičkog modela klizišta. Jedan od glavnih uzroka pojave nestabilnosti u kosinama je porast razine podzemne vode. Podzemna voda narušava stabilnost unutar kosine, s porastom razine podzemne vode dolazi do saturacije ugrađenog materijala, i smanjenja čvrstoće, čime se smanjuje i faktor sigurnosti kosine se smanjuje, kosina postaje nestabilna i javlja se slom. Iz tog razloga glavni zadatak mjera sanacije na kosini bi trebao biti usmjeren na pokušaj smanjivanja razine podzemne vode u odnosu na iste uvjete nesanimiranog fizičkog modela izloženog uvjetima simulirane kiše. Model na kojem su provedene mjere sanacije bi trebao moći primiti istu ili veću količinu kiše a da pri tome ne dođe do pojave nestabilnosti u odnosu na model na kojem nisu provedene mjere sanacije. Dakle, u ovom radu će se usporedbom saniranog i nesanimiranog modela nastojati utvrditi kako mjere sanacije utječu na stabilnost i faktore sigurnosti same kosine.

U radu će se opisati sva mjerna oprema koja se koristila u ispitivanju, način ugradnje modela, način provedbe mjera sanacije na modelu, uređaji za mjerenje vlažnosti i pornih tlakova u tlu te stol za ispitivanje umanjenih fizičkih modela u statičkim uvjetima opterećenja.

Problem stabilnosti u kosinama usko je povezan s nastankom klizišta, iz tog razloga će se u radu navesti neke osnove koje je potrebno znati o klizištima, klasifikaciju klizišta, osnovne elemente i dimenzije klizišta. Također kako bi se bolje razumjela tematiku dotaknuti će se nekih prethodno provedenih istraživanja vezanih za stabilnost umanjenih modela klizišta simuliranih kišom te primjenom određenih metoda sanacije na tim modelima.

Nakon provedbe laboratorijskih ispitivanja te očitavanjem i analizom podataka s mjernih instrumenata te zapažanjem tokom samog pokusa možemo doći do određenih spoznaja o pojavama nestabilnosti u stvarnosti te kako mjere sanacije utječu na te pojave. Ta saznanja nam mogu biti vrlo važna jer nam mogu pomoću u prevenciji nastanka nekih novih klizišta koja mogu imati katastrofalne posljedice.

## 2. KLIZIŠTA

Prema Crudenu klizište se definira kao pomicanje mase stijena, krhotina ili zemlje niz padinu. Do klizanja tla dolazi kada se poremeti njegova stabilnosti, a mogu je prouzročiti prirodne pojave ili čovjek svojim djelovanjem. Stabilnost tla ovisi o strmini i obliku padine, geomehaničkim svojstvima tla, rasporedu slojeva tla i drugim čimbenicima. Najčešće pojave koje dovode do klizanja tla su promjena razine podzemne vode ili promjena tokova površinskih voda, sezonske promjene vlažnosti i temperature zraka, tektonski poremećaji i potresi. Čovjek može pokrenuti klizišta neprikladnim zahvatima na tlu kao što je krčenje vegetacije, promjena režima podzemnih voda, opterećenje tla. Kao što može nastati na prirodnom terenu, klizište može nastati i na izgrađenim nasipima[1]. Obzirom da se klizišta događaju na padinama, a one su najčešći morfološki oblici na zemlji, vrlo su značajna pojava za međunarodnu zajednicu. Aktiviranje klizišta uzrokuje velike materijalne štete, ugrožava velik broj ljudi, izravno ili neizravno ugrožava i lokalnu zajednicu. [2]

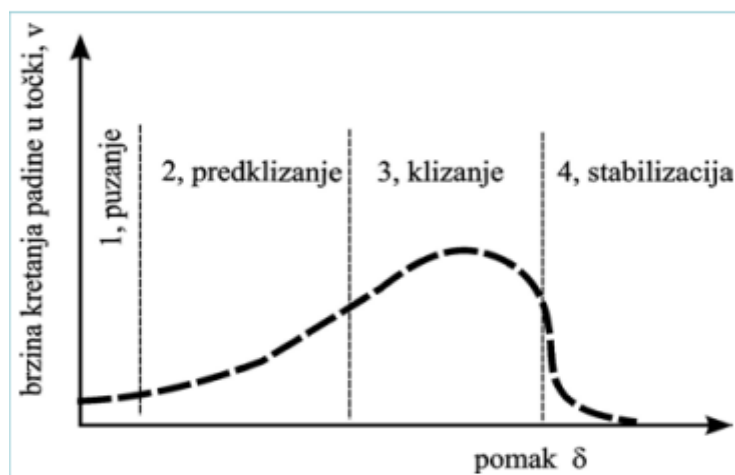
Zbog vrlo velikog značenja klizišta na međunarodnu zajednicu, 2002. godine je u Kyoto-u u Japanu osnovan Međunarodni konzorcij za klizišta kao međunarodna nevladina i neprofitna znanstvena organizacija. I Republika Hrvatska je članica te organizacije. Koliko su klizišta katastrofalna pokazuju podatci iz Japana . U razdoblju od 1967. – 2002. u Japanu je, usred katastrofalnih klizanja, stradalo 3285 ljudi. U radu iz 2009. godine Sassa navodi da su katastrofalna klizanja posljedica složenih uvjeta i da se s njima treba baviti multidisciplinarno jer utječu na sve vidove života jedne zajednice, kao što su ekonomija, spomeničko nasljeđe, poljoprivreda, šumarstvo i zaštita okoliša, graditeljstvo i promet i konačno obrazovanje, tehnologa i znanost. [3]

Prema Crudenu „Klizanje je gibanje mase stijena, mješavine nevezanog ili vezanog tla niz kosinu, što podrazumijeva sve tipove gravitacijskih gibanja masa tla i masa stijena, od odronjavanja i prevrtanja stijena, rotacijskih i translacijskih klizanja te tečenja različitih materijala“ [2].

Za klizanje se može reći da obuhvaća više procesa, a to su proces otkidanja pa zatim translacijskog ili rotacijskog pomicanja mase preko stabilne podloge. Pokretanje masa se ponekad događa po jasno, a ponekad po nejasno izraženoj kliznoj plohi. Kretanje mase, odnosno

klizanje, na padini ili uz padinu može biti polagano i jedva zamjetno u vremenu, ali može biti i vrlo brzo i razarajuće [2].

Klizanje se javlja na padini ili kosini, a padine tvore najveći dio Zemljine kore na površini i ispod mora, pa je za očekivati da se na mnogim područjima javljaju klizanja tla u najrazličitijim oblicima. Padine su trajno pod utjecajem gravitacije, a u stabilnoj ravnoteži drži ih otpor tla klizanju (trenje, posmična čvrstoća tla). Klizanja nastaju kada se pod utjecajem neke od prirodnih sila, pokrenu padine na rubu stabilnosti. Javlja se tijekom cijele geološke prošlosti pod djelovanjem gravitacije i egzogenih sila, u procesu oblikovanja Zemljine površine. [3] Osim pod utjecajem prirodnih sila klizanja tla se javljaju i pod utjecajem zahvata koja na površini terena izvodi čovjek. Ona klizanja koja se javljaju pod utjecajem prirodnih sila, su u početku spora i gotovo neprimjetna. Ta se klizanja vrlo veliki vremenski period pomiču polako, sve dok nešto ne izazove poremećaj u ravnoteži određenog površinskog dijela tla koje je na rubu stabilnosti. Tada se javlja nagli pokret masa i nastaje klizište. Većina poznatih aktivnih klizišta nastala na mjestima gdje su ona postojala i u geološkoj prošlosti, naročito u holocenu, veliki broj tih starih klizišta miruje, pokriveno vegetacijom, što otežava njihovo uočavanje i prepoznavanje. Terzaghi je još 1950. godine dijagramom sa slike 1. prikazao pokrete na klizištu [3].



Slika 1. Faze pomicanja tla na kosini [3]

On je to prikazao kao gibanje ukupne klizne mase. Međutim, gibanje klizne mase je znatno složenije. Ovaj dijagram vrijedi za pojedine točke na površini klizne mase, ali se proces u svim točkama klizne plohe, ne odvija istovremeno. Terzaghijev prikaz zajedno s Nonveillerovom teorijom o progresivnom slomu, daje potpuniju sliku procesa nastanka klizišta. Ovi se opisi odnose na klizanja u homogenim, glinovitim tlima. Ovakva su klizišta razmatrana u počecima znanstveno-tehničkog bavljenja ovom pojavom, u prvoj polovici 20. stoljeća [3].

Intenzivnije proučavanje klizišta, koja su u stvari geotehnička pojava, počela su početkom 20. stoljeća. Ta proučavanja potaknuta su pojavom klizišta pri izgradnji luka za velike teretne brodove u Švedskoj, Göteborg. [3] Proučavanjem klizišta došlo se do zaključka da su ona vrlo različita po obliku, načinu postanka, vrsti tla u kojem se pojavljuju i neposrednim uzrocima koji ih izazovu. Klizišta mogu biti uzrok daljnjih elementarnih nepogoda, a mogu biti i njihova posljedica. Nastaju na kopnu i pod morem [3].

Klizište koje nastane u naseljenom ili urbaniziranom području izazove ogromne štete, a često i velik broj ljudskih žrtava. Da bi se ono umirilo mora se izvesti vrlo velike i skupe radove na sanaciji klizišta, mada nema potpune sigurnosti u konačni uspjeh sanacije. Troškovi sanacije klizišta su često daleko veći od vrijednosti građevina koje klizište ugrožava ili je u trenutku pokretanja oštetilo. Klizišta sama za sebe čine štetu, ali mogu nastati kao posljedica neke druge prirodne katastrofe, a i sama mogu izazvati katastrofalne posljedice u obliku drugih elementarnih nepogoda [3].

Jedan od čestih pojmova s kojim se susrećemo pri proučavanju klizišta je erozija. Erozija je prirodni proces pomicanja krutih tvari (zemlje, blata, kamena, itd.) pod utjecajem vjetra i vode, ili pomicanja koja su uvjetovana silom gravitacije. Proces oblikovanja reljefa pod utjecajem erozije, odnosno razaranjem i odnošenjem Zemljine kore, u geologiji i geografiji razlikuje se više pojmova [3]:

- riječna ili fluvijalna erozija – nastaje mehaničkim i kemijskim djelovanjem tekućica,
- abrazija – nastaje djelovanjem mora i jezera,
- ledenjačka ili glacijalna erozija – nastaje djelovanjem leda,
- eolska erozija – nastaje djelovanjem vjetra,
- druge egzogene sile.

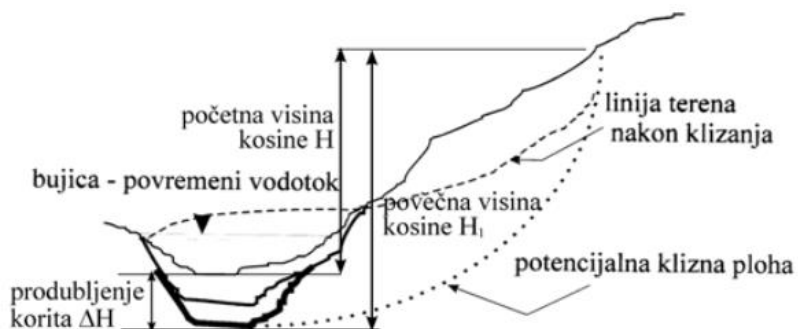


Pod erozijom u užem smislu razumijeva se:

- dubinska erozija - riječna ili fluvijalna erozija, koja u vertikalnom smjeru erodira dno
- bočna erozija – koja u horizontalnom smjeru erodira strane riječnoga korita.

U naseljenim područjima pod utjecajem čovjeka, intenziviranjem poljoprivredne proizvodnje, sječom šuma i drugim oblicima čovjekove aktivnosti dolazi do sve veće erozije, čije se štetne posljedice očituju u uništavanju obradivoga tla, razaranju naselja i putova. U SAD-u je erozijom zahvaćeno oko pola milijarde ha zemljišta. Da bi se smanjile štetne posljedice erozije, izvode se melioracijski radovi na regulaciji rijeka, potoka, bujica i drugo [4].

Pod pojmom erozije mogu se razmatrati dvije pojave. Jedna je podlokavanje obala bujica, potoka, rijeka ili mora. Ovo podlokavanje, naročito kod bujica, povećava ukupnu visinu padine ( $H$  na slici 2), koja u određenom trenutku dosegne takvu veličinu da padina postaje nestabilna.



Slika 2. Povećanje razine vode uslijed erozije vodotoka [3]

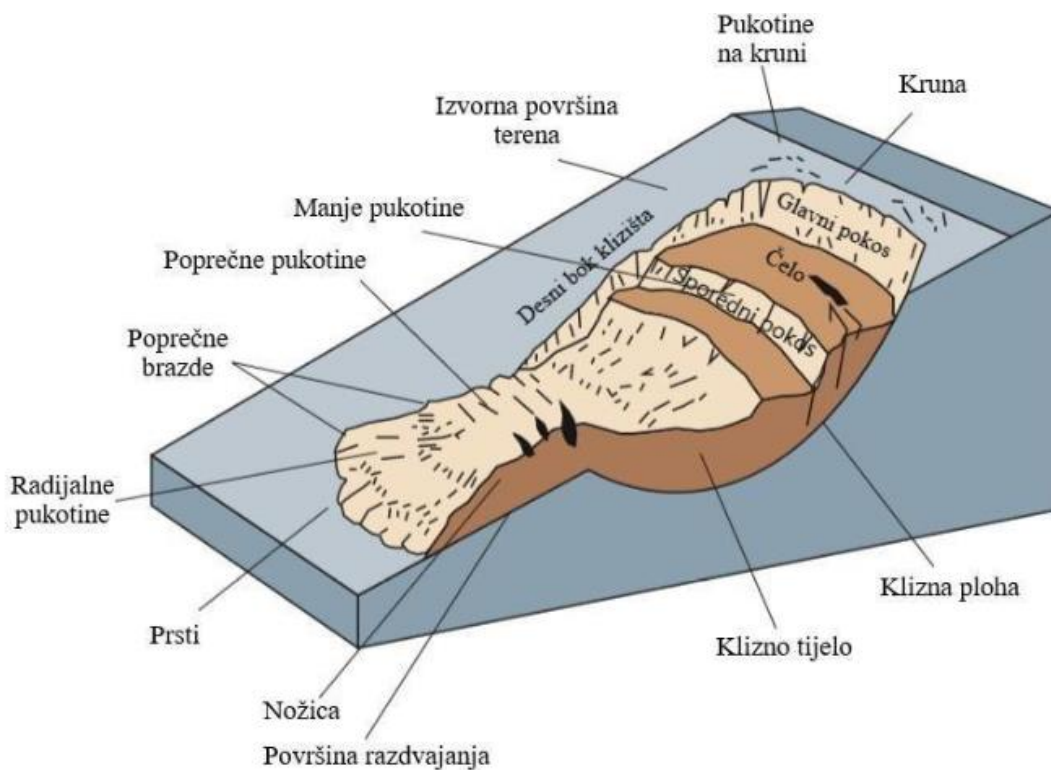
Za razliku od prethodnog kod erozije uz morsku obalu visina klifa se uglavnom ne mijenja, ali se povećava nagib kosine zbog odnošenja tla u nožici. Iz ovoga se može zaključiti da je posljedica utjecaja erozije različita od posljedica utjecaja erozije na druge vodene površine. Drugi oblik je čista površinska erozija koja potiče odnošenje površine tla i progresivno utječe na oblikovanje odrona i klizišta. Postoje fizikalni čimbenici, prirodni razlozi i ljudski učinci koji potaknu klizanje. Prirodni razlozi mogu se podijeliti na geološke i morfološke. U nastavku (tablica 1) daje se njihova podjela [3].

Tablica 1: uzroci pojave klizišta Highland i Bobrowsky (2008.)[3]

Fizički razlozi – „okidači“	Prirodni razlozi		Ljudski učinci
	geološki	morfološki	
intenzivne oborine	meka tla, nekonsolidirani morski sedimenti i sl.	tektonska i vulkanska uzdizanja	iskopi na kosini i nožici
naglo topljenje snijega	osjetljiva tla		nasipanje nestabilnog tla
dugotrajne intenzivne oboirne	rastrošena tla	provala otopljenog leda	opterećenje vrha kosine nasipom ili građevinom
naglo sniženje ili podizanje razine vode i valovi	tla s rezidualnim parametrima čvrstoće na smicanje	erozija nožice vodotoka	podizanje i spuštanje razine vode u jezeru
potres	tla s pukotinama i prslinama	erozija obale uslijed valovanja glacijalna erozija nožice	sječa šume s vađenjem panjeva
vulkanska erupcija	tla s nepovoljnom uslojenošću, uslojenost, škrljavost i sl.	erozija bočnih rubova	navodnjavanje i prskanje travnjaka
otapanje, odleđivanje	napovoljno usmjereni strukturni diskontinuiteti (bore, neusklađenosti, kontakti i t.d.)	podzemna erozija, (sufozija, otapanje)	rudarenje i odlaganje jalovine
zamrzavanje i otapanje	slojevi izrazito različite vodopropusnosti	opterećenje kosine na vrhu ili taloženje na kosini	umjetni potresi pri miniranju, zabijanju pilota i sl.
rastrošba kao posljedica skupljanja i bujanja	bitne razlike u krutosti (kruta i meka, vrlo plastična tla)	uklanjanje vegetacije (šumski požari, suša)	propuštanje vode iz raznih cjevovoda, vodovoda, kanalizacije i sl
poplave			promjena (planirana i neplanirana) toka rijeke ili obalnih struja raznim regulacionim građevinama

## 2.1 Elementi klizišta

Kod rotacijskih klizišta, koja su u Hrvatskoj najčešća, može se razlikovati sljedeće elemente klizišta: kruna, vlačne pukotine, nožica, bokovi, klizna ploha, koluvij (pokrenuti materijal) [2]. Na slici 3 prikazani su elementi klizišta.



Slika 3. Elementi klizišta [7]

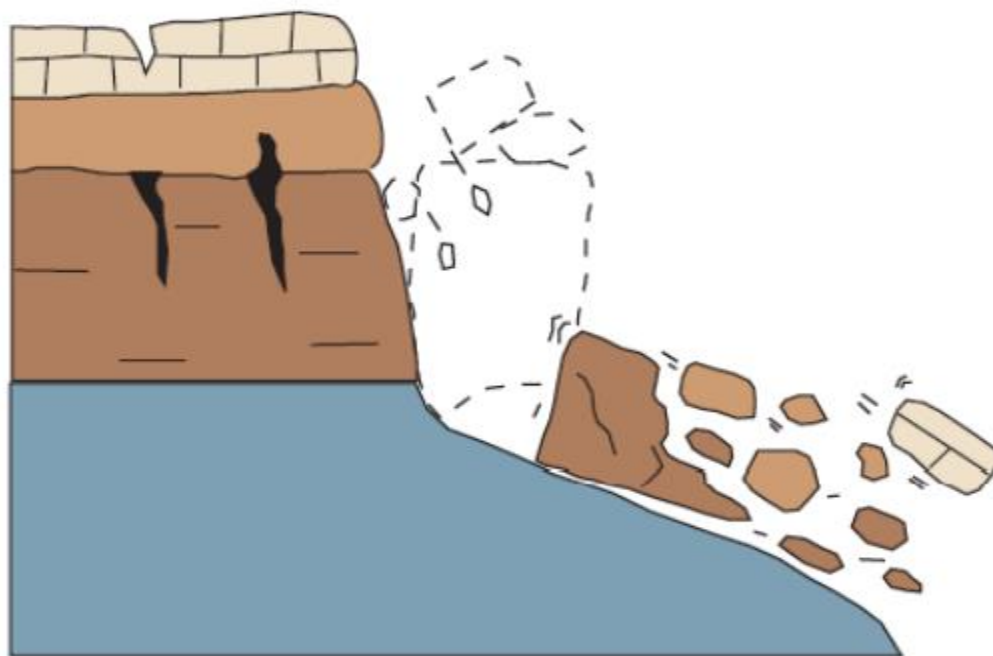
## 2.2 Tipovi klizišta

Klizišta su vrlo raznovrsna po obliku i veličini pokrenute mase, po načinu i brzini gibanja i po drugim značajkama. Prema geološkoj građi u kojoj se javljaju, možemo razlikovati nestabilnosti u tlu i u stijenskoj masi. Nestabilnosti u tlu su: puzanje, klizanje, tečenje materijala niz kosine, slom kroz kvazihomogenu stijensku masu, slom po diskontinuitetima i klinasti slom, složeni slom. U stijeni se razlikuju sljedeći mehanizmi sloma stijenskih kosina: blokovsko klizanje i slom prevrtanjem, lomljenje i izbacivanje sloja, odroni [2].

Klizište je jedinstvena pojava obzirom na aktivnost, brzinu i način kretanja, veličinu te oblik. Najčešće se koristi klasifikacija prema Varnesu (1978), a prema njoj razlikujemo sljedeće tipove nestabilnosti [8]:

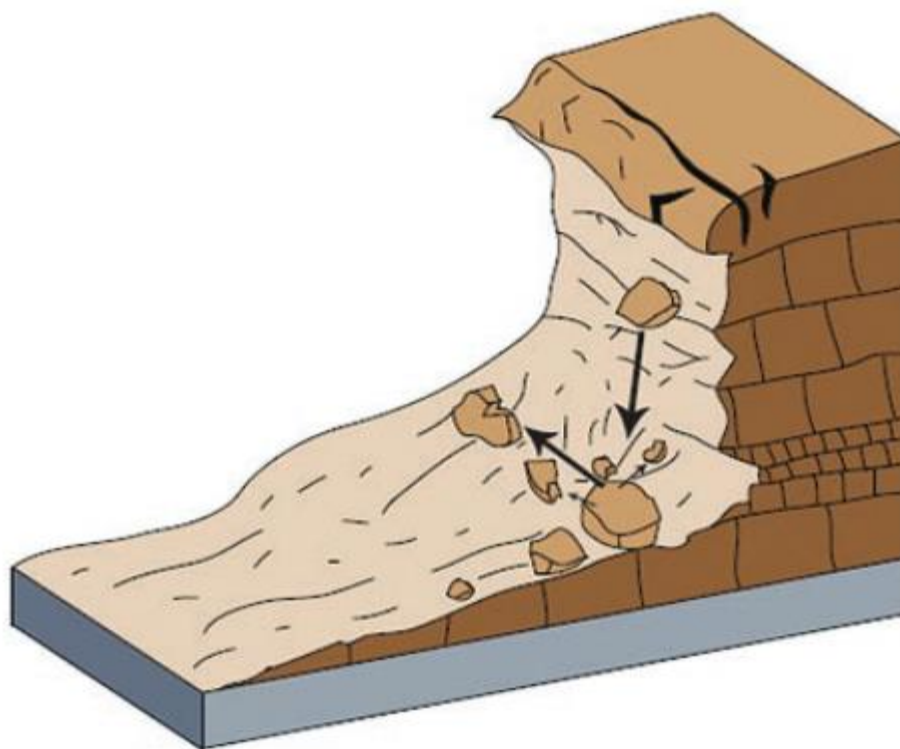
- Prevrtnje
- Odron
- Klizanje
- Širenje tla
- Tok

Prevrtnje (slika 4) je rotacija mase tla ili stijene prema naprijed oko točke ili osi ispod težišta pomaknute mase. Prevrtnje je ponekad potaknuto gravitacijom a ponekad je do prevrtanja došlo zbog vode ili leda u pukotinama u masi. Prevrtnja se mogu sastojati od stijena, krhotina (grubi materijali) ili zemljanih materijala (sitno- zrnatih materijala) [7].



Slika 4. Shema prevrtanja [7]

Odron (slika 5) počinje odvajanjem tla ili stijene, sa strme padine duž površine na kojoj je došlo do malog ili nikakvog posmičnog pomaka. Materijal se spušta uglavnom padajući, odbijajući se ili kotrljajući se. Padovi su nagli pokreti stijene ili zemlje prema dolje, koji se odvajaju sa strmih padina ili litica. Materijal koji pada obično udara u donju kosinu koja je pod kutom manji od kuta pada, uzrokujući poskakivanje. Masa koja pada može se slomiti pri udaru, može se početi kotrljati na strmijim padinama i može se nastaviti kretati sve dok se teren ne izravna. [7]

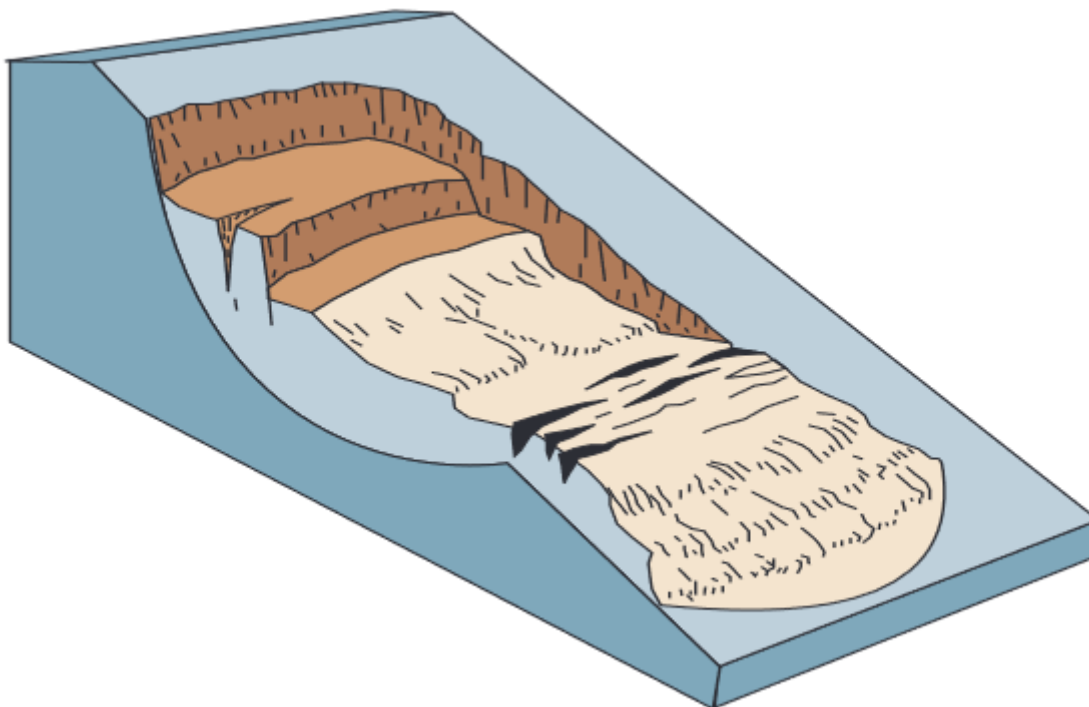


Slika 5. Shema odrona [7]

Klizanje je kretanje tla ili stijenske mase po kosini koje se javlja na plohi sloma ili u tankim zonama intenzivnih posmičnih naprežanja. U početku kretanje klizne mase nije istovremeno na cijeloj površini plohe sloma. Prvi znakovi kretanja tla su pukotine na površini tla, duž kojih kasnije nastaje vlačna pukotina ili škarpa. Obzirom na geometriju klizne plohe razlikujemo rotacijsko i translacijsko klizište [7].

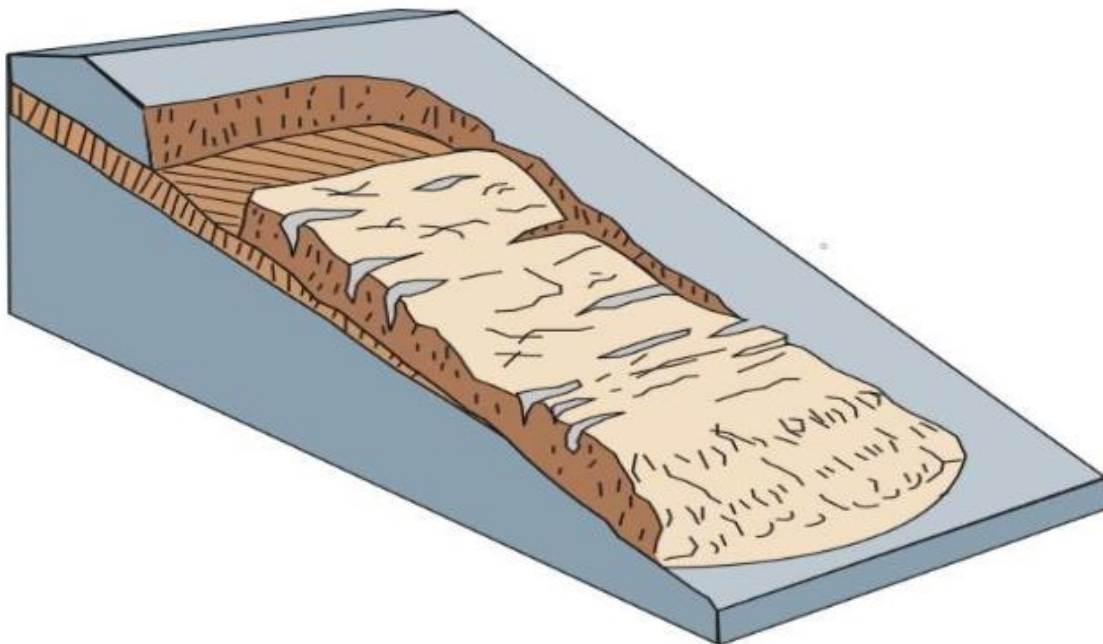
Klizište na kojem je ploha sloma zakrivljena prema gore a kretanje klizne mase je rotacijsko oko osi koja je paralelna s konturom padine naziva se rotacijsko klizanje (slika 6). Pomaknuta masa tla može se, u određenim uvjetima, kretati kao relativno koherentna masa duž

plohe slom s malom unutarnjom deformacijom. Gornja površina pomaknutog materijala može se nagnjati unatrag prema škarpi dok se glava materijala može kretati skoro potpuno okomito prema dolje. [7]



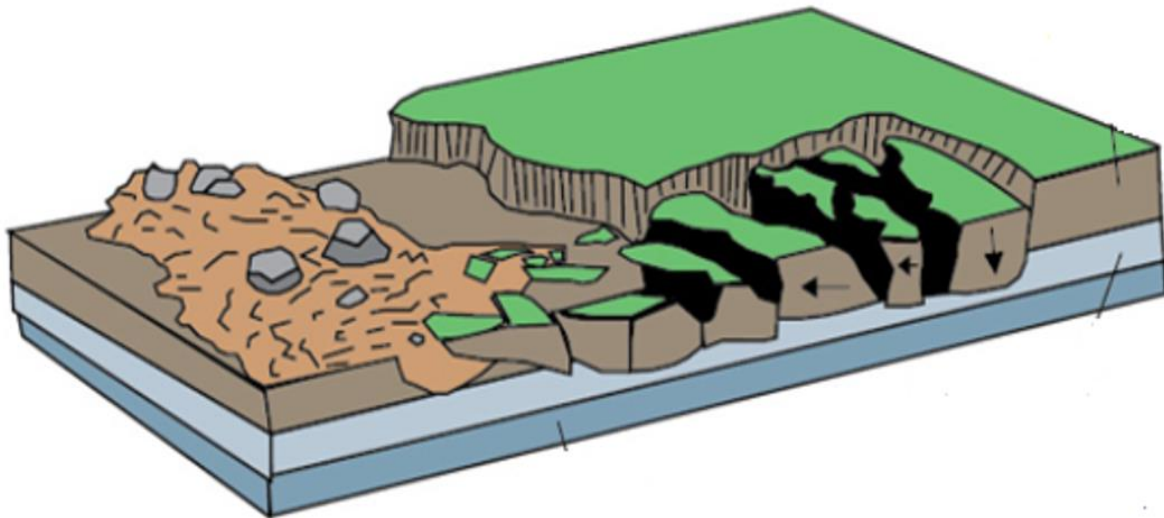
Slika 6. Shema rotacijskog klizišta [7]

Masa tla u translacijskom klizištu (slika 7) kreće se prema van, ili prema dolje i prema van po relativno ravnoj površini s malim rotacijskim kretanjem ili nagnjanjem unatrag. Ova vrsta klizanja može prijeći značajne udaljenosti ako je ploha sloma dovoljno nagnut, za razliku od rotacijskog klizišta, koji imaju tendenciju uspostaviti ravnoteže klizanja. Materijal u klizištu može varirati od rastresitog do nekonsolidiranog tla do velikih blokova stijena ili oboje. Slom kod translacijskog klizišta obično se događa uzduž geoloških diskontinuiteta kao što su rasjedi, slojevi ili na kontaktu stijene i tla. U sjevernim krajevima klizište se može kretati duž permafrosta-trajno smrznute podloge[7].



Slika 7. Shema translacijskog klizišta [7]

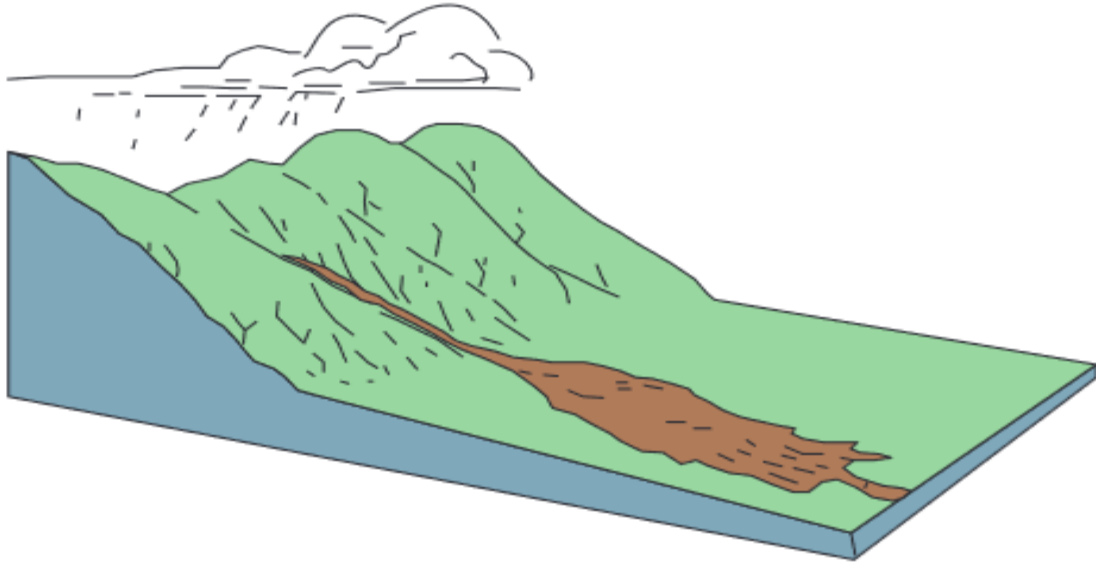
Bočno širenje tla (slika 8) obično se događa na vrlo blagim padinama ili uglavnom ravnom terenu, posebno tamo gdje je snažniji gornji sloj stijene ili tla izložen istežanju i pomiče se iznad donjeg mekšeg, slabijeg sloja. Takvi slomovi tla obično su popraćeni slijeganjem u donjem mekšem sloju tla. Kod širenja stijene, čvrsto tlo se širi i lomi, povlačeći se od stabilnog tla i krećući se preko slabijeg sloja bez da se formira prepoznatljiva ploha sloma. Mekše, slabije tlo može se, pod određenim uvjetima, ugurati prema gore u pukotine koje dijele slojeve u blokove. Kod bočnog širenja u zemlji, gornji stabilni sloj se širi duž slabijeg donjeg sloja koji je potekao usljed likvefakcije ili plastičnih deformacija. Ako je slabiji sloj relativno debeo, gornji blokovi se mogu slegnuti u njega, premjestiti se po njemu, rotirati, raspasti se ili čak teći [7].



Slika 8. Shema bočnog širenja tla [7]

Tok (slika 9) je oblik brzog kretanja mase u kojem se rastresito tlo, stijena ponekad i organske tvari miješaju s vodom, tvoreći heterogenu mješavinu koja se ponaša poput viskozne tekućine i teče nizbrdo. Ovakve pojave su bile neslužbeno i neprikladno nazvane "klizišta" zbog velike količine sitnih čestica materijala koji može biti prisutan u toku. Suhi tokovi se ponekad mogu pojaviti u pijesku bez kohezije (tokovi pijeska). Tokovi krupnozrnastog materijala mogu biti smrtonosni jer mogu biti iznimno brzi i mogu se pojaviti bez ikakvog upozorenja [7].





Slika 9. Shema toka [7]

U Hrvatskoj su najčešća rotacijska i translacijska klizišta dok je tok materijala niz padinu rjeđa pojava. Kod stijenskih kosina i padina susreću se sve vrste nestabilnosti u stijeni. Prema aktivnosti klizište može biti: aktivno, trenutačno neaktivno, reaktivirano, neaktivno, privremeno umireno, trajno umireno, stabilizirano, reliktno[2] .

Sporo površinsko pomicanje tla je jedan oblik klizanja, a ovakvih pojava ima posvuda. O njima se malo zna iako mogu prethoditi većim pokretima tla. Lako se prepoznaju po nepravilnim naborima na površini tla. Rotacijsko klizanje se javlja u koherentnim, homogenim tlima u kojima nastaje progresivan slom. Kod ovakvih klizanja klizna ploha može biti veoma duboko. [3]

## 2.3 Uzroci klizišta

Dvije su osnovne kategorije uzroka: prirodni i ljudski. Ponekad se pojavljuju kombinacijom i jednog i drugog.

Kada govorimo o prirodnim uzrocima klizanja razlikujemo tri osnovna uzroka: voda, seizmička aktivnost, vulkanska aktivnost. Zasićenje tla vodom je osnovni uzrok aktivacije klizišta, a može se formirati tijekom intenzivnih oborina, otapanja snijega, promjenama u režimu podzemnih voda uz obalu (mora, jezera i rijeka). Klizišta i poplave su stoga usko povezani [2].

Povećanjem stanovništva, urbanizacijom i širenjem gradova na neizgrađena područja uzrokuje pojavu novih klizišta, jer se mijenja postojeći režim podzemnih voda pa se destabiliziraju padine. Padine se destabiliziraju i potkopavanjem, neadekvatnom oborinskom odvodnjom, uklanjanjem postojeće vegetacije i drugim aktivnostima. Čest slučaj destabilizacije padina je i izvedba prestrmih zasjeka i nasipavanje postojećeg teren čime se opterećuje postojeća stabilna padina te se na taj način destabilizira [2].

Zaštitom kosina i sanacijama klizišta bavi se posebna grana geotehnike, inženjerska geologija i mehanika tla i stijena. Ova oba područja bave se kosinama ali na različite načine. Da bi se pristupilo rješavanju problema klizišta, potrebno je najprije sagledati mogući ili već postojeći događaj odrona i klizanja u stijenskim masama, kao i potencijalna ili aktivna klizišta. Nakon sagledavanja mogućih ili postojećih problema može se odrediti nekoliko pravaca rješavanja problema klizišta, a to su:

1. Zaštita usjeka i zasjeka – izrada projekta zaštite kosine s rješenjima koja mogu biti varijantna za različite situacije. Najekonomičnije je, ako se zaštita usjeka i zasjeka izvodi tijekom iskopa kada je jednostavno pristupiti mjestima na kojima je potrebno izvesti pojedini zahvat.
2. Zaštita na prirodnim pokosima i starim, nezaštićenim zasjecima, koji se uslijed utjecaja atmosferilija postepeno troše i prijete područjima ispod njih. Uz okršene vapnence tu spadaju i flišne padine, također jako podložne trošenju. U ovim vrstama mekih stijena česta su plitka, izdužena klizanja površinskog, rastrošenog pokrivača. Svaki od ovih slučajeva traži zaseban pristup pri zaštiti pokosa.

3. Zaštita i sanacija potencijalnih i aktivnih klizišta – najčešće su posljedica promjena u efektivnim naprezanjima uslijed različitih djelovanja podzemne vode. Stoga je prilikom projektiranja zaštite, podzemna voda ona, na koju treba obratiti najveću pažnju.
4. Kada nije moguće izbjeći utjecaje klizanja i odrona, treba pribjeći ili njihovom izbjegavanju ili izradi građevine koje infrastrukturu štite od nepoželjnih, štetnih i često vrlo opasnih utjecaja odrona i klizanja [5].

## **2.4 Podaci potrebni za projektiranje zaštite i sanacije**

Da bi se mogla izvesti zaštita kosine ili sanacija klizišta potrebno je izraditi projekt sanacije. Za projekt sanacije potrebno je prikupiti određene podatke za oblikovanje proračunskog modela. Proračunski model se sastoji od: geometrije, geološkog-geotehničkog sastava tla, fizičko-mehaničkih parametara tla i hidrogeoloških podataka o razini podzemne vode. Prvi korak projektiranja je analiza stabilnosti trenutnog stanja za aktivna klizišta koja nisu još doživjela konačni slom, a drugi korak je analiza stabilnosti saniranog stanja kojim se mora provjeriti učinak mjera sanacije [5].

Klizne plohe u homogenim koherentnim tlima mogu biti duboke i kružnog oblika. U nekoherentnim tlima klizne plohe su pliće i izdužene. Kada imamo istorodno tlo s izraženim rastrošenim pokrivačem oslabljenih parametara čvrstoće na smicanje klizna ploha je ravna i izdužena. Klizne plohe u stijenskoj masi geometrijski se modeliraju:

- kao klizni klinovi po međuslojnim pukotinama ili po familijama sekundarnih pukotina, kada je struktura ovih pukotina jasno izražena i moguće ju je relativno precizno odrediti,

- kao kružne klizne plohe u kvazihomogenim stijenskim masama (na primjer u rasjednim zonama).

- u mekim stijenama, laporima i flišnim formacijama, javljaju se klizne plohe po međuslojnim pukotinama, izdužene klizne plohe uslijed rastrošnosti površinskog sloja i kružne klizne plohe uslijed loma kroz niz sekundarnih pukotina kada se tlo tretira kao kvazihomogena masa [5] .

Podaci o podzemnoj vodi mogu se dobiti jedino praćenjem razine ili tlakova u pijezometrima. Idealno je imati na raspolaganju podatke jedne hidrološke godine. Često su vrlo korisni višestruki (barem dvostruki) zatvoreni sustavi mjerenja koji mogu pokazati arteške i subarteške pritiske u području ispod klizne plohe. Ovo je ponekad ključni podatak o postojanju uzgona na kliznu plohu. Za inženjersko-geološke podatke potrebno je izraditi odgovarajuće istražne radove: terenska i laboratorijska ispitivanja, izračun svojstvenih i izvedenih vrijednosti i njihovo vrednovanje od strane iskusnih geotehničara. Pomoću prikupljenih podataka oblikuje se proračunski model. S odabranim vrijednostima potrebno je pronaći kritičnu kliznu plohu. Pri projektima sanacije prvo se provodi analiza u nesaniranom stanju, a zatim se za iste klizne plohe i iste modele provjerava učinak mjera sanacije. Pri tom kritične klizne plohe u saniranom stanju nisu uvijek one iste koje su bile kritične u nesaniranom stanju [5].

### 3. UMANJENI MODELI KLIZIŠTA SIMULIRANIH KIŠOM

Značajan broj istraživanja proveden je na malim plitkim klizištima u laboratorijskim uvjetima. Pokusi koje je proveo Sassa (1984) sa likvefakcijskim klizištima pokazuju da se brzi prirast pornog tlaka uslijed lokaliziranog slijeganja javlja neposredno prije pokretanja klizišta. [9]

Okura i suradnici (2002) provode laboratorijska ispitivanja sa žlijebom i primjećuju da kosina koja se urušava prolazi kroz tri faze: volumetrijsko zbijanje sa smicanjem, porast pornog tlaka u saturiranoj zoni i brzo smicanje oko klizne plohe [9].

Nizom ispitivanja plitkih klizišta izazvanih vodom u malo žlijebu Wang i Sassa (2003) pokazuju da dimenzije zrna i količina sitnih čestica imaju značajan utjecaj na mobilnost plitkih klizišta izazvanih vodom. Korištenjem eksperimenta koji se temelji na žlijebu Olivares i Damiano (2007.) uočavaju da su glavni razlozi tečenja klizišta maksimalni porni tlak i velike posmične deformacije zabilježene na podlozi žlijeba [9].

Unatoč tome što je provedena značajna količina istraživanja kako bi se razumjela aktivacija klizišta, pomicanje i taloženje materijala nakon klizanja, znanje o pojavi i napretku plitkih klizišta i njihovom utjecaju na ispuštanje sedimenta je ograničeno. Zbog toga su bila potrebna daljnja istraživanja kako bi se bolje razumio utjecaj plitkih klizišta izazvanih kišom na ispuštanje sedimenta iz kosina [9].

U svim pokusima, vodom izazvana pitka klizišta nastaju slomom u nožici na granici gdje se mijenja kosina dijelova žlijeba. Takvi slomovi nožice počinju nakon što fronta vlaženja dođe do baze žlijeba povećavajući stupanj zasićenosti tla. Kombinacija toka s gornje kosine žlijeba i infiltrirane oborine zasićuje tlo u nožici žlijeba i pokreće klizište. Lokalizirano slijeganje vidljivo je svim slučajevima neposredno prije sloma kosine. To lokalizirano slijeganje rezultat je zasićenja tla. Prostor djela pora koji je ispunjen zrakom u profilu tla se puni vodom tijekom infiltracije i ovaj proces čini tlo kompaktnijim uzrokujući slijeganje. Porni tlak brže raste u zasićenom području u usporedbi s nezasićenim. Taj porni tlak se povećava više od 2 puta tijekom sloma [9].

Plitka klizišta izazvana vodom ovise o mnogim čimbenicima kao što su: topografija terena, područje doprinosa na kosini, svojstvima tla, svojstvima padaline i drugima. Također iznimno važan parametar pri slomu kosine je debljina tla. Kako se povećava debljina profila,

povećava se i stabilizacijska sila stoga su potrebne veće destabilizacijske sile i čimbenici da pokrenu klizište [9].

Coulombov model sloma kosine nalaže da se slom mora dogoditi samo na dubini gdje je posmično naprezanje jednako Coulombovoj čvrstoći. Dubina škarpe pokrenutog klizišta opet ovisi o debljini tla. Pri manjim dubinama u tlu se pojavljuju manja geostatička naprezanja što smanjuje njegovu čvrstoću na smicanje. Plići profil je više sklon slomu u usporedbi s dubljim zbog smanjene stabilizacijske sile. Stoga, što je veća debljina profila tla, manja je dubina pokrenutog klizišta i obrnuto [9].

Statičku likvefakciju izuzetno je teško pokrenuti u modelima. Take i Beddoe (2014) pretpostavili su da geometrija padine često modelirana u ovim eksperimentalnim studijama možda ima ne namjernu posljedicu smanjivanja vjerojatnosti likvefakcije [10].

Ova pretpostavka se temelji na ideji da zrnata tla u bazi padine mogu biti osjetljivija na statičku likvefakciju nego isto to tlo u nagnutom dijelu padine. Tlo u bazi padine lakše zadovoljava kriterije koji dovode do likvefakcije. Zona tla s vrlo visokom razinom zasićenje zbog prisutnosti podzemne vode blizu površine podložna je smicanju uslijed malog lokaliziranog poremećaja što dovodi do stvaranja likvefakcije pijeska. Kada je baza izložena likvefakciji potporni učinak na ostatak kosine se značajno smanjuje [10].

Sporo infiltriranje vode u masu tla dovelo je do pokretanja raznih faza sloma kosine. Stvaranje ispupčenja ili tlačnih grebena, tečenje i površinska erozija u području nožice povezana je s razvojem vrlo visokih hidrauličkih gradijenata, koji ukazuje na prisutnost velikih sila tečenja na lokalnoj razini koji se javljaju na ovom području [11].

Modeliranje metodom konačnih elemenata predviđa vrlo visok hidraulički gradijenti, a ne smanjenje posmične čvrstoće koja je posljedica visokih porednih tlakova kao glavni mehanizam sloma. Visoki hidraulički gradijenti fizički se manifestiraju tlačnim grebenima, procjeđivanjem i površinskom erozijom. Modeliranje potvrđuje da odgovarajuće mjesto za postavljanje instrumenta za praćenje i senzora za bilježenje promjena hidrauličkih gradijenata je područje nožice [11].

Monitoring mjernom opremom i vizualno promatranje deformacija korisni su pokazatelji predstojećeg sloma, uz promjene u stupnju saturacije tla i porednom tlaku. Monitoring gornjeg dijela kosine nije toliko značajan kao onaj u nožici, jer su se deformacije pojavile tek nakon što

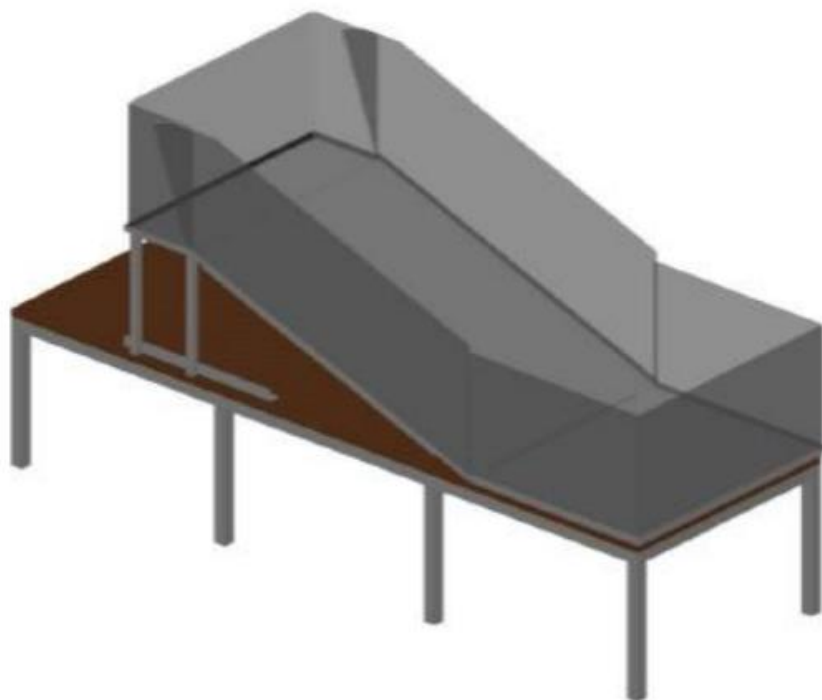
je slom započeo. Ipak preporučeno je i monitoring gornjeg dijela kosine zato što su se promjene dogodile prije glavnog sloma, najkatastrofalnije faze u evoluciji klizišta [11].

Nekoliko važnih parametara utječe na dubinu infiltracije i erozije padine. Kut nagiba padine jedan je od tih faktora, naime povećanjem kuta nagiba povećava se dubina površinske erozije zbog bržeg površinskog otjecanja. Sila teža učinkovitije potiče vertikalnu infiltraciju na blažim padinama bez površinskog pokrova. Drugi važan faktor je sila sabijanja. S povećanjem gustoće tla površinska erozija, propusnost i infiltracija se smanjuju. Intenzitet padalina i trajanje kiše su također važni čimbenici koji utječu na stabilnost padine [12].

Gustoća tla igra važnu ulogu u pokretanju klizišta. Kada na kosini imamo tlo veće gustoće oborina većeg intenziteta uz prethodnu vlažnost tla, neće pokrenuti slom kosine. Kada na kosini imamo tlo manje gustoće oborina znatno manjeg intenziteta pokreće slom kosine. Porni tlak naglo se povećava, a ta pojava povezana je s debljinom i brzinom klizne mase. Porni tlak veći je u nožici u odnosu na gornji dio kosine i porni tlak se također povećava s porastom dubine tla. U slučaju povećane prethodne vlažnosti materijala, brzo dolazi do stvaranja otjecanja koje erodira nožicu i stvara erozijske jarke. U slučaju prethodne vlažnosti porni tlak i sadržaj vlage brzo rastu. Sustav ranog upozoravanja moguće je uspostaviti postavljanjem senzora vlage na malim dubinama od nožice do sredine kosine [13].

#### 4. PLATFORMA ZA ISPITIVANJE KLIZIŠTA PRI STATIČKOM OPTEREĆENJU

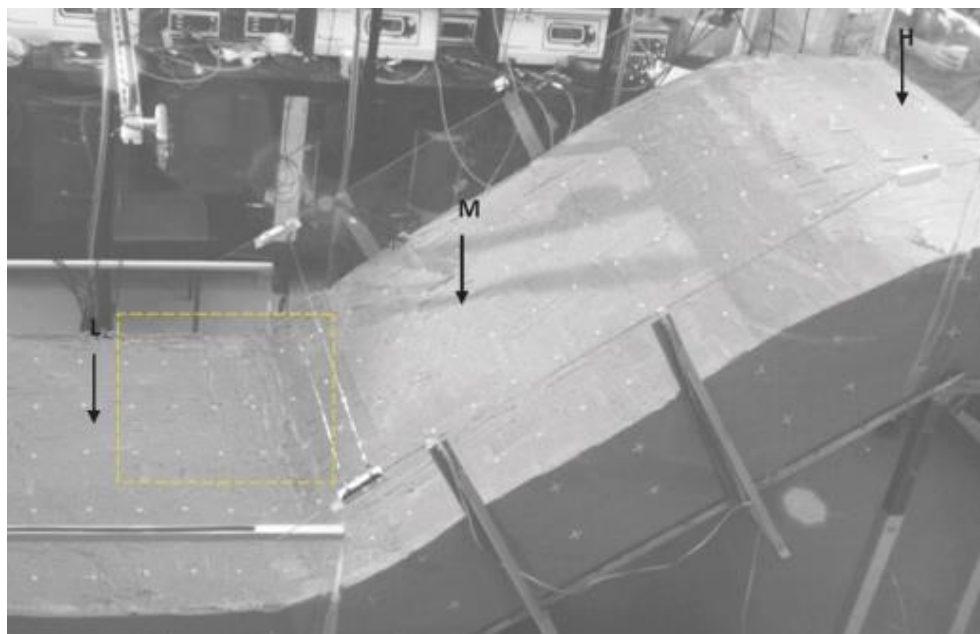
Model platforme za ispitivanje u statičkim uvjetima (slika 10) sastoji se od čelične konstrukcije i pleksiglas stjenki. Stol na kojem je platforma postavljena je načinjen od čeličnih profila i vodootporne blažujke te omogućava postavljanje platforme pri različitim uvjetima geometrije te omogućava lako sastavljanje i rastavljanje modela. Dimenzija gornje plohe stola je 1,5m x 3 m. [13].



Slika 10. Shema modela platforme za ispitivanje klizišta u statičkim uvjetima [13]

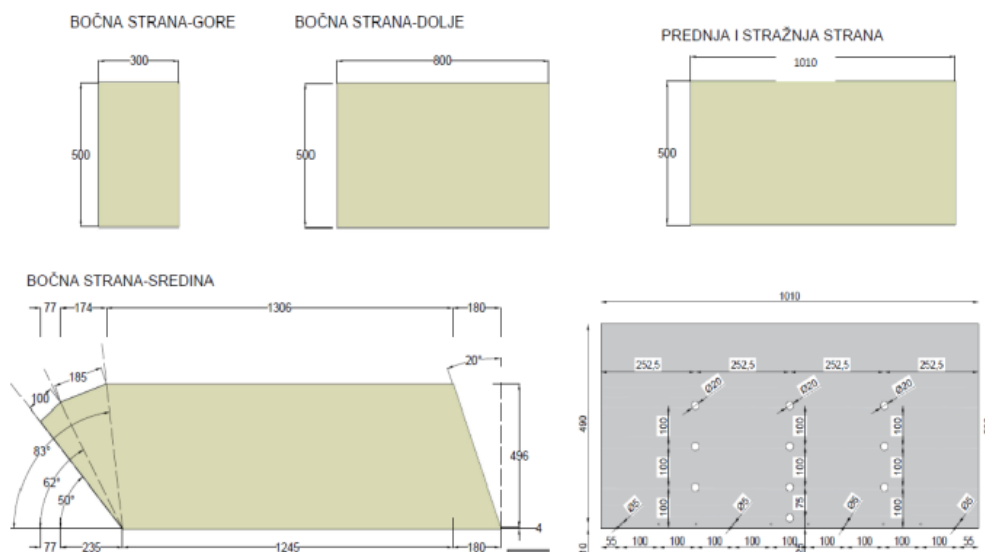
Model klizišta podijeljen je na tri segmenta (slika 11), a to su gornji dio (H), središnji dio (M) te donji dio (L) [14].





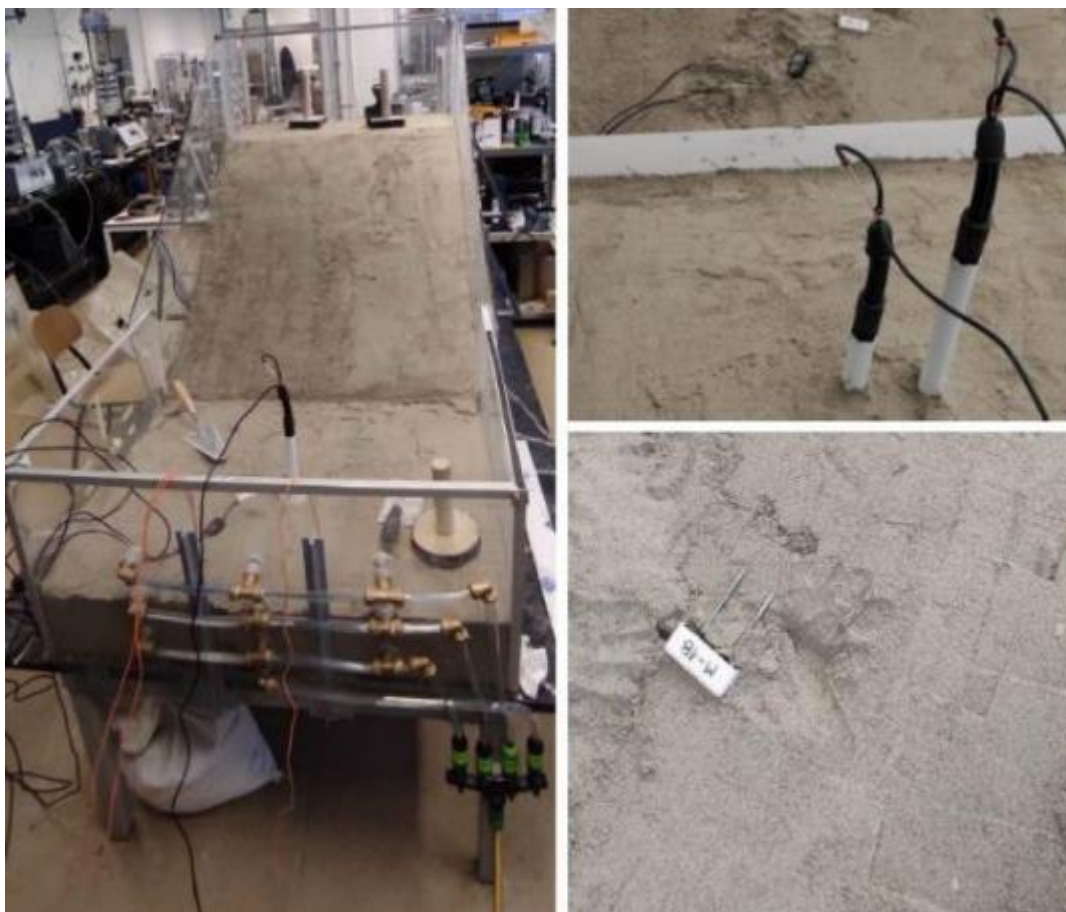
Slika 11. Oznake segmenata na umanjenom modelu klizišta [14]

Kada se platforma postavi pod nagib na kojem će se provoditi pokus slijedi postavljanje stjenki od pleksiglasa. Potrebno je postaviti ukupno 8 stjenki (slika 12), od čega je 1 stražnja, 1 prednja i 6 bočnih stranica. Na prednjoj stranici se nalaze otvori za drenažu koji omogućuju regulaciju razine vode u modelu i pražnjenje vode iz modela nakon pokusa.



Slika 12. Dimenzije pleksiglas stjenki modela i drenažnih otvora [13]

Nakon što se platforma za ispitivanje modela u potpunosti pripremi kreće ugradnja prethodno pripremljenog materijala s određenim postotkom vlažnosti. Materijal u model ugrađujemo u slojevima te nabijamo raznim ručnim nabijačima kako bi smo postigli željeni stupanj zbijenosti. Mjerne uređaje u model ugrađujemo paralelno s ugradnjom materijala na prethodno određene pozicije u modelu. Ugrađena mjerna oprema ne utječe na pojavu nestabilnosti i razvoj klizne plohe. (slika 13) [13]

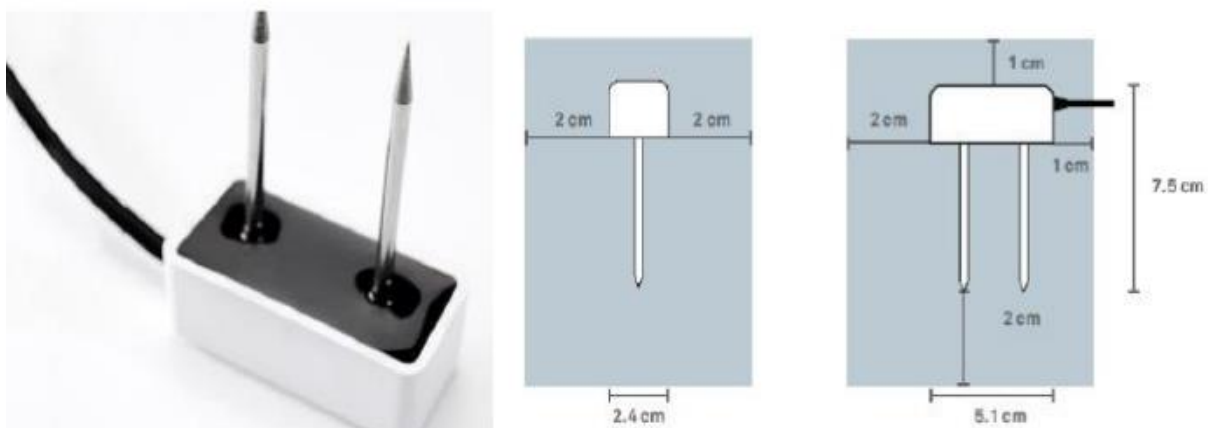


Slika 13. Ugradnja mjerne opreme i materijala [13]

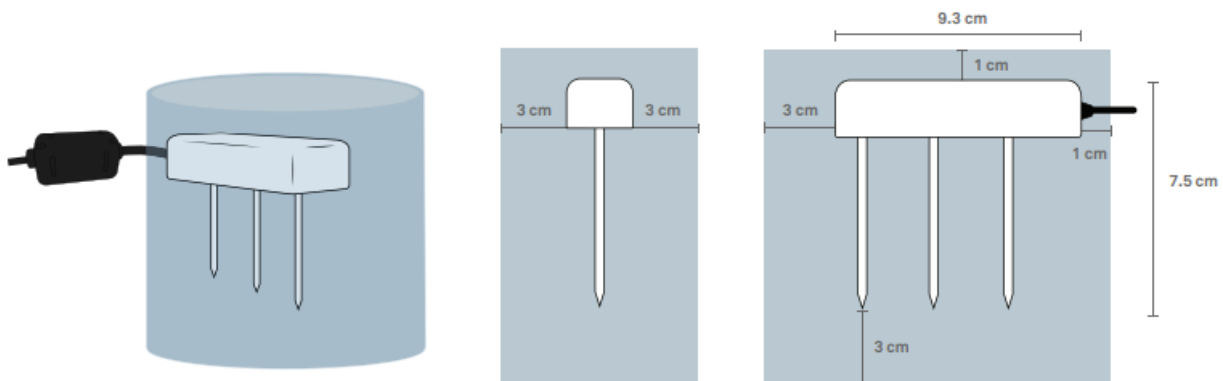
U model su ugrađene različite vrste senzora kojima se prati vlažnost, sukcija, tlak, električni konduktivitet, temperatura, pomak i neki drugi čimbenici koje je moguće mjeriti. Također prije početka samog pokusa potrebno je priključiti senzore na uređaje za prikupljanje i pohranu podataka (dana loggere). Prilikom pokusa korištena su ukupno 3 data loggера u koje su senzori spajani ovisno o segmentu modela u koji su postavljeni.

## 4.1 Mjerna oprema

Za mjerenje vlažnosti tla koriste se dva tipa senzora (slika 14 i 15) TEROS 10 i TEROS 12, oni služe za indirektno mjerenje volumetrijskog sadržaja vode poroznih materijala. Oba ta senzora temelje se na kapacitivnoj metodi za predviđanje količine vode u tlu na temelju električnih svojstava tla i postupku kalibracije.



Slika 14: Senzor TEROS 10 [14]



Slika 15: Senzor TEROS 12 [15]

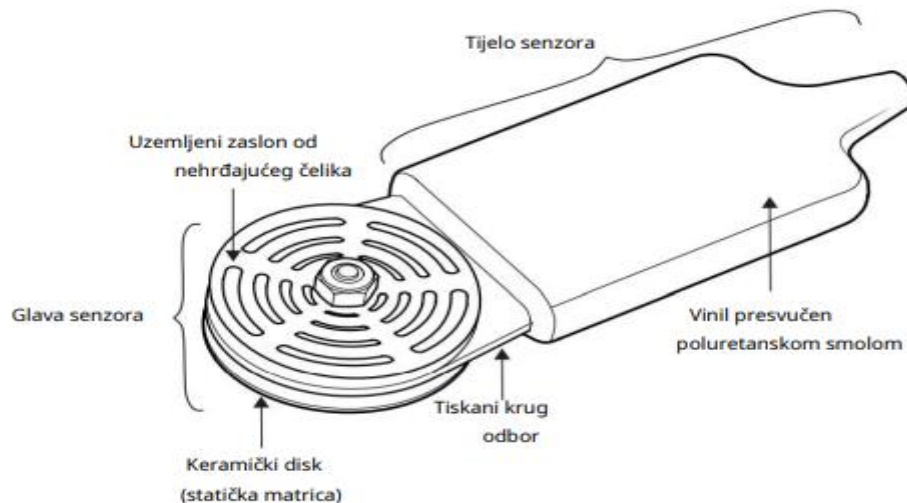
Tablica 2: Specifikacije senzora TEROS 10.[15]

Volumetrijski sadržaj vode (VWC)	
Raspon	
Kalibracija mineralnog tla	0,00-0,64m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Kalibracija medija bez tla	0,00-0,7m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Prividna dielektrična permitivnost ( $\epsilon_a$ )	1(zrak) do 80 (voda)
NAPOMENA: Raspon VWC ovisi o mediju na koji je senzor kalibriran. Prilagođena kalibracija će zadovoljiti potrebne raspone za većinu podloga.	
Rezolucija	0,001m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Točnost	
Kalibracija mineralnog tla	$\pm 0,03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ tipično za mineralna tla koja imaju otopinu EC <8 dS/m
Kalibracija medija bez tla	$\pm 0,05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ tipično za medije koji imaju otopinu EC <8 dS/m
Srednja specifična kalibracija	$\pm 0,01-0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$ u bilo kojem poroznom mediju
Prividna dielektrična permitivnost ( $\epsilon_a$ )	1-40 (raspon tla), $\pm \epsilon_a$ (bez jedinice) 40-80, 15% mjerenja
Dielektrična mjerna frekvencija	
70 MHz	
Dimenzije	
Duljina	5,1 cm
Širina	2,4 cm
Visina	7,5 cm
Duljina igle	
5,4 cm	

Tablica 3: Specifikacije senzora TEROS 12.[16]

Volumetrijski sadržaj vode (VWC)	
Raspon	
Kalibracija mineralnog tla	0,00-0.70m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Kalibracija medija bez tla	0,00-1,0m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Prividna dielektrična permitivnost ( $\epsilon_a$ )	1(zrak) do 80 (voda)
NAPOMENA: Raspon VWC ovisi o mediju na koji je senzor kalibriran. Prilagođena kalibracija će zadovoljiti potrebne raspone za većinu podloga.	
Rezolucija	0,001m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>
Točnost	
Generička kalibracija	$\pm 0,03$ m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> tipično za mineralna tla koja imaju otopinu EC <8 dS/m
Srednja specifična kalibracija	$\pm 0,01$ -0,002 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> u bilo kojem poroznom mediju
Prividna dielektrična permitivnost ( $\epsilon_a$ )	1-40 (raspon tla), $\pm \epsilon_a$ (bez jedinice) 40-80, 15% mjerenja
Dielektrična mjerna frekvencija	
70 MHz	
Dimenzije	
Duljina	9,4 cm
Širina	2,4 cm
Visina	7,5 cm
Duljina igle	
5,5 cm	

Za mjerenje pornih tlakova prilikom pokusa koristi se senzor TEROS 21 (slika 16). TEROS 21 je dizajniran da bude matrični potencijalni senzor bez održavanja i dizajniran za dugotrajna, kontinuirana mjerenja na terenu. TEROS 21 mjeri dielektričnu permitivnost čvrste matrice kako bi se odredio sadržaj vode u čvrstoj matrici. Odnos između sadržaja vode i matričnog potencijala, poznat kao karakteristična krivulja vlage u tlu, koristi se za izračunavanje matričnog potencijala tla. Ovaj pristup mjerenju, zajedno s procesom kalibracije koji se koristi u proizvodnji, omogućuje točna mjerenja vodnog potencijala [16] .

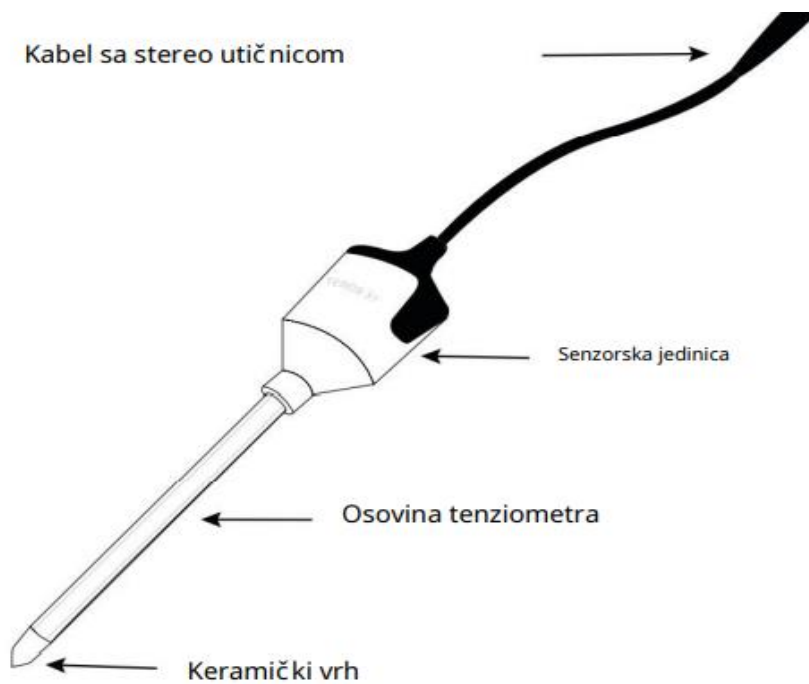


Slika 16: Senzor TEROS 21[17]

Tablica 4: Specifikacije senzora TEROS 21.[17]

Potencijal vode	
Raspon	-5 do 100,000 kPa (1.70 do 6.00pF)
Rezolucija	0.1 kPa
Točnost	$\pm(10\%$ od očitavanja + 2 kPa) od -100 do -5 kPa
NAPOMENA: TEROS 21 Gen 2 može očitavati do 0 kPa kada je na stazi vlaženja. Ulazak zraka u tlo ograničava performanse senzora do -5 kPa na krivulji sušenja	
Napomena: TEROS 21 nije dobro kalibriran iznad -100 kPa	
Dielektrična mjerna frekvencija	
70 MHz	
Temperatura	
Raspon	-40 do +60 °C
Rezolucija	0.1 °C
Točnost	$\pm 1$ °C
Dimenzije	
Duljina	9,6 cm
Širina	3,5 cm
Visina	1,5 cm
Promjer senzora	
5,5 cm	

Uz navedeni uređaj TEROS 21 koji indirektno mjeri porni pritisak vode u tlu u model su ugrađuju i senzori TEROS 31 (slika 17) i senzor TEROS 32 (slika 18). Senzor TEROS 31 je mini-tenziometar duljine od svega 2 cm. Zbog tako malih dimenzija senzora TEROS 31 oni su izuzetno pogodni za laboratorijsku upotrebu te izuzetno brzo reagiraju na promjene tlaka vode u tlu, te ekvilibracija uređaja traje vrlo kratko [18].



Slika 17: Senzor TEROS 31[18]

Tablica 5: Specifikacije senzora TEROS 31.[18]

Potencijal vode	
Raspon	-85 do +50 kPa (do -150 kPa tijekom usporavanja vrenja)
Rezolucija	$\pm 0.0012$ kPa
Točnost	$\pm 0.15$ kPa
Temperatura	
Raspon	-30 do +60 °C
Rezolucija	$\pm 0.1$ °C
Točnost	$\pm 0.5$ °C
Napomena: Ako senzor nije zakopan, izmjerena temperatura može se razlikovati od temperature tla	
Dimenzije	
Duljina	17,5 mm
Širina	23,5 mm
Visina	49,0 mm
Promjer osovine	
5 mm	



Slika 18: Senzor TEROS 32[19]



Tablica 6: Specifikacije senzora TEROS 32.[19]

Potencijal vode	
Raspon	-85 do +50 kPa
Rezolucija	$\pm 0.0012$ kPa
Točnost	$\pm 0.15$ kPa
Temperatura	
Raspon	-30 do +60 °C
Rezolucija	$\pm 0.1$ °C
Točnost	$\pm 0.1$ °C između -20 i +40 °C ( $\pm 1$ °C izvan ovog raspona)
Dimenzije	
Duljina	40 cm
Duljina	80 cm
Duljina	120 cm
Promjer	
2,5 cm	

Prije ugradnje, treba kondicionirati sve uređaje na direktno mjerenje pornih tlakova, a kada se završi pokus, potrebno je čuvati senzore u vodi kako bi se spriječila desaturacija poroznog kamenja.

## 5. ANALIZA PODATAKA PRIKUPLJENIH TIJEKOM POKUSA I ANALIZE STABILNOSTI MODELA

Tablica 7: osnovne značajke mješavine pijeska i kaolina

Pijesak + kaolin 10%		
Parametri	Simboli	pijesak-kaolin
specifična gravitacija	$G_s$	2.69
minimalni omjer praznina	$e_{min}$	0.647
maksimalni omjer praznina	$e_{max}$	1.121
kut trenja	$\varphi(^{\circ})$	31.3
kohezija	$c(kN/m^2)$	3.9
početna poroznost	$n_i$	0.469
početna relativna gustoća	$D_{r_i}$	0.5
početni sadržaj vode	$w_i(\%)$	5

Proračun zapreminske težine za numeričku analizu.

$$\gamma_s = G_s * \gamma_w \quad \gamma_s = 2,69 * 9,81 \quad \gamma_s = 26,39 kN/m^3$$

$$\gamma = (1 - n) * \gamma_s + n * s * \gamma_w \quad \gamma = (1 - 0,469) * 26,39 + 0,469 * 1 * 9,81$$

$$\gamma = 18,61 kN/m^3$$

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

## 5.1 Model bez mjera sanacije

Ovaj pokus je proveden 2.4.2021. sa početkom u 10.15. U pokusu su korištene mlaznice 3x460, pod kutom prskanja od  $90^\circ$  pri 2 bara pritiska i protokom od 0,4 l/min.

U model se ugrađivao pijesak sa 10% kaolina. Slika 19 prikazuje model prije početka pokusa.



Slika 19: Model bez mjera sanacije prije početka pokusa

Na slici 20 vidljiva je pojava prve pukotine koja je opažena u 25 minuti od početka pokusa, ubrzo nakon toga pojavljuje se još nekoliko pukotina koje vidimo na slici 21.

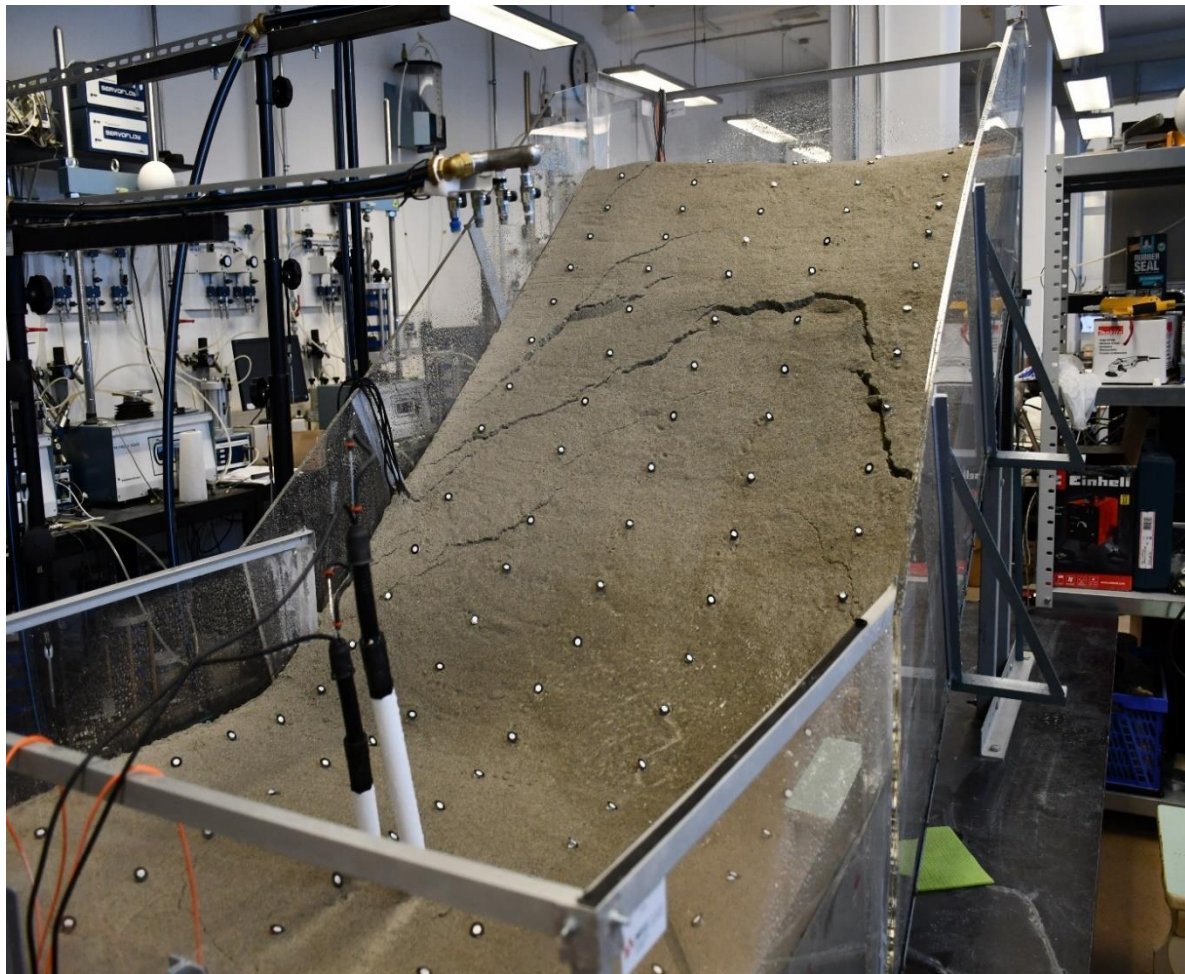


Slika 20: Pojava prve pukotine u modelu bez mjera sanacije



Slika 21: Pojava nekoliko pukotina u modelu bez mjera sanacije (t=35 min)

Na slici 22 možemo vidjeti slom tla a na slici 23 vidimo kako dolazi do stvaranja malog rotacijskog klizišta u nožici modela. Nakon stvaranja klizišta veća količina vode izbija na površinu i u potpunosti potapa nožicu modela.



Slika 22: Pojava plohe sloma u modelu bez mjera sanacije ( $t=40$  min)



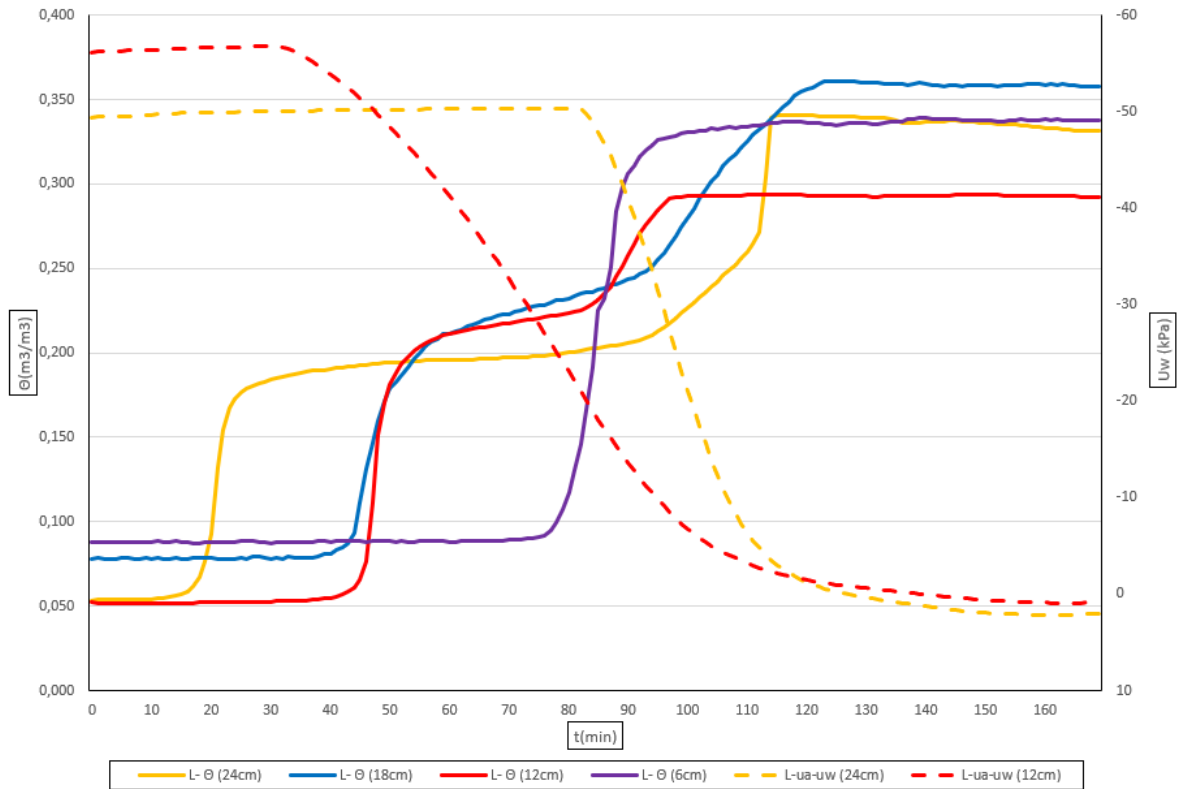
Slika 23: Gibanje kliznog tijela u modelu bez mjera sanacije ( $t=120$  min)

Slika24 prikazuje kako se kretalo klizno tijelo nakon 210 minuta pokusa i vidimo da je tada nožica modela u potpunosti potopljena. Vidljivo je ispiranje materijala.



Slika 24: Klizno tijelo i potopljena noica modela bez mjera sanacije

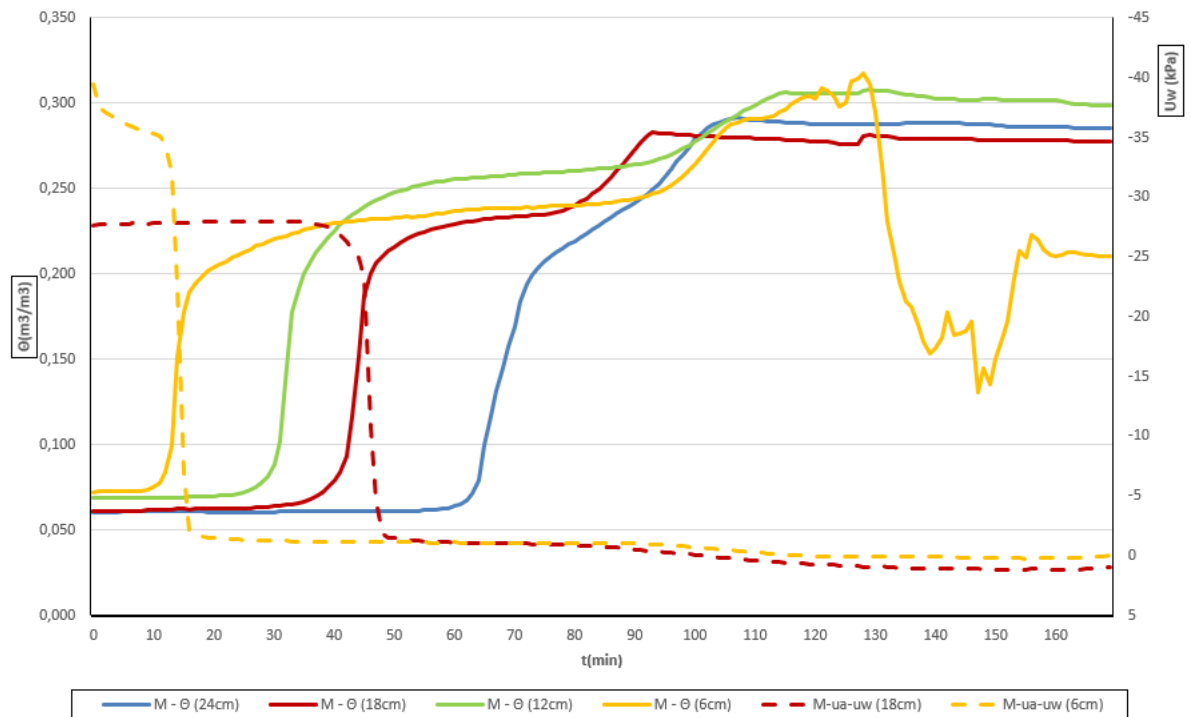
Sadržaj vode i porni tlak na L vertikali prikazani su na dijagramu na slici 25. Iz dijagrama se jasno vidi kako sadržaj vode prije poraste u dubljim slojevima modela nego u plitkim. Uzrok tomu je podizanje razine podzemne vode. Dijagrami pornih tlakova se ponašaju slično kao dijagrami sadržaja vode, ali se primijeti određeni vremenski odmak.



Slika 25: Sadržaj vode i porni tlak na L vertikali

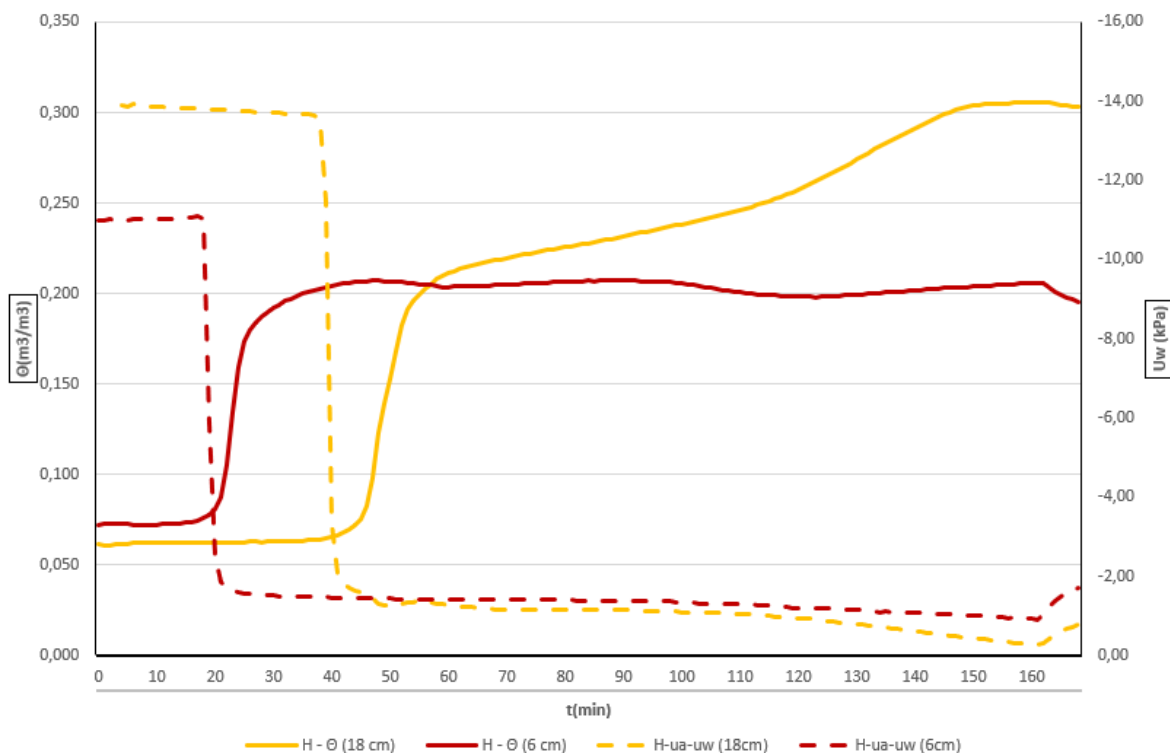
Dijagram na slici 26 prikazuje sadržaj vode i porni tlak na M vertikali. Iz dijagrama se vidi kako sadržaj vode, prije poraste u višim slojevima a to se događa zbog simulacije oborine i procjeđivanja vode kroz više slojeve. U donjim slojevima sadržaj vode se počinje povećavati nešto kasnije ali kada krene rasti, prirast je izrazito nagal a dijagram sadržaja vode je gotovo vertikalalan. Slom tla događa se oko 130 minute, što se na našem dijagramu očituje naglim padom sadržaja vode najvišeg gornjeg sloja. Porni tlak na obje dubine ima tendenciju porast slično kao i sadržaj vode, te se njihovi prirasti događaju u gotovo istom vremenskom intervalu.





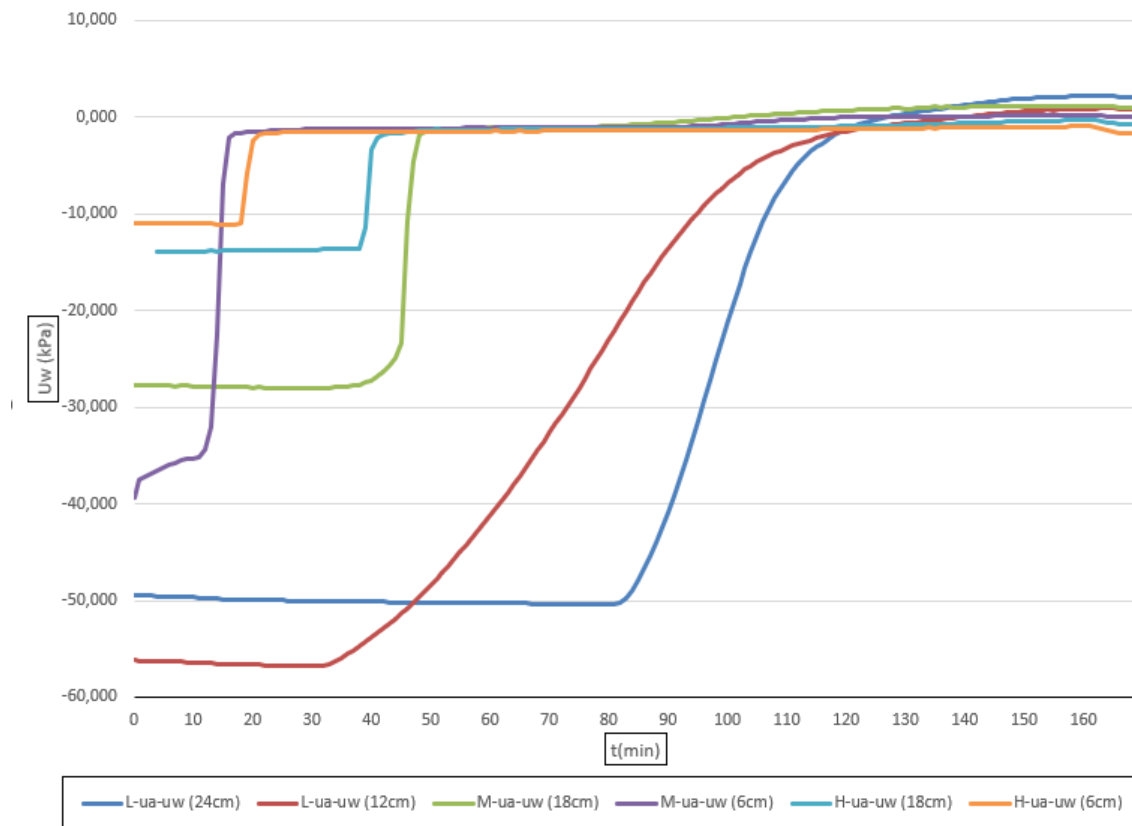
Slika 26: Sadržaj vode i porni tlak na M vertikali

Dijagramu na slici 27 prikazuje sadržaj vode i porni tlak na H vertikali. Iz dijagrama očitavamo da sadržaj vode prvo raste u slojevima bliže površini nego u dubljim slojevima. To se događa zbog simulacije oborine i procjeđivanja kroz materijal modela. Sadržaj vode dostiže veće apsolutne vrijednosti u dubljim slojevima modela. Porni tlak najprije poraste u plicim a zatim u dubljim slojevima modela. On u oba slučaja doseže slične konačne vrijednosti. Dijagrami pornih tlakova i sadržaja vode imaju tendenciju postizanja nekih maksimalnih konačnih vrijednosti nakon čeka se izravnavaju. Porast se gotovo uvijek prije primijeti u plicim slojevima.



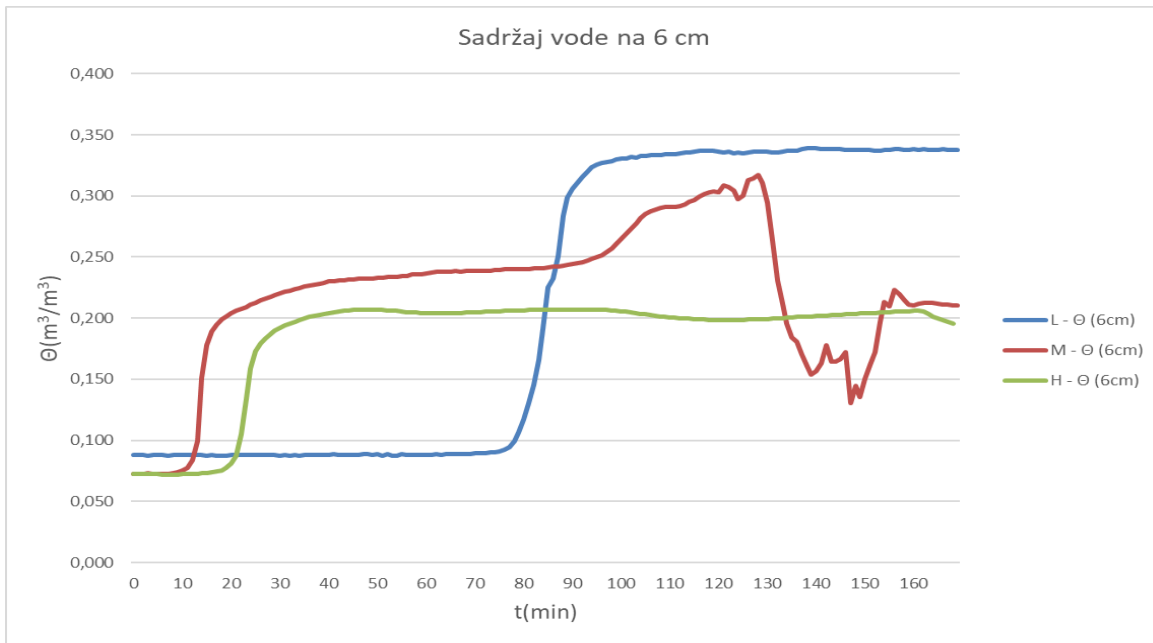
Slika 27: Sadržaj vode i porni tlak na H vertikali

Na slici 28 prikazan je dijagram pornih tlakova na svim vertikalama duž modela po slojevima na kojima se senzori nalaze. Vidljivo je da se porast najprije događa u plćim slojevima modela ta progresivno s procjeđivanjem vode taj porast vidimo i u dubljim slojevima modela. Porni tlak raste sve do potpune saturacije modela kada teži u nulu što jasno vidimo iz dijagrama.



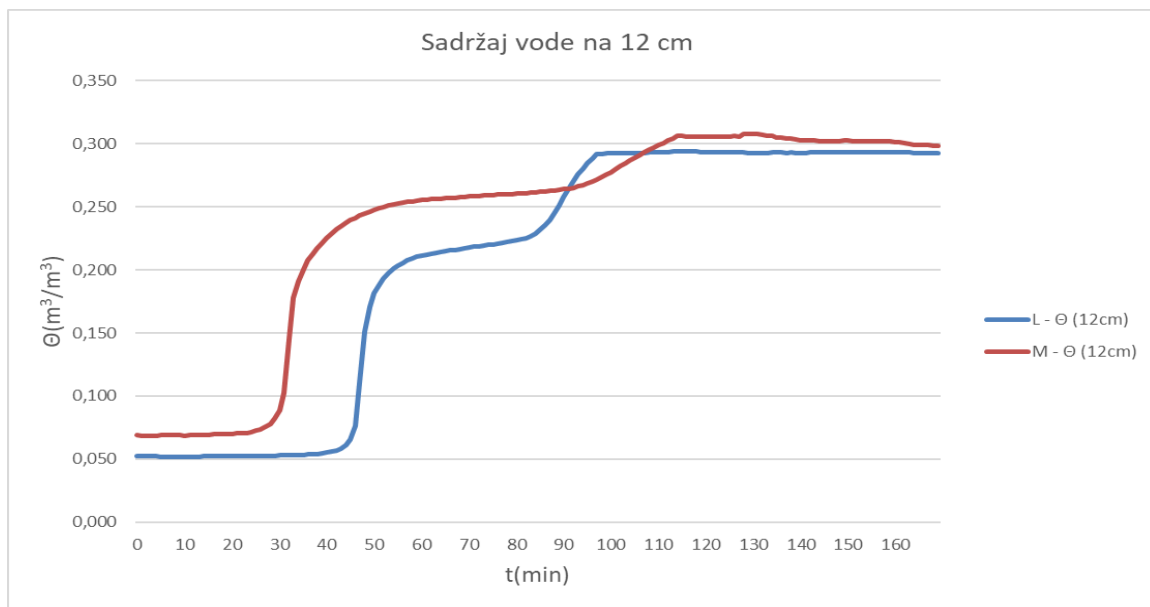
Slika 28: Porni tlak po svim vertikalama

Na svim vertikalama u modelu očitavan je sadržaj vode na dubini od 6 cm. Sa slike 18 vidimo da najbrže dolazi do porasta vlažnosti u sredini modela, a ubrzo nakon toga i u gornjem djelu modela. Promjena vlažnosti u najnižem djelu modela nastaje tek nakon 70 minuta, kada dolazi do naglog porasta vlažnosti iz čega zaključujemo da je razina podzemne vode u nožici modela naglo porasla. Na krivulji vlažnosti srednjeg djela modela nakon 130 minute dolazi do naglog opadanja sadržaja vode, što pripisujemo slomu materijal i pojavi klizne plohe.



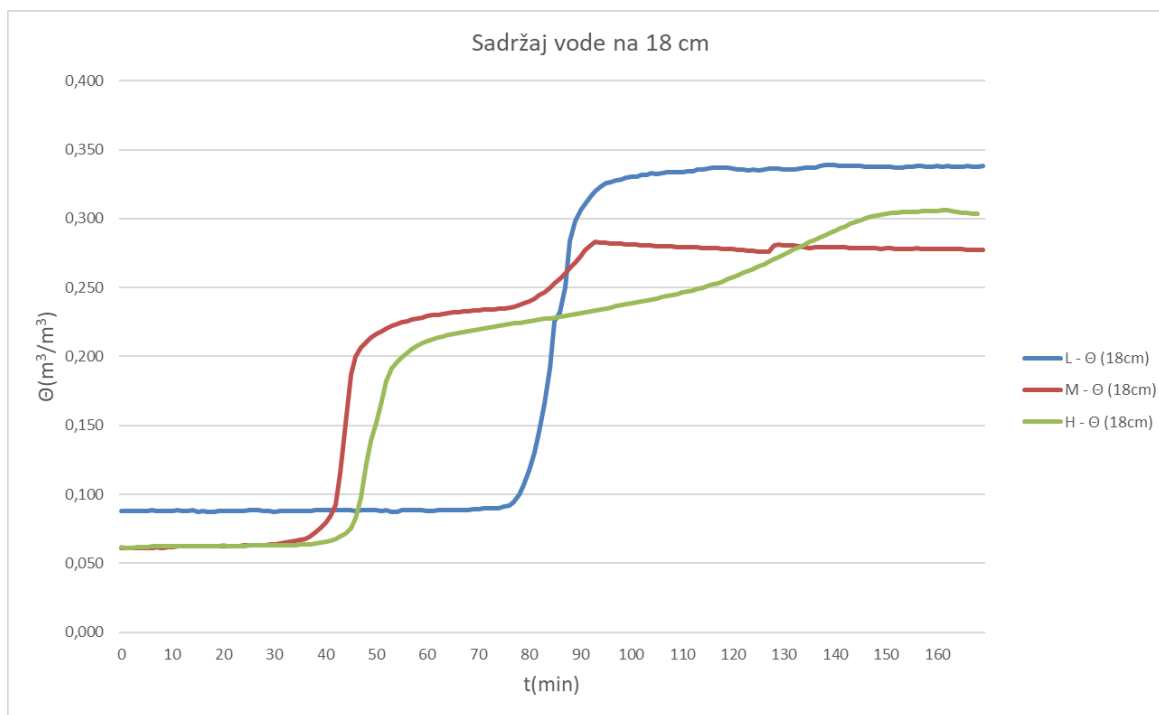
Slika 29: Sadržaj vode na 6 cm dubine

Slika 30 prikazuje sadržaj vode očitani u donjem (L) i srednjem (M) dijelu modela na dubini od 12 cm. Krivulje promjene sadržaja vode su prilično ujednačene osim što u donjem djelu modela porast počinje nešto kasnije.



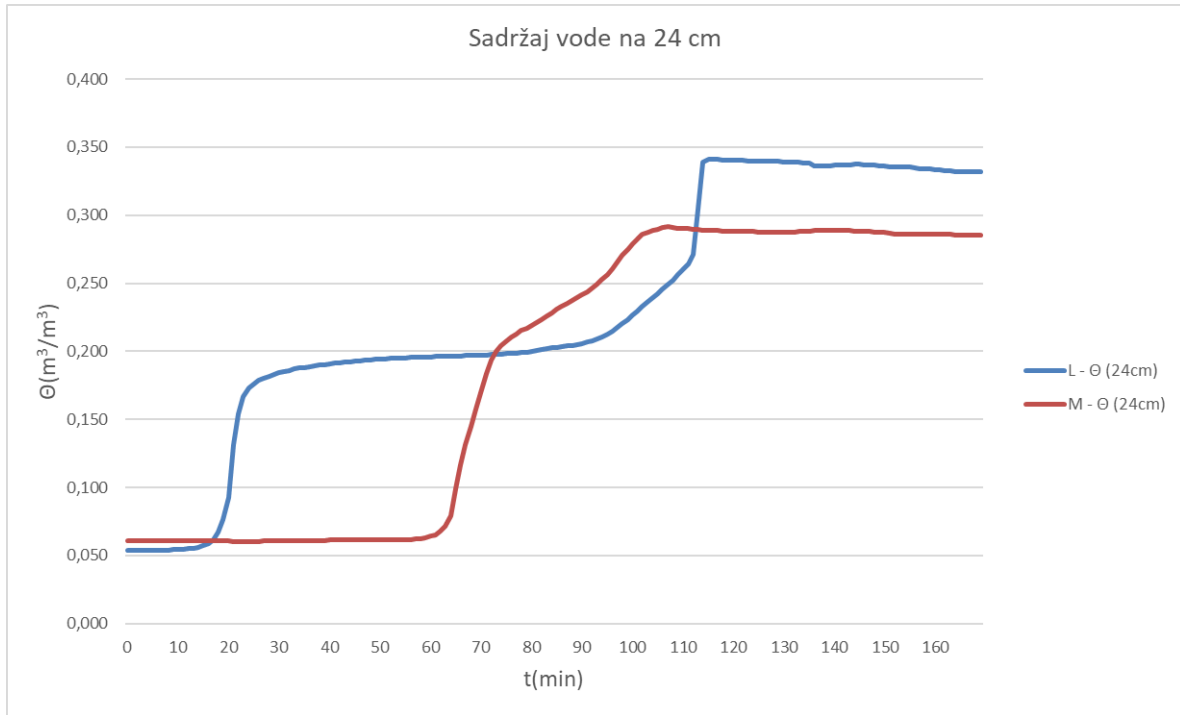
Slika 30: Sadržaj vode na 12 cm dubine

Slika 31 prikazuje kretanje sadržaja vode na dubini od 18 cm u svim dijelovima modela. Sadržaj vode na dubini od 18 cm se ujednačeno mijenja na sve 3 vertikale sve do 80 min kada dolazi do naglog rasta u donjem (L) dijelu modela. Takav nagli porast pripisujemo nakupljanju vode u nožici modela što rezultira povećanjem razine podzemne vode.



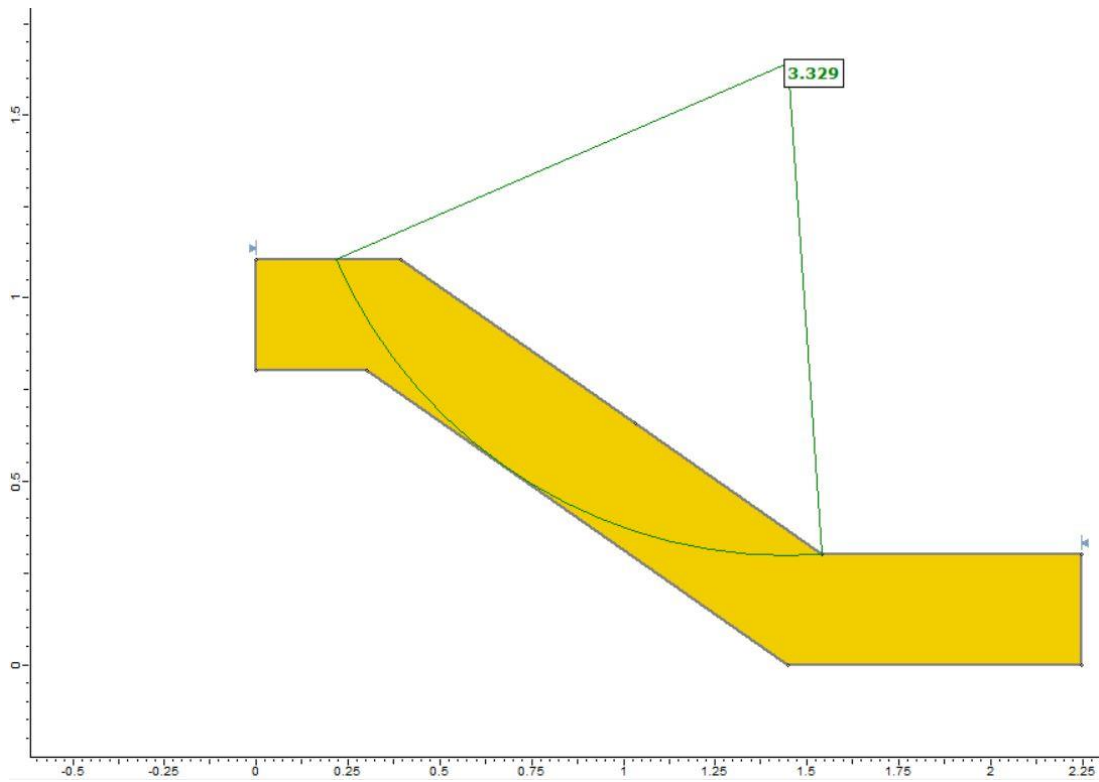
Slika 31: Sadržaj vode na 18 cm dubine

Slika 32 prikazuje sadržaj vode mjeren na 24 cm dubine u donjem (L) i srednjem djelu modela. Primjećujemo da u donjem djelu modela do porasta sadržaja vode dolazi dosta ranije u odnosu na srednji dio modela što nam ukazuje da se voda nakuplja u nožici modela te dolazi do porasta razine podzemne vode.

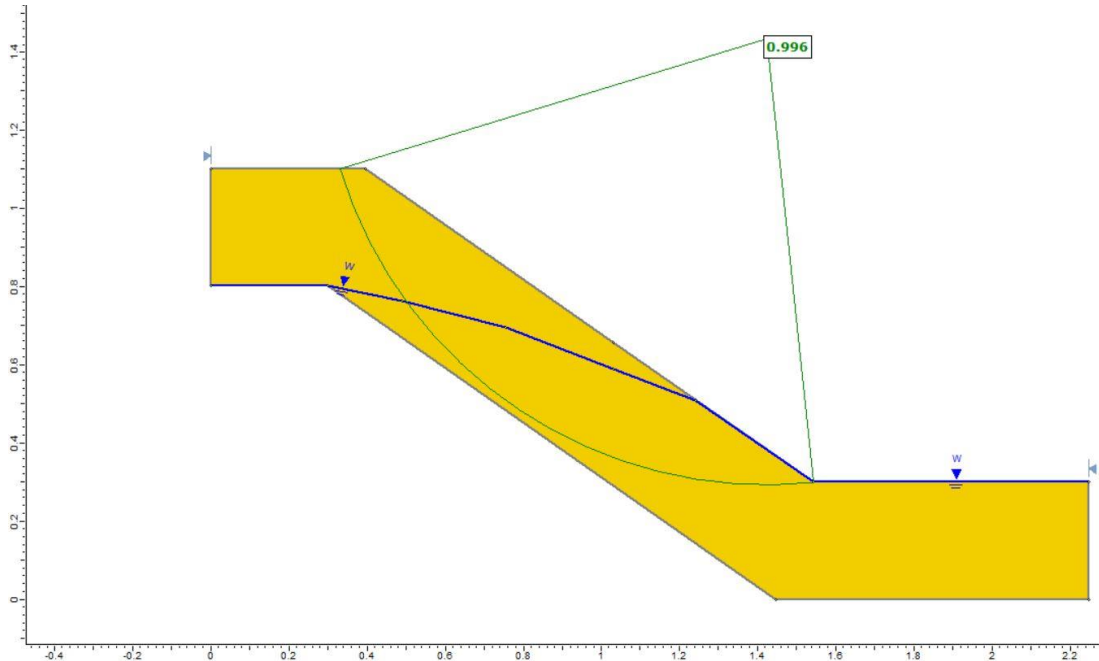


Slika 32: Sadržaj vode na 24 cm dubine

Slika 33 prikazuje kliznu plohu i faktor sigurnosti za umanjeni model klizišta, sa nagibom platforme od  $35^\circ$ , kohezijom  $c=3,9$  kPa i kutom unutarnjeg trenja materijala  $\varphi=31,3^\circ$  na početku pokusa, odnosno bez podzemne vode. Slika 34 prikazuje kliznu plohu i faktor sigurnosti za istu tu kliznu plohu uz podizanje razine podzemne vode do površine tla u dnu modela. Provedbom tih dviju numeričkih analiza može se vidjeti kako s pojavom vode u modelu faktor sigurnosti naglo opada sve do izazivanja sloma. Iz toga se zaključuje kako je podzemna voda glavni faktor nestabilnosti u ovome modelu.



Slika 33: Klizna ploha i faktor sigurnosti za umanjeni model u pokusu bez mjera sanacije i bez vode

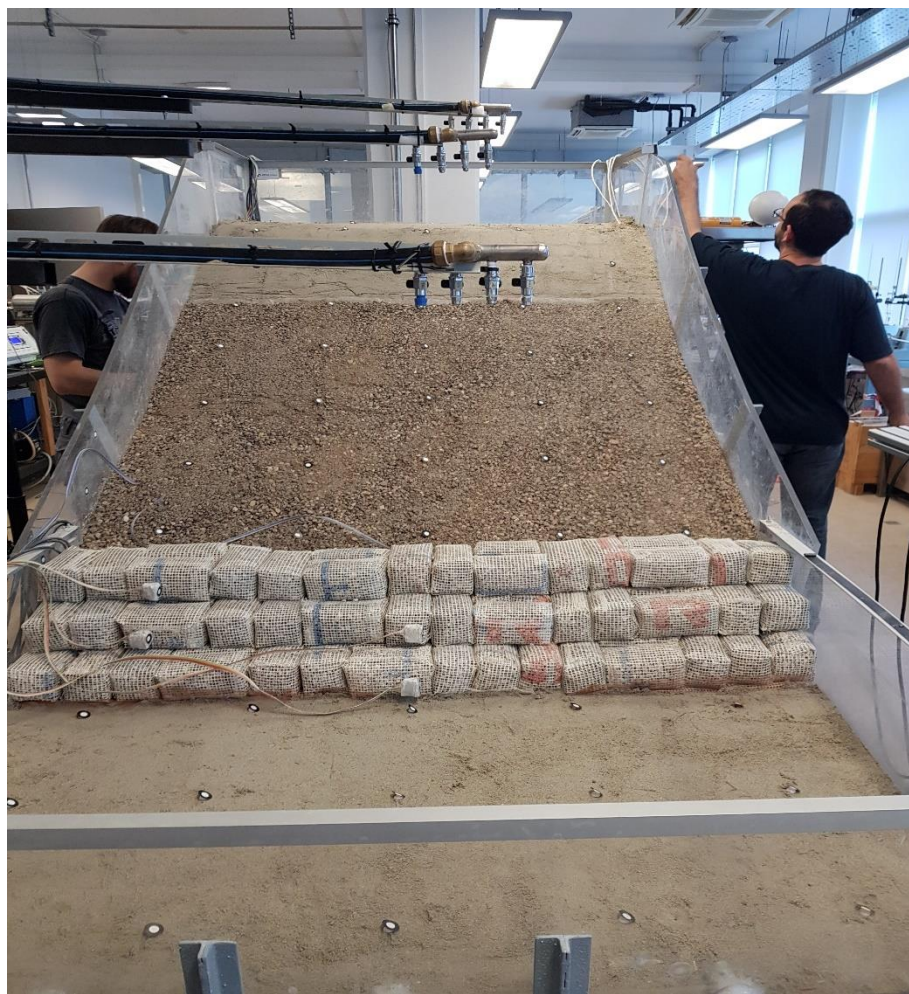


Slika 34: Kritična klizna ploha i razina podzemne vode za umanjeni model bez mjera sanacije

## 5.2 Model saniran gabionskom potpornom konstrukcijom

Ovaj pokus je proveden 8.6.2022. sa početkom u 11:15. U pokusu su korištene mlaznice 3x460, pod kutom prskanja od  $90^\circ$  pri 2 bara pritiska i protokom od 0,4l/min

U model se ugrađivao pijesak sa 10% kaolina. Razlika u odnosu na prvi pokus je u tome što smo u ovaj model ugrađivali mjere sanacije u vidu gabiona i zamjene materijala iz modela šljunkom iza gabionskog zida. Slika 35 prikazuje model prije početka pokusa.



Slika 35: Model prije početka pokusa

Slika 36 prikazuje prvu pukotinu koja se stvara u gornjem djelu modela nekih 35 minuta nakon početka pokusa.





Slika 36: Pojava prve pukotine u gornjoj zoni modela ( $t=35$  min)

Nakon 135 minuta trajanja pokusa dolazi do potpunog potapanja nožice modela što je prikazano na slici 37.



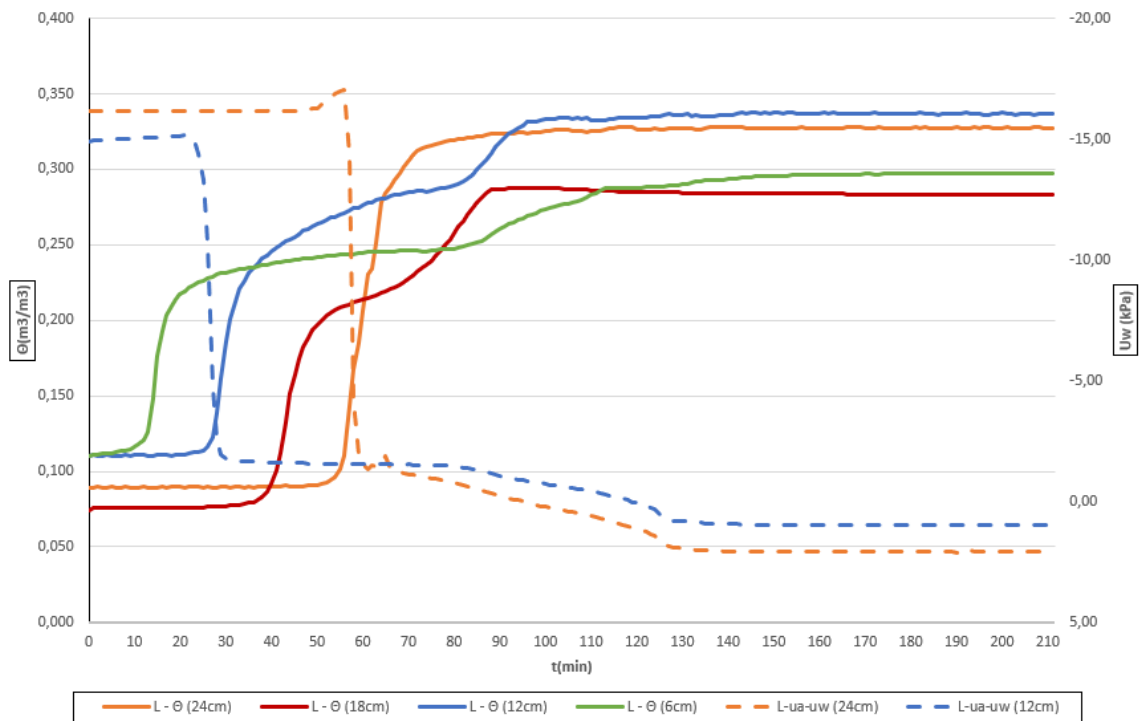
Slika 37: Potpuno potapanje nožice ( $t=135$  min)

Nakon 200 minuta od početka pokusa dolazi do ispiranja materijala preko zone sanacije u modelu (slika 38). Unatoč pojavi nekih manjih pukotina u gornjoj zoni modela, do pojave globalnih nestabilnosti nije došlo. U modelu na kojem su provedene mjere sanacije do pojava klizišta nije došlo tokom cjelog vremena trajanja pokusa što nije bio slučaj u modelu na kojem nisu provedene mjere sanacije. Iz toga zaključujemo kako ovakav tip mjera sanacije primjeren u ovakvim uvjetima.



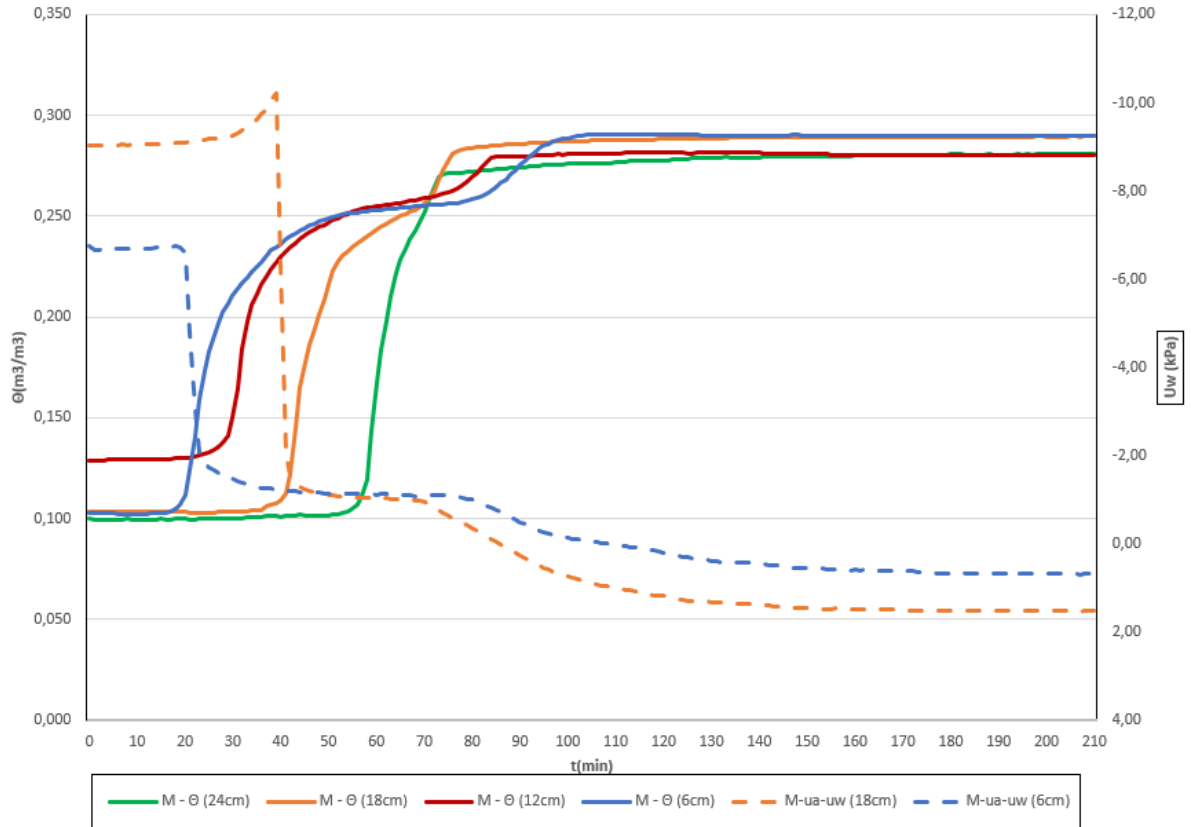
Slika 38: Ispiranje materijala preko zone sanacije

Sadržaj vode i porni tlak na L vertikali prikazani su na dijagramu na slici 39. Iz dijagrama vidimo kako porni tlak i sadržaj vode imaju vrlo sličan trend. Sadržaj vode najprije poraste u plićim slojevima modela zatim se polako pomiče prema dubljim slojevima. Porast se događa naglo i zatim postaje konstantna vrijednost kada dođe do potpune saturacije. Na vrlo sličan način se ponašaju i krivulje pornog tlaka.



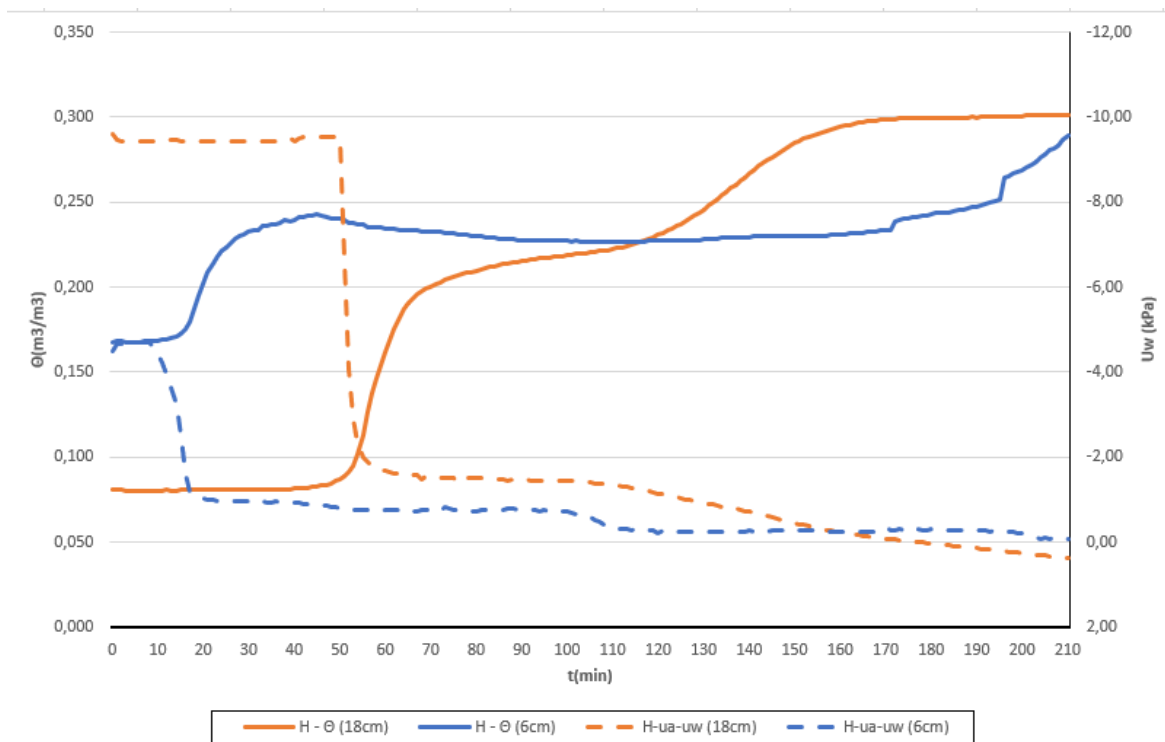
Slika 39: Sadržaj vode i porni tlak na L vertikali

Slika 40 prikazuje dijagram sadržaja vode i porni tlak na M vertikali na različitim dubinama. Iz dijagram očitavamo kao se najprije događa porast u višim slojevima modela koji nastaje usljed simulacije oborine i procjeđivanja vode kroz tlo. Porast sadržaja vode u nižim slojevima kreće nešto kasnije i u svim slučajevima taj porast je gotovo vertikalni. Na model bez mjera sanacije na središnjoj vertikali zabilježen je slom nakon 130 minuta izlaganja oborini, a na modelu sa mjerama sanacije ne bilježimo nikakav slom unatoč dugotrajnijem izlaganju modela oborini. Ta činjenica ukazuje da su mjere sanacije povećale faktor stabilnosti te da je model znatno otporniji na oborinska opterećenja. Krivulje pornog tlaka imaju istu tendenciju porasta kao i krivulje sadržaja vode.



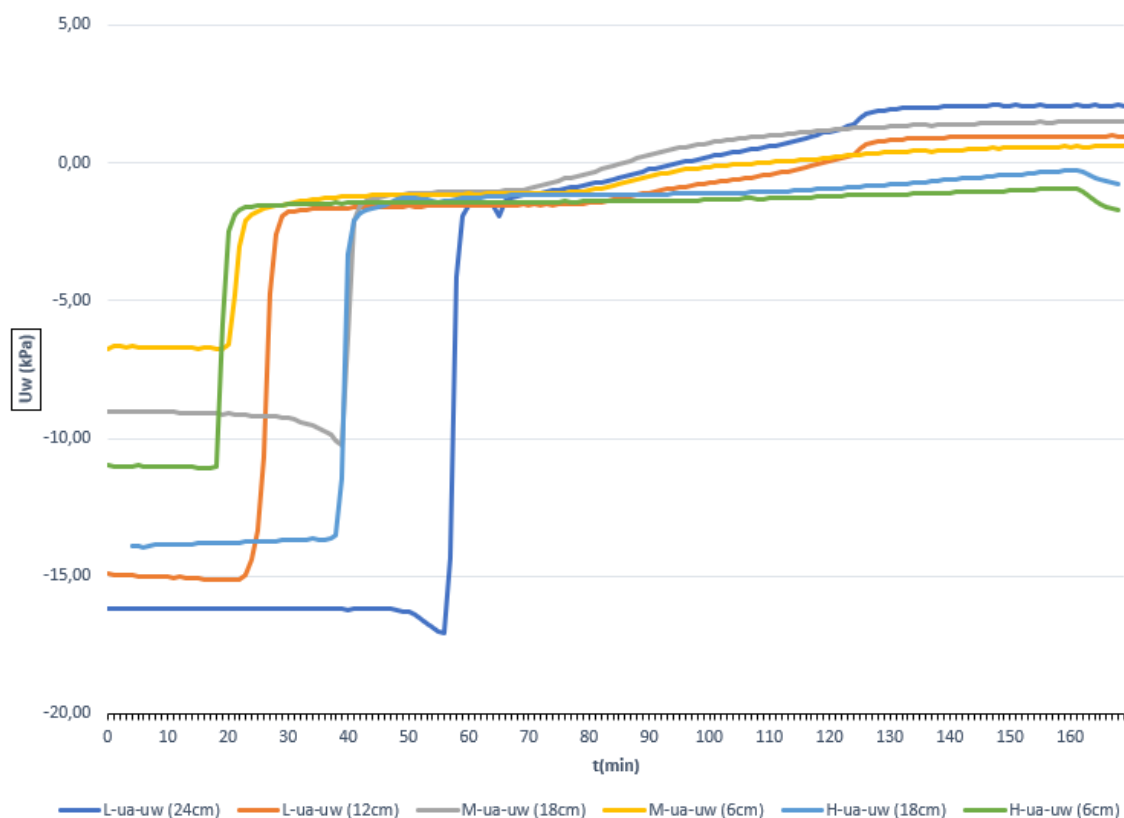
Slika 40: Sadržaj vode i porni tlak na M vertikali

Dijagramu na slici 41 prikazuje sadržaj vode i porni tlak na H vertikali. Iz dijagrama se jasno vidi da sadržaj vode najprije počinje rasti u plićim slojevima zbog procjeđivanja kroz tlo a porast sadržaja vode u dubljim slojevima modela se događa s određenim vremenskim odmakom. Ti porasti su izrazito nagli sve dok ne dođe do potpune saturacije tla kada sadržaj vode poprima konstantnu vrijednost. Krivulje pornih tlakova imaju istu tendenciju kao i krivulje sadržaja vode i te se njihov porast događa istovremeno za senzore postavljene na istim dubinama.



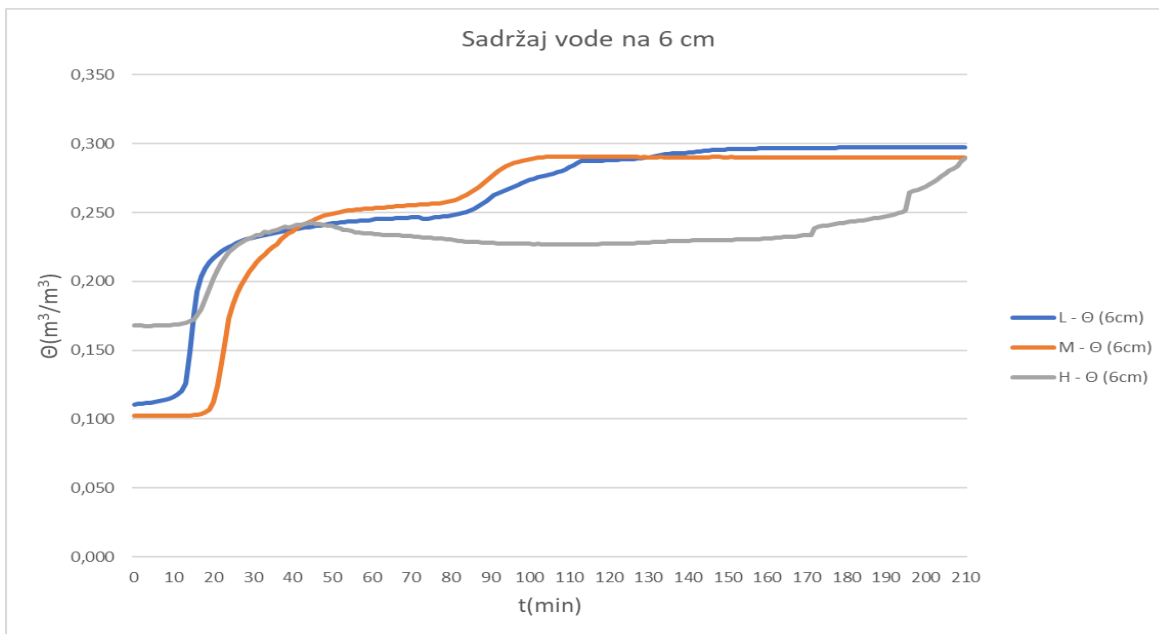
Slika 41: Sadržaj vode i porni tlak na H vertikalima

Na slici 42 prikazan je dijagram pornih tlakova na svim vertikalama u modela po slojevima na kojima se senzori nalaze. Porni tlak najprije raste u plićim slojevima modela neovisno o vertikalima na kojima se senzori nalaze.



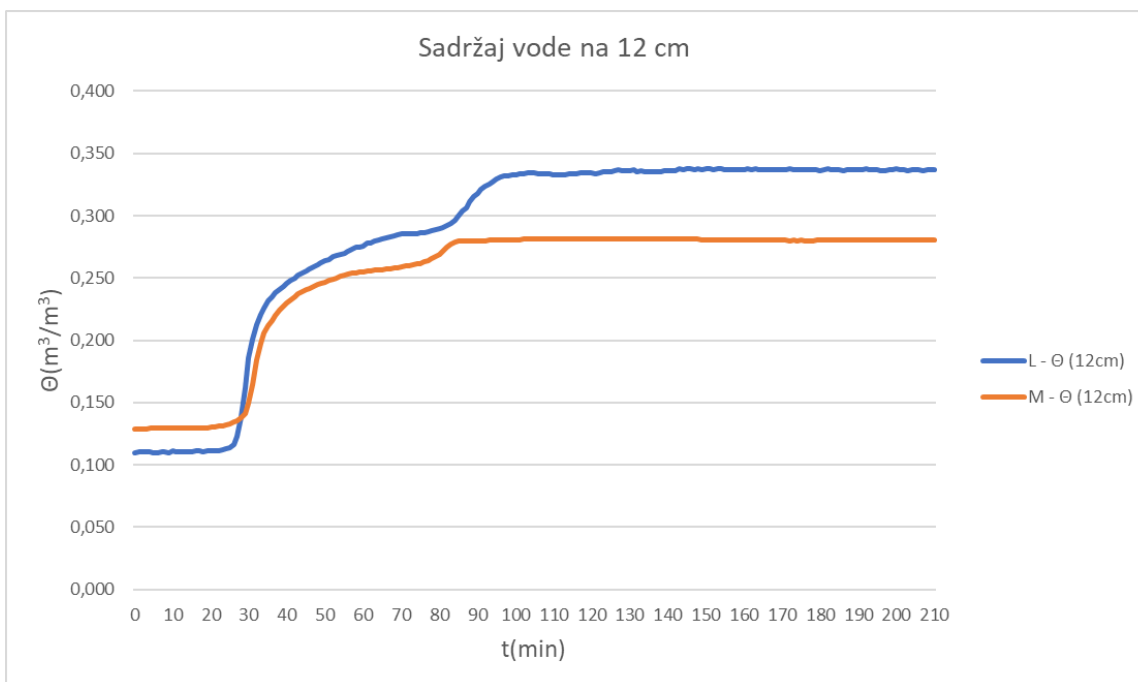
Slika 42: Pomi tlak po svim vertikalama

Sadržaj vode na dubini od 6 cm je prikazan na slici 43. Dijagrami sadržaja vode u svim segmentima su prilično ujednačeni na u donjem i srednjem segmentu modela. Porast sadržaja vode u gornjem djelu se događa u isto vrijeme kada i u ostalim dijelovima modela ali mu treba puno više vremena da doživi potpunu saturaciju. To se događa zato jer inicijalni porast uzrokuje procjeđivanje koje je jednako u svim segmentima modela ali gornji dio zbog gravitacijskog otjecanja treba puno više vremena da se potpuno zasiti vodom.



Slika 43: Sadržaj vode na 6 cm dubine

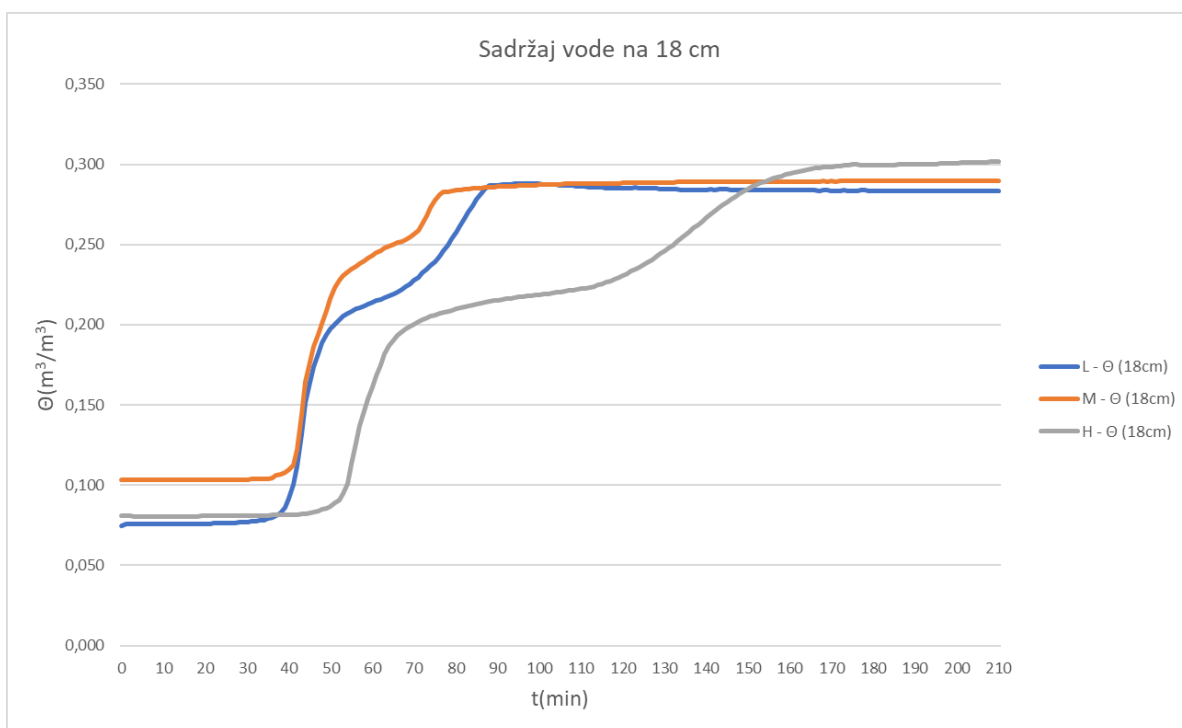
Sadržaj vode na dubini od 12 cm očitavan je u donjem (L) i srednjem (M) segmentu modela, što je prikazano na slici 44. Uočavamo da je promjena sadržaja vode prilično ujednačena osim što se razlikuje u početnim i krajnjim iznosima.



Slika 44: Sadržaj vode na 12 cm dubine

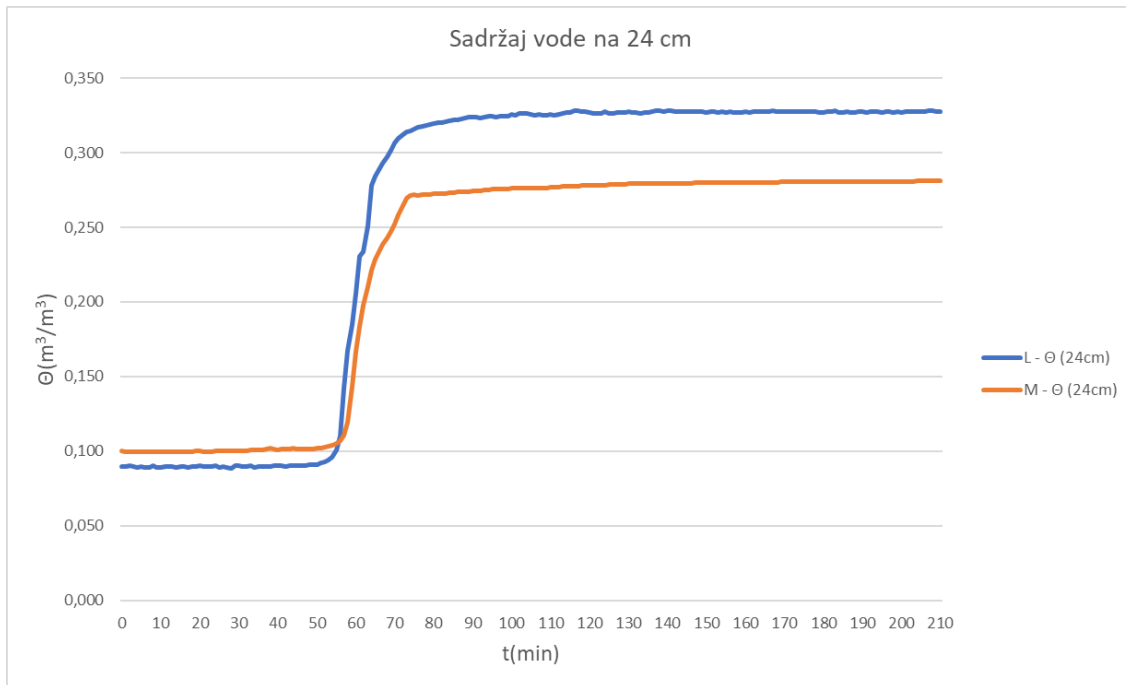


Sadržaj vode na 18 cm dubine očitano je u svim dijelovima modela. Sa slike 45. može se zamijetiti da se sadržaj vode na ovoj dubini podjednako mijenja u donjem (L) segmentu i srednjem (M) segmentu. Sadržaj vode u gornjem (H) segmentu dostiže maksimalnu vrijednost mnogo kasnije u odnosu na srednji i donji segment. razlog tome je gravitacijsko otjecanje vode prema nižim dijelovima modela.



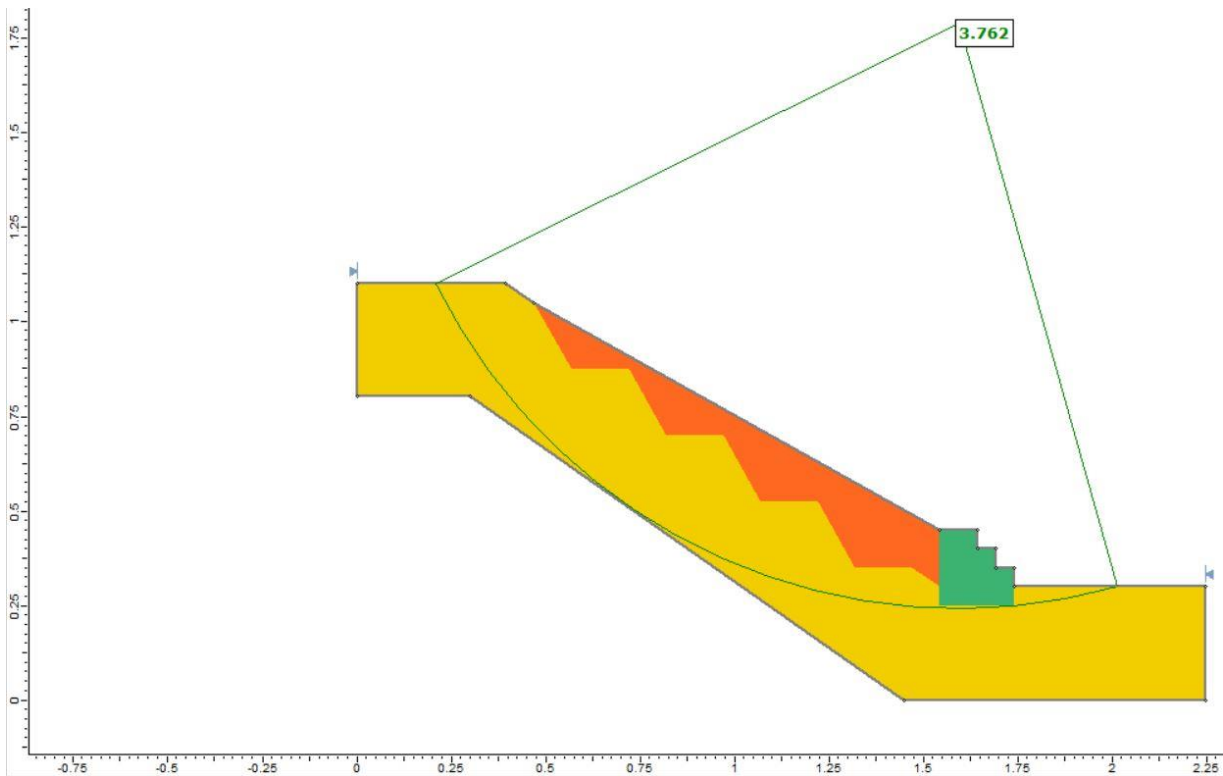
Slika 45: Sadržaj vode na 18 cm dubine

Slika 46 prikazuje sadržaj vode na dubini od 24 cm u donjem (L) i srednjem (M) dijelu modela. Iz dijagrama je vidljivo da krivulje sadržaja vode imaju sličan trend u promatranim segmentima s malim vremenskim odmakom i dosežu nešto drugačije konačne vrijednosti.

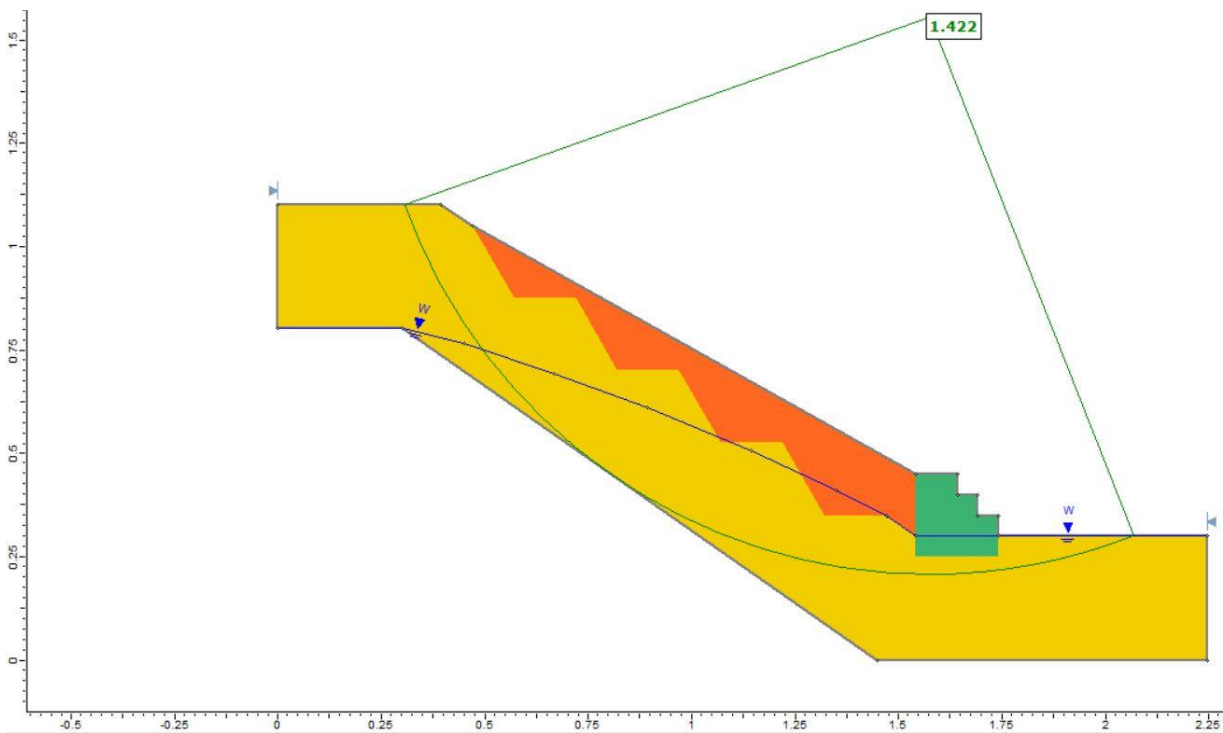


Slika 46: Sadržaj vode na 24 cm dubine

Slika 47 prikazuje kliznu plohu i faktor sigurnosti za umanjeni model klizišta, sa nagibom platforme od  $35^\circ$ , kohezijom  $c=3,9$  kPa i kutom unutarnjeg trenja materijala  $\varphi=31,3^\circ$  sa provedenim mjerama sanacije na početku pokusa (prije rasprskavanja vode). Primjetno je kako je za iste parametre materijala i geometrijske uvjete modela faktor sigurnosti nešto veći u odnosu na nesanirani model. Na slici 48 primjetno je smanjenje faktora sigurnosti u modelu u koji je prisutno podizanje razine podzemne vode do površine tla u dnu modela. Faktor sigurnosti je na saniranom modelu još uvijek iznad 1 i ne dolazi do pojave klizanja, za razliku od modela na kojem nisu bile provedene mjere sanacije.



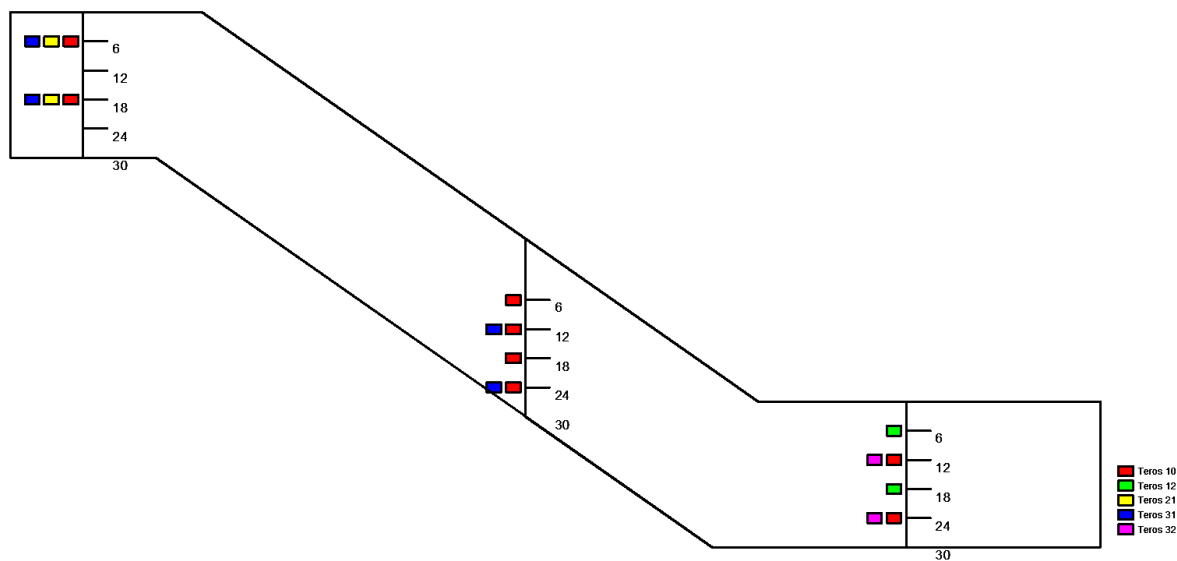
Slika 47: Klizna ploha i faktor sigurnosti u pokusu sa mjerama sanacije bez vode



Slika 48: Kritična klizna ploha i razina podzemne vode za umanjeni model sa mjerama sanacije

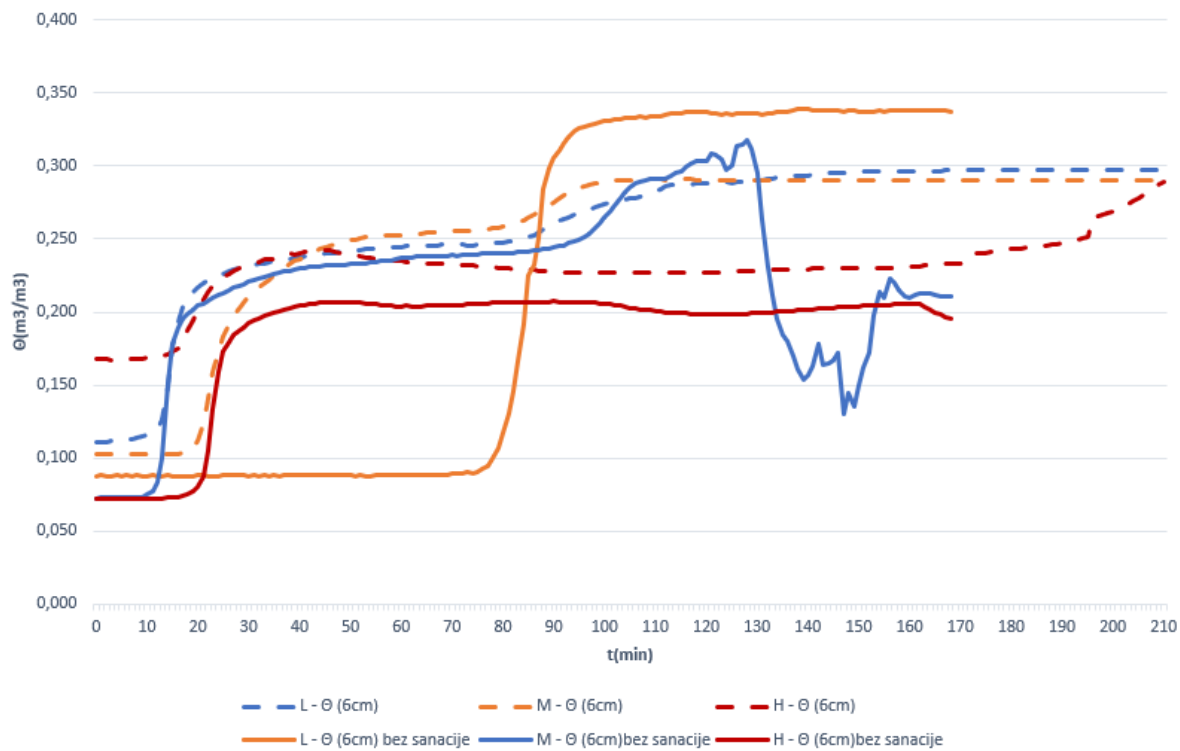
### 5.3 Usporedba modela

Vrsta i pozicija senzora se poklapaju u oba modela zbog lakše usporedbe slika(49).



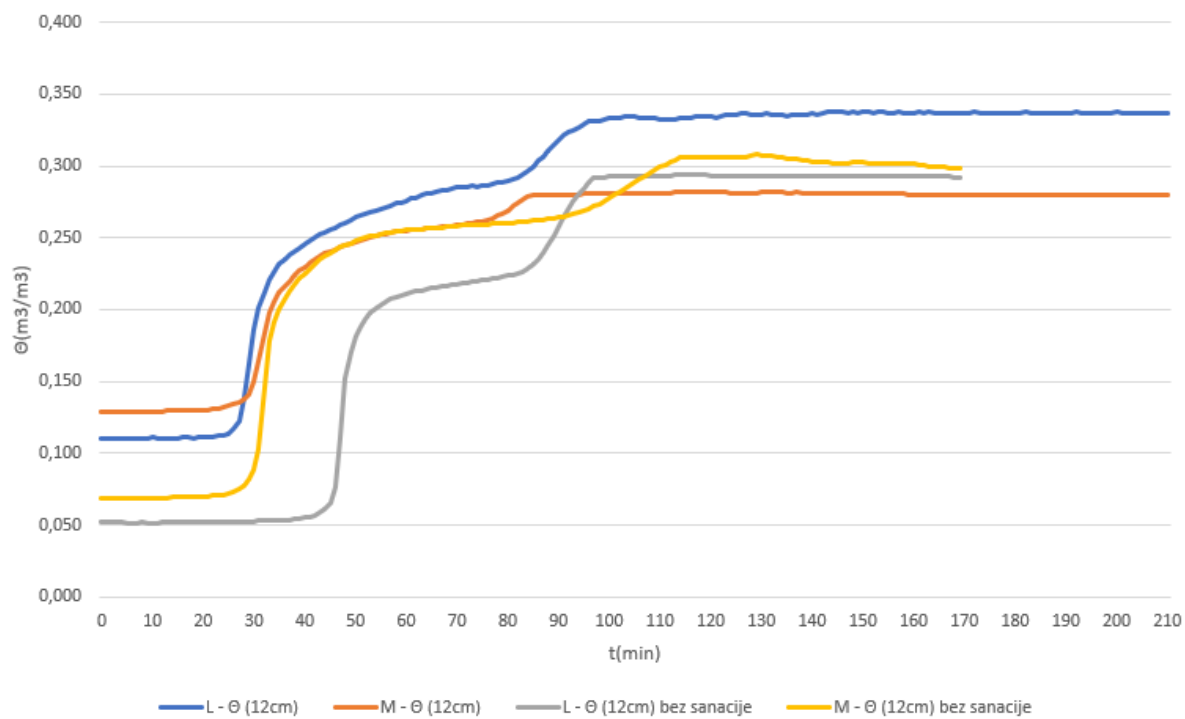
Slika 49: Pozicije senzora u oba pokusa

Slika 50 prikazuje sadržaj vode na dubini od 6 cm u svim segmentima oba modela. Iako krivulje imaju sličan trend primjećuje se nešto kasniji porast sadržaja vode na modelu bez mjera sanacije. Te je primjetan i slom tla na dijagramu (M) u modelu bez mjera sanacije koji se očituje naglim padom sadržaja vode. Takvog sloma nema na dijagramima modela sa mjerama sanacije.



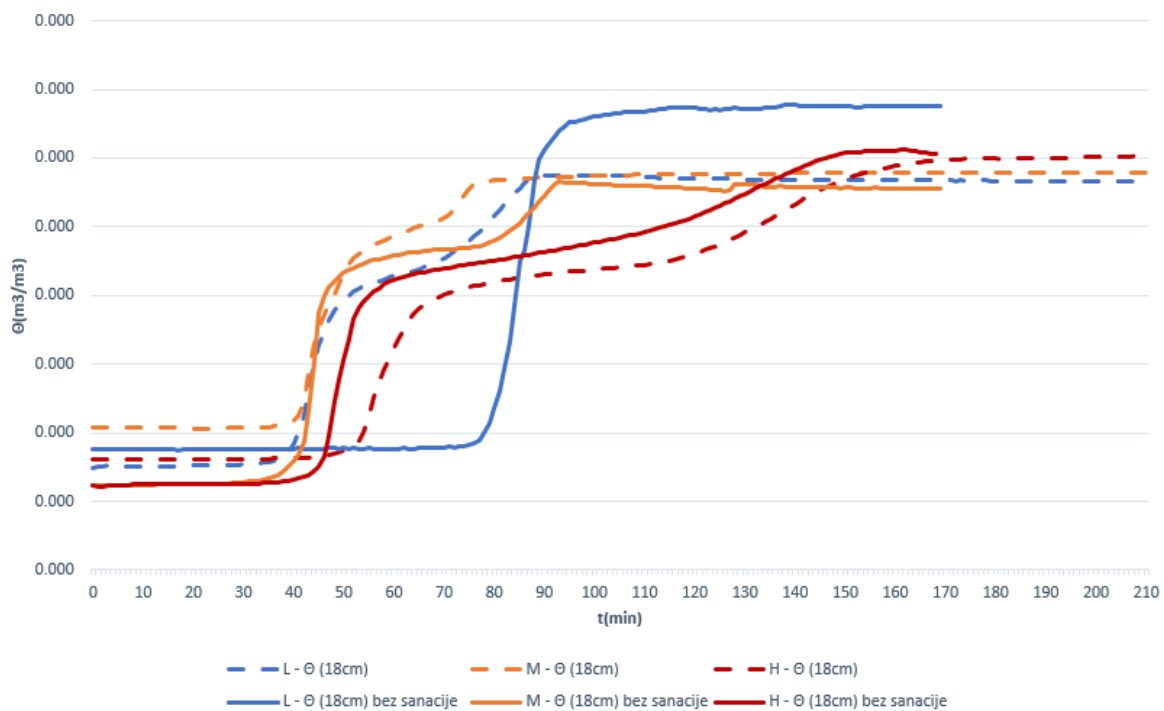
Slika 50: Usporedba sadržaja vode na 6 cm dubine u oba pokusa

Slika 51 prikazuje sadržaj vode na 12 cm dubina na oba modela. Porast sadržaja vode na modelu bez mjera sanacije je nešto kasniji u odnosu na model sa mjerama sanacije.



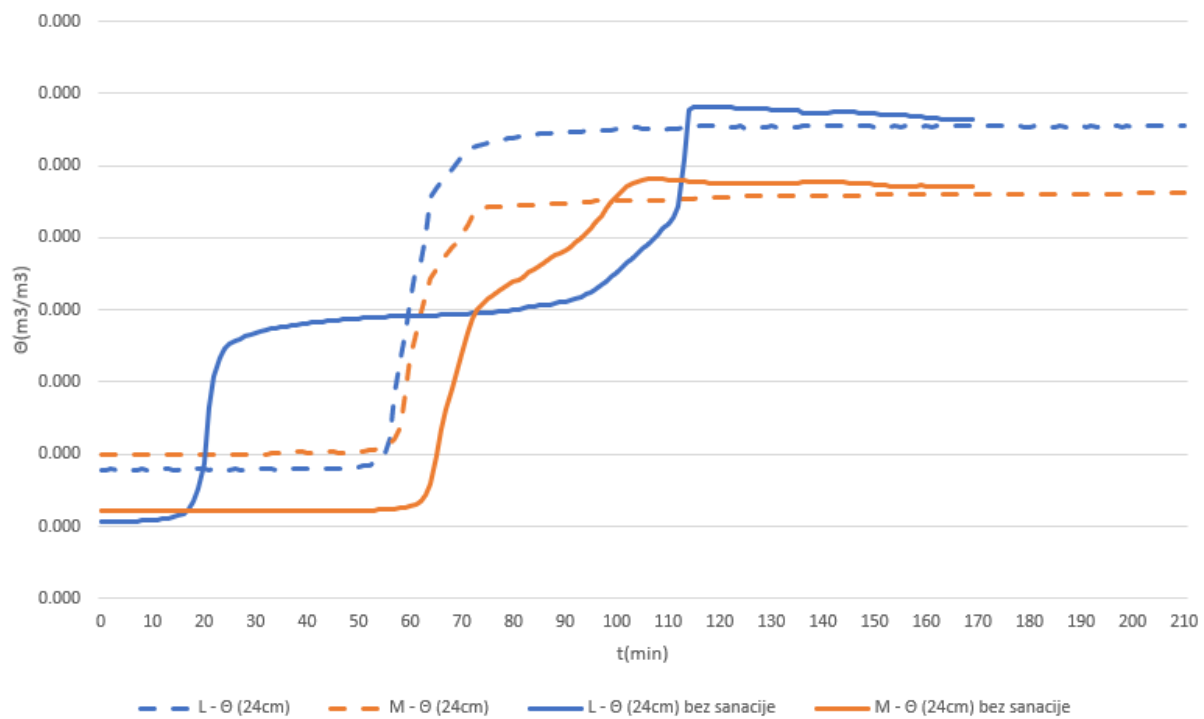
Slika 51: Usporedba sadržaja vode na 12 cm dubine u oba pokusa

Slika 52 prikazuje sadržaj vode na 18 cm dubina na oba modela. Trend rasta krivulja na istoj dubini je sličan ali uočava se vremenski pomak između faza porasta sadržaja vode.



Slika 52: Usporedba sadržaja vode na 18 cm dubine u oba pokusa

Slika 53 prikazuje sadržaj vode na 24 cm dubina na oba modela. Postoji sličan trend rasta krivulja sadržaja vode alise on događa s određenim vremenskim pomakom.



Slika 53: Usporedba sadržaja vode na 24 cm dubine u oba pokusa



## 6. ZAKLJUČAK

Tema ovog diplomskog rada je stabilnost umanjenih modela klizišta simuliranih kišom te primjena mjera sanacije na takvim modelima. 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 te njegova usporedba sa modelom na kojem su primijenjene mjere sanacije.

Klizišta imaju značajan utjecaj na okoliš i stanovništvo. Klizišta su ozbiljan problem jer dovode do katastrofalnih posljedica i svake godine uzimaju danak u ljudskim životima i velikoj materijalnoj šteti. Iz tih razloga klizišta su ozbiljni problem kojim se geotehničko inženjerstvo mora baviti.

Jedan od glavnih razloga pokretanja klizišta je zasićenje tla vodom koje se događa uslijed vrlo intenzivnih oborina. Hidrološki uvjeti u tlu nam govore da brzo uklanjanje procjedne vode iz kosine nije moguće. Takvo nakupljanje procjedne vode u tlu ima za posljedicu povećanje poreznih tlakova u tlu. Temeljem tih spoznaja možemo zaključiti da je kretanje procjednih voda u tlu značajno i ono uzrokuje destabilizaciju kosine i stvaranje klizišta. Saturirane uvjete u kliznom tijelu potvrđuje izbijanje vode u nožici klizišta. Kada se zna što je glavni uzrok pojave nestabilnosti mjere sanacije mogu se oblikovati na način da smanje pojavu tog uzroka.

Provedenim ispitivanjima smo utvrdili da je glavni razlog razvoja klizišta destabilizacija nožice kosine i visoka razina procjedne vode. Zbog toga smo mjere sanacije izvodili na način da smanjimo razinu procjedne vode ugradnjom krupnozrnatog materijala koji ne zadržava vodu, a nožicu smo dodatno stabiliziramo gravitacijskim opterećenjem u vidu gabiona. Važno je napomenuti da mjere sanacije treba provoditi na cijelom modelu ne samo u donjoj zoni jer tako daju najbolji učinak.

Umanjeni modeli koriste se za eksperimentalno proučavanje nekih pojava u prirodi, a rezultati tih proučavanja mogu se prenijeti na procese u prirodi čije su veličine proporcionalne veličini modela. Zbog svoje jednostavnosti i malih dimenzija modeli omogućuju brzo i učinkovito prikupljanje podataka u odnosu na složena mjerenja koja treba izvoditi u prirodi. Prednost modela je i u tome što nam omogućuje ponavljanje pokusa u kontroliranim uvjetima.

Iznimno je važno da model bude dobro projektiran, u suprotnom čak i uz korištenje najbolje mjerne opreme navesti će nas na donošenje pogrešnog zaključka.

Podaci očitani sa mjernih uređaja kao što su vlažnost, porni tlak, električna provodljivost, koje dobivamo tokom trajanja ispitivanja služe nam za dobivanje boljeg uvida u procese koji se događaju u klizištu. Temeljem podataka o promjeni vlažnosti materijala tla i povećanjem razine podzemne vode dolazi do destabilizacije modela

Iz provedenih pokusa proizlazi zaključak da smanjenjem razine podzemne vode i promjenom geometrije kosine odnosno smanjenjem nagiba dolazi do povećanja stabilizirajućeg efekta stoga je potrebno puno više vremena da nastanu pukotine i cjelokupna kosina na kojoj su primijenjene mjere sanacije znatno je stabilnija u odnosu na kosinu bez mjera sanacije.

## 7. LITERATURA I IZVORI

Internet:

- [1] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Klizi%C5%A1te,\\_2](https://hr.wikipedia.org/wiki/Klizi%C5%A1te,_2) (pristupljeno: 15.06.2022.)
- [2] <https://www.geotech.hr/vrste-i-elementi-klizista/> (pristupljeno: 23.08.2022.)
- [3] [https://www.voda.hr/sites/default/files/pdf\\_clanka/hv\\_88\\_2014\\_157\\_rojebonacci.pdf](https://www.voda.hr/sites/default/files/pdf_clanka/hv_88_2014_157_rojebonacci.pdf) (pristupljeno: 25.06.2022.)
- [4] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=18322> (pristupljeno: 05.06.2022.)
- [5] [https://bib.irb.hr/datoteka/746696.sanacija\\_klizita\\_tekst.pdf](https://bib.irb.hr/datoteka/746696.sanacija_klizita_tekst.pdf) (pristupljeno: 05.06.2022.)
- [6] [https://www.gradri.uniri.hr/files/izdavacka\\_djelatnost/zbornik\\_radova\\_ZT.pdf](https://www.gradri.uniri.hr/files/izdavacka_djelatnost/zbornik_radova_ZT.pdf) (pristupljeno: 17.06.2022.)

Knjige:

- [7] Highland L M and Bobrowsky P 2008 The landslide Handbook - A guide to understanding landslides US Geol. Surv. Circ. 1 147
- [8] Varnes D 1978 Slope Movement Types and Processes Transp. Res. Board Spec. Rep
- [9] 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)
- [10] 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
- [11] 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

- [12] 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
- [13] 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
- [14] Peranić J., Vivoda Prodan M., Bernet Gazibara S., Krkač M., Arbanas Mihalić S., Arbanas Ž., Ožujak 2022., *Landslide Modelling and Application: Proceedings of the 5th ReSyLab*, Zagreb (pristupljeno: 10.09.2022.)
- [15] 20788\_TEROS10\_Manual\_Web (pristupljeno: 05.06.2022.)
- [16] 20587\_TEROS11-12\_Manual\_Web (pristupljeno: 05.06.2022.)
- [17] 20854\_TEROS21\_Gen2\_Manual\_Web (pristupljeno: 05.06.2022.)
- [18] 20799\_TEROS 31\_Manual\_Web (pristupljeno: 05.06.2022.)
- [19] 20786\_TEROS32\_Manual\_Web (pristupljeno: 05.06.2022.)