

Razvoj nestabilnosti kosine u umanjenom modelu izloženom oborinama

Pušelja, Anita

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:157:564574>

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**

Anita Pušelja

**RAZVOJ NESTABILNOSTI KOSINE U UMANJENOM MODELU
IZLOŽENOM OBORINAMA**

Diplomski rad

Rijeka, 2022.

**SVEUČILITE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

Diplomski sveučilišni studij

Smjer: Geotehnika

Kolegij: Stabilnost kosina

Anita Pušelja

JMBG: 0114029279

**RAZVOJ NESTABILNOSTI KOSINE U UMANJENOM MODELU
IZLOŽENOM OBORINAMA**

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2022.

IZJAVA

Diplomski rad izradila sam 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.



Anita Pušelja

Naziv studija: Diplomski studij Građevinarstvo

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

IZJAVA

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

Voditelj projekta: Prof.dr.sc. Željko Arbanas

Šifra projekta: IP-2018-01-1503

Financijer projekta: Hrvatska naklada za znanost

Pravna nadležnost: Građevinski fakultet Sveučilište u Rijeci

U Rijeci, 14. rujan 2022.

Mentor:

Prof.dr.sc. Željko Arbanas

ZAHVALA

Prije svega, zahvaljujem se stručnom mentorstvu od strane prof. Željka Arbanasa koji godinama na različitim kolegijima, na profesionalan način prenosi svoje znanje.

Također, prof. Josipu Peraniću zahvaljujem na pruženo i stručno vodstvo tijekom izrade diplomskog rada, odnosno stručno vodstvo kroz obavljanje cijelog laboratorijskog pokusa. I veliko hvala na otvorenosti i dostupnosti u potrebi konzultiranja.

Zahvaljujem se obitelji, dečku, prijateljima i kolegama koji su bili uz mene u raznim trenucima slabosti i klonulosti te im veliko hvala što su mi pružili podršku i bili mi vjetar u leđa.

Svatko je pridonio malo, kako bi u konačnici uspjela dobiti puno više.

SAŽETAK

Klizišta se svrstavaju u najopasnije i najčešće geohazarde na svijetu. S obzirom na kompleksnu pojavu klizišta zadatak diplomskog rada je pripomoći razumijevanju i utjecaju pri pojavi klizanja. Izrada umanjenih modela izvodi se na Građevinskom fakultetu u Rijeci što je u sklopu projekta Fizičko modeliranje ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih i seizmičkih djelovanja. Prikupljanje podataka pri ispitivanjima korisno je za procjenu rizika pri pojavi klizišta kao i odabiru pravovaljane mjere sanacije. Diplomskim radom prikazat će se svi dobiveni rezultati ispitivanja čime će se objasniti pojava nestabilnosti te se ukazati na rad senzora pri mjerenjima s obzirom na opisane komponente unutar priručnika. Utjecaj vlažnosti i porni pritisci dat će zaključke prema kojima se odvija proces destabilizacije kosine.

KLJUČNE RIJEČI: stabilnost kosina, vlažnost, mjerenja, porni pritisci, umanji model klizišta, senzor

ABSTRACT

Landslides are classified as the most dangerous and frequent geohazards in the world. Considering the complex occurrence of landslides, the task of the thesis is to help understand and influence the occurrence of landslides. The production of reduced models is carried out at the Faculty of Civil Engineering in Rijeka, which is part of the project Physical modeling of the behavior of structures for the rehabilitation of landslides under the conditions of static and seismic actions. Data collection during tests is useful for risk assessment in the event of a landslide, as well as for the selection of valid remedial measures. The thesis will present all the obtained test results, which will explain the occurrence of instability and indicate the operation of the sensor during measurements with regard to the described components in the manual. The influence of humidity and pore pressures will give conclusions according to which the slope destabilization process takes place.

KEYWORDS: slope stability, humidity, measurements, pore pressures, reduced landslide model, sensor

Sadržaj

Popis slika	
Popis tablica	10
Popis oznaka	11
1. UVOD.....	13
2. KLIZIŠTA.....	14
2.1. Tipovi nestabilnosti unutar koherentnog i nekoherentnog materijala	15
2.2. Značajke i geometrija klizišta	21
2.2.1. Definicije elemenata i dimenzija klizišta.....	22
2.2.2. Procesi klizanja.....	25
3. FIZIČKO MODELIRANJE PONAŠANJA KONSTRUKCIJA ZA SANACIJU KLIZIŠTA U UVJETIMA STATIČKIH I SEIZMIČKIH DJELOVANJA	26
3.1. Materijali i metode	27
4. SENZORI ZA MJERENJE VLAŽNOSTI I PORNIH PRITISAKA U MODELU	29
4.1. Princip rada i osnovne značajke senzora.....	30
4.1.1. Teros 21.....	31
4.1.2. Teros 10.....	32
4.1.3. Teros 31.....	35
4.1.4. Teros 12.....	37
4.1.5. Teros 32.....	39
4.2. Mjerenja za kalibraciju senzora	41
4.2.1. Pokus u posudi br. 4.....	42
4.2.2. Pokus u posudi br. 3.....	47
4.2.3. Pokus u posudi br.2.....	52
4.3. Prikaz rezultata kalibracije senzora.....	56
4.3.1. Prikaz rezultata mjerenja Posude 4	56
4.3.2. Rezultati mjerenja senzora Teros 31 na dubini od $h=5$ cm i $h=10$ cm	59
4.3.3. Odnos matrična sukcija – vlažnost za ravnotežne uvjete u pokusu br. 4	66
4.3.4. Prikaz rezultata mjerenja u posudi br. 3.....	69
4.3.5. Rezultati mjerenja senzora Teros 10 na dubini od $h=5$ cm i $h=10$ cm	71
4.3.6. Odnos matrična sukcija – vlažnost za ravnotežne uvjete u posudi br.3.....	76
4.3.7. Prikaz rezultata mjerenja posude 2.....	80
4.3.8. Prikaz rezultata mjerenja senzora Teros 31 u kombinaciji s ostalim sensorima na dubini $h=5$ cm i $h=10$ cm.....	84
5. PROVEDBA POKUSA 5	87

5.1.	Fizikalni model klizišta.....	88
5.1.1.	<i>Tijek pokusa i razvoj nestabilnosti.....</i>	92
5.1.2.	<i>Grafički prikaz rezultata ispitivanja umanjenog fizikalnog modela klizišta.....</i>	96
5.1.3.	<i>Diskusija i rekonstruiranje uvjeta razine vode u modelu.....</i>	99
6.	ZAKLJUČAK.....	102
7.	LITERATURA.....	104

Popis slika

Slika 1. Shematski prikaz odronjavanja stijenske mase [3].....	16
Slika 2. Shematski prikaz prevrtanja stijenske mase [3].....	17
Slika 3. Shematski prikaz rotacijskog klizanja [3].....	18
Slika 4. Shematski prikaz translacijskog klizanja [3]	19
Slika 5. Shematski prikaz širenja tla [3]	20
Slika 6. Shematski prikaz tečenja odnosno toka materijala niz padinu [3]	21
Slika 7. shematski prikaz osnovnih elemenata klizišta [10]	21
Slika 8. Shematski prikaz opisanih elemenata klizišta [10].....	23
Slika 9. Shematski prikaz osnovnih dimenzija klizišta [10].....	24
Slika 10. Shema umanjenog statičkog modela s opremom [11].....	27
Slika 11. Simulator oborina s 4 mlaznice [12].....	28
Slika 12. Senzor Teros 21 [13]	31
Slika 13. Senzor Teros 10 [14]	33
Slika 14. Senzor Teros 31 [15]	35
Slika 15. Punjenje osovine tenziometra i senzorske jedinice [15].....	36
Slika 16. Senzor Teros 12 [16]	38
Slika 17. Senzor Teros 32 [17]	40
Slika 18. Tlocrtna dispozicija senzora u posudi br.4	43
Slika 19. Prikaz ugrađenih senzora unutar Posude 4 na visini od $h=5$ cm	47
Slika 20. Tlocrtna dispozicija senzora u posudi br.3	48
Slika 21. Prikaz ugrađenih senzora unutar Posude 3 na visini od $h=10$ cm	48
Slika 22. Tlocrtna dispozicija senzora u posudi br. 2	53
Slika 23. Rezultati mjerenja unutar posude 4	57
Slika 24. Rezultati mjerenja posude 4 - raspon temperatura	57
Slika 25. Rezultati mjerenja posude 4 – raspon tlakova	58
Slika 26. Rezultati mjerenja posude 4.....	59
Slika 27. Prikaz rezultata mjerenja posude 4 - Teros 31 i Teros 12 ($h=5$ cm).....	60
Slika 28. Prikaz rezultata mjerenja posude 4 - Teros 31 i Teros 12 ($h=5$ cm).....	61
Slika 29. Prikaz rezultata mjerenja posude 4 – Teros 31 i Teros 10 ($h=10$ cm).....	62
Slika 30. Prikaz rezultata mjerenja posude 4 - Teros 31 i Teros 10 ($h=10$ cm).....	63
Slika 31. Prikaz rezultata mjerenja posuda 4 – Teros 12 i Teros31 ($h=5$ cm i $h=10$ cm).....	64
Slika 32. Prikaz rezultata mjerenja posude 4 - Teros 21 ($h=5$ cm i $h=10$ cm).....	65
Slika 33. Saturacijska krivulja ugrađenog materijala mjeren Terosom 10 na visini $h=5$ cm i $h=10$ cm	67
Slika 34. Saturacijska krivulja ugrađenog materijala mjeren Terosom 12 na visini $h=5$ cm i $h=10$ cm	68
Slika 35. Saturacijska krivulja mjerenog materijala Terosom 10 i Terosom 12 - ($h=5$ cm i $h=10$ cm).....	69

Slika 36. Prikaz rezultata mjerenja unutar posude 3	70
Slika 37. Rezultati mjerenja posude 3 - raspon temperatura	70
Slika 38. Rezultati mjerenja posude 3 - pritisak	71
Slika 39. Prikaz rezultata mjerenja posude 3 - Teros 10 i Teros 31 (h=5 cm).....	72
Slika 40. Prikaz rezultata mjerenja posude 3 – Teros 10 i Teros 31 (h=5 cm).....	73
Slika 41. Prikaz rezultata mjerenja posude - Teros 10 i Teros 31 (h=10 cm).....	74
Slika 42. Prikaz rezultata mjerenja unutar posude 3 - Teros 21 (h=5 cm).....	75
Slika 43. Prikaz rezultata mjerenja unutar posude 3 - Teros 21 (h=10 cm).....	76
Slika 44. Saturacijska krivulja mjerenog materijala – Teros 10 na visini h=5 cm i h=10 cm	77
Slika 45. Saturacijska krivulja ugrađenog materijala - Teros 10 na visini h=5 cm i h=10 cm	78
Slika 46. Saturacijska krivulja dobivena sukladno promjenom volumena unutar posude 3 ..	79
Slika 47. Prikaz rezultata mjerenja unutar posude 2.....	80
Slika 48. Prikaz rezultata mjerenja posude 2 - raspon temperatura	81
Slika 49. Prikaz rezultata mjerenja - raspon tlakova.....	82
Slika 50. rezultati mjerenja posude 2 - Teros 31 (h=5 cm).....	83
Slika 51. Rezultati mjerenja posude 2 - Teros 31 (h=10 cm)	84
Slika 52. Prikaz rezultata mjerenja posude 2 - Teros 12 i Teros 31 (h=5 cm i h=10 cm)	85
Slika 53. Prikaz rezultata mjerenja posude 2 - Teros 10 i Teros 31 (h=5 cm i h=10 cm)	86
Slika 54. Prikaz oznake segmenata umanjenog statičkog modela klizišta [18].....	88
Slika 55. Dimenzije pleksiglas stijenki modela i otvori za drenažne elemente	89
Slika 56. Prikaz umanjenog fizikalnog modela prilikom ugradnje senzora	90
Slika 57. Umanjeni fizički model prije ispitivanja	92
Slika 58. Pojava prvih pukotina na izrađenom fizičkom modelu	93
Slika 59. Prikaz plohe sloma u pokusu 5	94
Slika 60. Prikaz rezultata ispitivanja - pojava rotacijskog klizišta u nožici modela.....	95
Slika 61. Prikaz kliznog tijela i potopljene nožice modela u pokusu 5	95
Slika 62. Shema instaliranih senzora u umanjenom fizikalnom modelu	96
Slika 63. Prikaz rezultata sadržaja vode i pritiska na L segmentu umanjenog fizikalnog modela klizišta	97
Slika 64. Prikaz rezultata sadržaja vode i pritiska na M segmentu umanjenog fizikalnog modela klizišta	98
Slika 65. Prikaz rezultata sadržaja vode i pritiska na H segmentu umanjenog fizikalnog modela klizišta	99
Slika 66. Promjena visina stupca vode unutar modela tijekom izvedbe pokusa	101

Popis tablica

Tablica 1. Osnovna svojstva pijeska i mješavine pijesak-kaolin [11]	29
Tablica 2. Osnovne specifikacije senzora Teros 21 [14]	32
Tablica 3. Osnovne specifikacije senzora Teros 10 [14]	34
Tablica 4. Osnovne specifikacije senzora Teros 31 [15]	37
Tablica 5. Osnovne specifikacije senzora Teros 12 [16]	39
Tablica 6. Osnovne specifikacije senzora Teros 32 [17]	41
Tablica 7. Podaci korišteni za dobivanje sukcijske krivulje - Teros 10 (h=5 cm).....	66
Tablica 8. Podaci korišteni za dobivanje sukcijske krivulje - Teros 10 (h=10 cm).....	66
Tablica 9. Podaci korišteni za dobivanje sukcijske krivulje - Teros 12.....	67
Tablica 10. Podaci mjerenja potrebni za dobivanje saturacijske krivulje – ugrađen Teros 10 i Teros 31	77
Tablica 11. Podaci mjerenja potrebni za dobivanje saturacijske krivulje – Teros 10 i Teros 31 – ugrađen (h=5 cm i h=10 cm).....	78
Tablica 12. Podaci mjerenja potrebni za dobivanje saturacijske krivulje zbog promjene volumena - Teros 10 i Teros 31 (h=5 cm i h=10 cm).....	79

Popis oznaka

V_{tot} – ukupni volumen materijala u posudi (m³)

V_s – volumen suhih čestica (m³)

V_v – volumen pora (m³)

m_s – masa suhih čestica (kg)

m_k – masa kaolina (kg)

m_p – masa pijeska

V_w – volumen vode (m³)

S – stupanj saturacije (%)

w – vlažnost (gravimetrijski) (%)

ρ – gustoća vode (g/cm³)

h – visina (cm)

p_{wp} – porni pritisci (kPa)

θ – volumetrijski sadržaj vode (m³/m³)

φ – kut trenja (°)

t – vrijeme (min)

1. UVOD

S obzirom da klizišta pripadaju najvažnijim, najopasnijim i potom najčešćim geohazardima, pažnja tijekom izrade diplomskog rada posvećena je upravo njima. Njihovo razmatranje nije moguće ukoliko se ne promotre svi mogući rizici te karakteristike materijala. Poremećaji unutar kosine mogu biti različiti te mogu uzrokovati različite nestabilnosti kosine.

Kako bi se razumjele pojave klizanja u nastavku diplomskog rada obrađen je umanjeni fizikalni modeli kosina, u kombinaciji s odgovarajućom opremom za monitoring hidrotehničkog odziva. Isti procesi pružaju uvid u procese koji dovode do pojave nestabilnosti te omogućavaju precizno proučavanje varijabli koje uzrokuju nastanak klizišta. Tijekom provedbe pokusa pratila se promjena vlažnosti i pornih pritisaka u modelima koristeći se odgovarajućom opremom. Promjene u tlu bilježit će se sensorima koji će podatke prikupljati svake minute. Time će se dobiti uvid u promjene vode i pornih pritisaka u tlu.

Provedba pokusa razjasnit će problematiku pojava nestabilnosti u tlu te će se pomnije uči u način rada pojedinih senzora. Detaljnije će se prikazati njihove tehničke karakteristike. Također, provest će se i kalibracija mjerenja u materijalu iz kojeg su izrađeni umanjeni modeli klizišta za različite uvjete vlažnosti ili saturacije. Važno je napomenuti kako su značajke materijala vrlo bitne pri provedbi pokusa te će se u nastavku i njima posvetiti određeni udio diplomskog rada.

S obzirom na cjelokupnu problematiku stabilnosti kosina i njeno razumijevanje potrebno je znati neke osnovne činjenice i značajke te će se sukladno tome objasniti pojam klizišta, njegove osnovne komponente i dimenzije te osnovna podjela svih tipova nestabilnosti kao i osnovna klasifikacija.

U konačnici prikazat će se podaci prikupljeni u provedenim pokusima te će se rekonstruirati uvjeti koji dovode do pojave sloma umanjenog modela kosine izloženog određenim uvjetima simulirane oborine. Svaki prikupljeni podatak te njegova pravovaljana obrada može se iskoristiti za razumijevanje problematike pri pojavi stvarnih fizikalnih procesa u prirodi. Osim razumijevanja pri pojavi nestabilnosti u kosinama, na temelju

dobivenih i obrađenih rezultata može se pravovremeno reagirati upotrebom valjane mjere sanacije što će utjecati na brzinu ljudske reakcije pri korištenju, ugradnji i projektiranju sanacije.

2. KLIZIŠTA

Problem nestabilnosti prirodnih i umjetnih kosina predstavljaju jedan od glavnih problema u području geotehničkog inženjerstva. Također, važno je reći kako problem nestabilnosti nije moguće razmatrati bez provjere i promatranja svih mogućih uzorka i pojava nestabilnosti predmetne kosine. Tako se pojam nestabilnosti na kosini najčešće veže s pojavom klizišta.

Klizište se prema Varnesu (1978.) definira kao svaki pomak stijenske mase, nevezanog ili vezanog tla niz kosinu [1]. Poremećaj unutar kosina uzrokuju različiti čimbenici, prirodni, ljudski ili kombinirani odnosno geološki i antropološki uvjeti. Geološkim uvjetima se pripisuju tektonski procesi, gravitacijske i hidrodinamičke sile te seizmička pobuda, dok se antropološkim uvjetima pri pojavi nestabilnosti pripisuju iskopi i nasipi, različita opterećenja građevina, promjena režima podzemnih voda te promjena namjene zemljišta. [2]

Saturacija tla vodom je općenito primaran uzrok aktivacije klizišta te se ono može aktivirati uslijed intezivnih oborina, porasta razine vode zbog otapanja snijega što zajedno djeluje na promjenu razine podzemnih voda. Može se reći kako su poplave i klizišta iz tog razloga usko povezana. [3]

Klizišta koja nastaju zbog velikog inteziteta oborina, koje uzrokuju promjenu u razini podzemne vode smatraju se jednim od opasnijih pojava jer se klizanje u tom trenutku dogode vrlo brzo te mogu izazvati enormne štete. Klizišta mogu nastati na bilo kojem terenu te bilo gdje na svijetu što ovisi o uzroku odnosno gore navedenim čimbenicima i regionalnim te lokalnim uvjetima. [4]

Poremećaj prirodne ravnoteže unutar kosine, dovodi do pada čvrstoće odnosno povećanja destabilizirajućih sila u tlu što dovodi do pojave klizanje na plohi sloma. Klizanje će trajati do trenutka ponovne uspostave ravnoteže unutar kosine. [5]

2.1. Tipovi nestabilnosti unutar koherentnog i nekoherentnog materijala

Tijekom povijesti izrađivale su se različite klasifikacije kojima bi se pojam nestabilnosti u kosinama obuhvatio u jednu cjelinu. Danas se najčešće koriste dvije vrste klasifikacije, jedna od njih je klasifikacija prema Hutchinsonu (god), a druga je prema Varnesu (god). Naime, oba autora koriste tip pomaka kao osnovu za definiranje glavnih grupa nestabilnosti. Razlike pri određivanju statusa nestabilnosti su pojave na određenoj plohi sloma koje u nastavku većinu pomaka dosegnu tečenjem pokrenutog materijala. Varnesova klasifikacija nestabilnosti puno je jednostavnija za primjenu i korištenje, dok je Hutchinsonova klasifikacija namijenjena inženjerskoj primjeni vezanoj uz različite analize stabilnosti kosina. S obzirom da je Varnesova klasifikacija nešto jednostavnija, tipovi nestabilnosti dijele se na:

1. Odron
2. Prevrtnje
3. Klizanje
4. Širenja tla
5. Tok

Odroni se opisuju kao odvajanje stijenske mase sa strmih kosina po površini na kojoj u većini slučajeva nema smicanja već dolazi do pojave prevrtanja ili slobodnog pada s kosine što je prikazano na Slici 1.

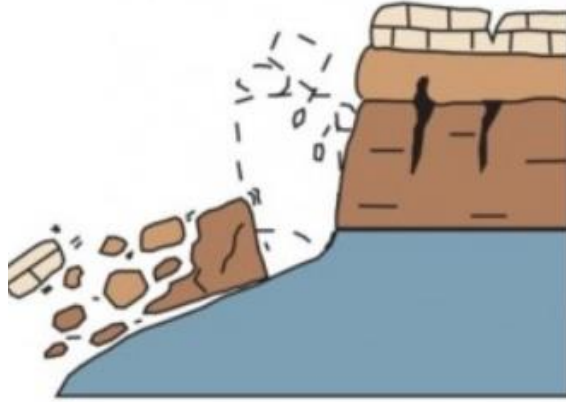


Slika 1. Shematski prikaz odronjavanja stijenske mase [3]

Odroni su uglavnom uzrokovani različitim prirodnim silama kao što su veliki intenziteti oborina, erozija ili pak seizmički procesi. Jaki vjetrovi te rušenje stabala također mogu prouzrokovati pokretanje stijenskog bloka kao i korijenje drveća koji svojim širenjem mogu proširiti postojeće diskontinuitete i time odvojiti stijensku masu od cjeline. Tako jednom pokrenuti blok osim što može pokrenuti i druge nestabilne blokove, zbog određene konfiguracije terena kretat će se duž padine te će u nožici imati najveću energiju što može uzrokovati vrlo neugodne posljedice. [6]

Danas, različitim simulacijama (numeričkim metodama) moguće je procijeniti putanju i energiju udara bloka što uvelike pomaže pri projektiranju prema čemu se može odrediti prigodna i adekvatna zaštita od odrona na određenim mikro ili makro lokacijama. [6]

Prevrtnje se definira kao rotacija odvojene mase oko osi koja se nalazi u nožici. Prevrtnje u većini slučajeva može prethoditi ili slijediti nakon odronjavanja ili klizanja. Proces prevrtanja prikazan je na Slici 2.



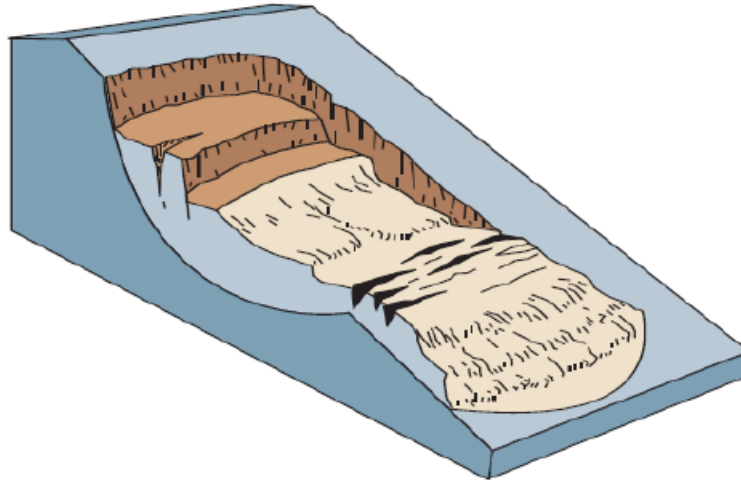
Slika 2. Shematski prikaz prevrtanja stijenske mase [3]

Prevrtanje uglavnom nastaje na stijenskim masama gdje su diskontinuiteti uglavnom paralelni s pružanjem kosine u vrlo strmom i suprotnom nagibu od nagiba same kosine. Ovakvi sustavi diskontinuiteta tvore nestabilne stupove u sklopu stijenske mase. [7]

Klizanje se definira kretanjem manje ili veće količine vezanog ili nevezanog materijala niz kosinu prema jasno definiranoj kliznoj plohi ili plohi sloma. Prvotni znakovi gibanja tla mogu se prepoznati prema pojavi glavne vlačne pukotine. Klizanje se s obzirom na geometriju klizne plohe može podijeliti na:

- Rotacijsko klizanje,
- Translacijsko klizanje,
- Blokovsko klizanje. [2]

Pri nastanku rotacijskog klizanja klizna ploha zakrivljena je prema gore te se klizanje odvija rotacijom oko osi koja je paralelna s konturom same kosine što je ujedno prikazano Slikom 3.

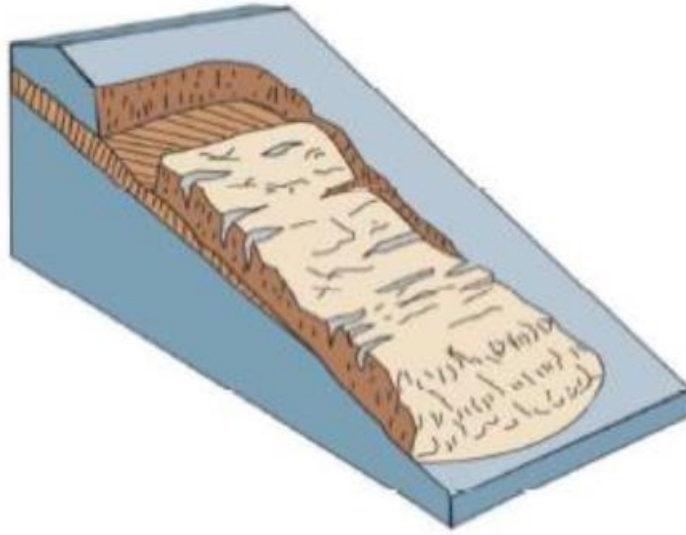


Slika 3. Shematski prikaz rotacijskog klizanja [3]

Rotacijsko klizanje može uzrokovati promjena razine podzemnih voda što može izazvati eroziju na dnu kosine. [3]

Translacijsko klizanje prikazano na Slici 4. jedna je od najčešćih pojava klizanja u svijetu. Klizna masa kod ovog načina klizanja kreće se prema van i prema dolje uzduž ravne površine s malo rotacijskog kretanja ili nagiba prema natrag. Ovaj način klizanja može napredovati u znatnim udaljenostima, ukoliko je ploha sloma dovoljno nagnuta. Također, može se napomenuti kako je translacijsko u odnosu na rotacijsko klizanje puno pliće. Ploha sloma translacijskog klizanja opisuje se omjerom koji je manji od vrijednosti koja iznosi 0,1. Materijal kliznog tijela može se sastojati od nekonsolidiranih, rastresitih tala pa do opsežnih kamenih blokova.

Translacijsko klizanje obično se pojavljuje duž geoloških diskontinuiteta odnosno spojeva prema čemu se razlikuju rasjedi, kontakti između tala i stijena i dr. Uzroci pojave translacijskog klizanja mogu se prepisati već navedenim uzrocima pojave rotacijskog klizanja opisanih u nekoliko odlomaka ranije. [3]



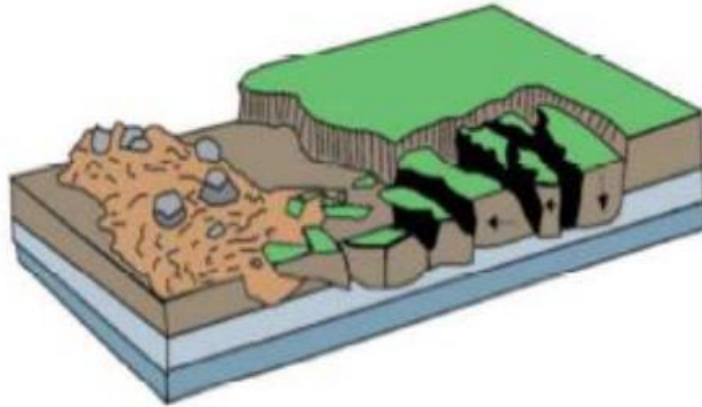
Slika 4. Shematski prikaz translacijskog klizanja [3]

Klizišta se obično klasificiraju prema njihovoj aktivnosti. Aktivnost klizišta obuhvaća stanje aktivnosti koje opisuje vrijeme u kojem se odvija aktivnost, njihovu distribuciju aktivnosti opisuje smjer kretanja klizišta dok stil aktivnosti klizišta ukazuje na tip ili kombinaciju tipova kretanja. U nastavku su ukratko opisana stanja klizišta:

- Aktivno klizište – klizište koje je trenutno u pokretu,
- Reaktivirano klizište – nekad aktivno klizište koje je postalo neaktivno i ponovo se aktiviralo
- Trenutno neaktivno klizište – klizište koje je bilo aktivno u posljednjih 12 mjeseci, no trenutno nije aktivno
- Neaktivno klizište – klizište koje nije aktivno u posljednjih 12 mjeseci te se ona dodatno dijele na privremeno umirena, trajno umirena, stabilizirana i reliktna odnosno fosilna klizišta. [1]

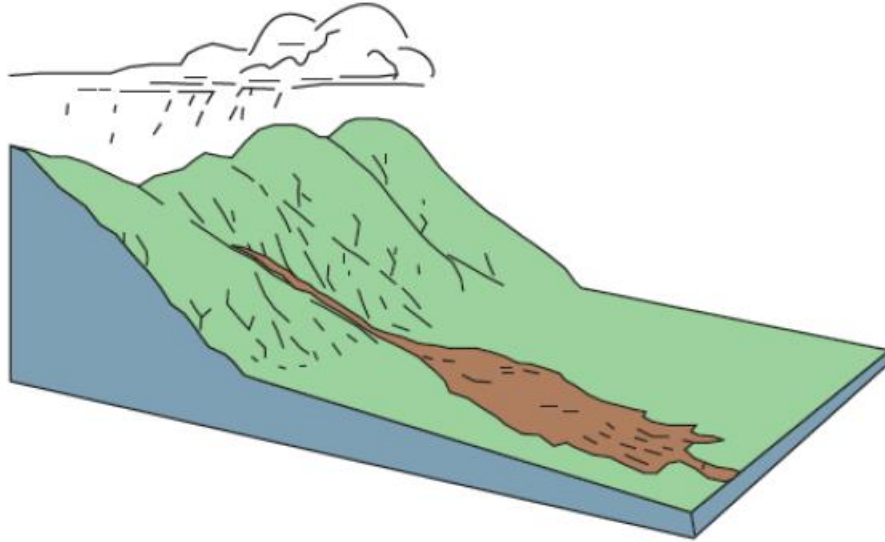
Širenjem tla opisuje se bočno razmicanje tla uslijed kojeg nastaju smičuće i vlačne pukotine. U pravilu širenje tla nastaje pomicanjem dijelova tla boljih karakteristika po nekoj mekšoj podlozi što je prikazano na Slici 5 [3]. Širenje tla obično nastaje likvefakcijom – pojava nekog oblika opterećenja na rahli materijal koji ima tendenciju

smanjenja volumena odnosno zbijanja i nemogućnost dreniranja vode koja se nalazi u porama pri čemu dolazi do prirasta poreznih pritisaka. [8]



Slika 5. Shematski prikaz širenja tla [3]

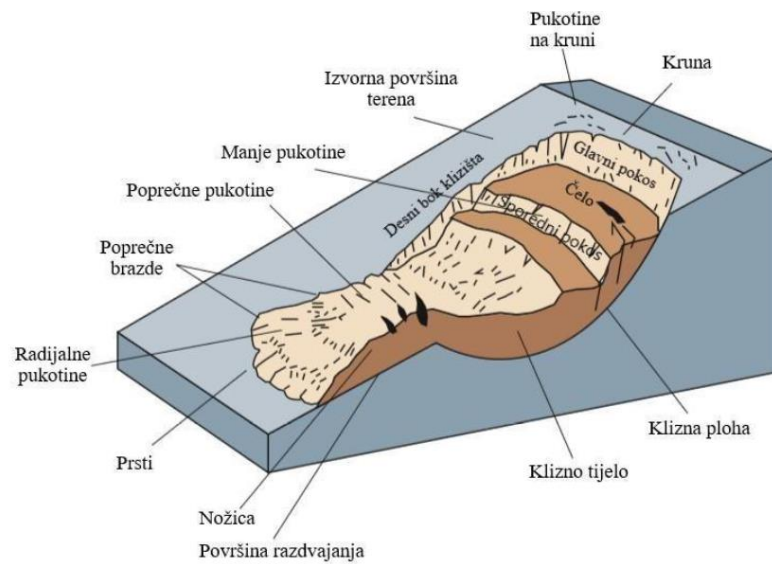
Tok ili tečenje tla, prikazan na Slici 6, događa se sa znatnim varijacijama brzine, granulometrijskog sastava i sadržaja vode. Tok obično započinje procesom klizanja, odrona ili prevrtanja na strmim padinama pri čemu dolazi do naglog gubitka kohezije unutar pokrenutog materijala. Slikovitije se opisuje kao mješavina sedimenta i vode čija je brzina kretanja slična kretanju viskozne tekućine koja se zbog utjecaja gravitacije kreće niz padinu. [9]



Slika 6. Shematski prikaz tečenja odnosno toka materijala niz padinu [3]

2.2. Značajke i geometrija klizišta

Kako bi se nestabilnost odnosno klizište opisalo nužno je utvrditi nomenklaturu za opisive značajke kliznog tijela kao i metode za utvrđivanje dimenzija i geometrije klizišta. Osnovni elementi klizišta prikazani su na slici 7. [3]



Slika 7. shematski prikaz osnovnih elemenata klizišta [10]

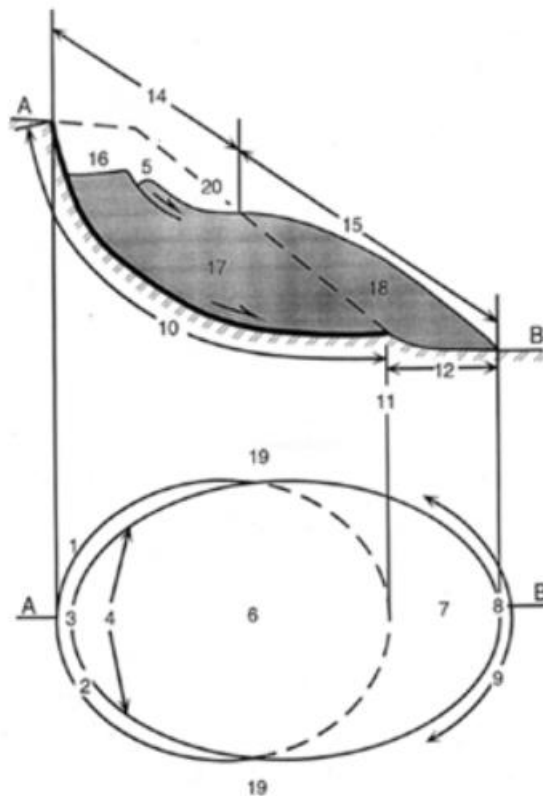
2.2.1. Definicije elemenata i dimenzija klizišta

Na osnovi poznatog oblika klizišta, njegovih elemenata i dimenzija moguće je procijeniti ukupni volumen pokrenutog materijala. Poznat volumen pokrenutog materijala obično se koristi pri odabiru referentne mjere sanacije i njegovom projektiranju. [10]

Elementi klizišta koji se mogu prepoznati na slici 8 su sljedeći:

1. Kruna klizišta – nepokrenuti materijal uz najviši dio iznad vlačne pukotine; ili ,
2. Glavna vlačna pukotina – vidljivi vrh klizne plohe u neporemećenom tlu u gornjem dijelu klizišta otvorene kretanjem klizne mase niz padinu
3. Vrh klizišta – najviša točka kontakta između pokrenute klizne mase i glavne vlačne pukotine
4. Čelo klizišta – gornji dio kliznog tijela uz kontakt pokrenute klizne mase i glavne vlačne pukotine
5. Donja vlačna pukotina – vlačna pukotina u pokrenutom materijalu klizišta nastala pomacima unutar pokrenute klizne mase
6. Glavno klizno tijelo – dio pokrenutog materijala klizišta koji prekriva kliznu plohu između glavne vlačne pukotine i završetka klizne plohe
7. Stopa - podnožje klizišta, pokrenut dalje od završetka klizne plohe i naliježe direktno na izvornu površinu terena
8. Dno klizišta – najudaljenija točka u nožici klizišta
9. Nožica – završetak klizišta, donji rub pokrenutog materijala klizišta, opisuje ga zakrivljeni oblik koji je najudaljeniji od glavne vlačne pukotine
10. Klizna ploha – ploha sloma koja predstavlja donju granicu pokrenutog materijala te se nalazi ispod izvorne površine terena
11. Nožica klizne plohe – presječnica između donjeg dijela klizne plohe i izvorne površine terena
12. Ploha separacije – dio izvorne površine terena prekriven stopom klizišta
13. Pokrenuti materijal – pomaknuti materijal klizanjem iz svog prvobitnog položaja, pokrenuti materijal sastoji se od usjednute mase i akumulacije
14. Zona usjednutog materijala – područje klizišta unutar pokrenutog materijala koje se niže od izvorne površine terena

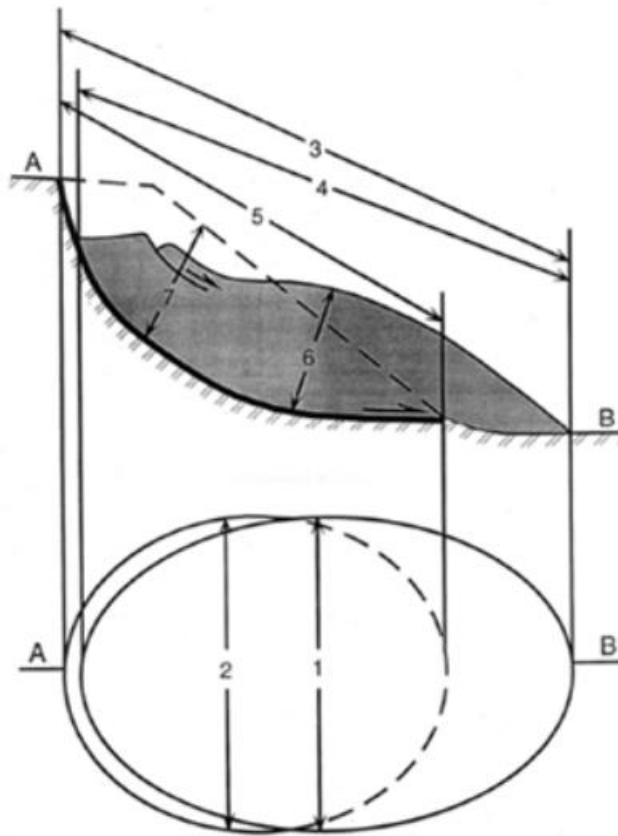
15. Zona akumulacije – područje klizišta unutar pokrenutog materijala koje je više od izvorne površine terena
16. Usjedanje – volumen ograničen glavnom vlačnom pukotinom, usjednutom masom i izvornom površinom terena
17. Usjednuta masa – volumen pokrenutog materijala koji leži na kliznoj plohi ispod površine terena
18. Akumulacija – volumen pokrenutog materijala koji leži iznad izvorne površine terena
19. Bok – nepokrenuti materijal uz bočni dio plohe sloma, određivanje lijevog i desnog boka izvodi se gledajući od gornjeg dijela klizišta
20. Izvorna površina terena – površina kosine koja je postojala prije nego li je došlo do klizanja [10]



Slika 8. Shematski prikaz opisanih elemenata klizišta [10]

Osnovne dimenzije klizišta opisane su Slikom 9 te se one sastoje od:

1. Širina pokrenute mase – maksimalna širina pokrenute mase
2. Širina plohe sloma – maksimalna udaljenost između bokova klizišta
3. Ukupna duljina klizišta – maksimalna udaljenost od krune klizišta do dna klizišta
4. Duljina pokrenute mase – maksimalna udaljenost od vrha do dna klizišta
5. Duljina plohe sloma – maksimalna udaljenost od krune klizišta do završetka plohe sloma
6. Dubina pokrenute mase – maksimalna dubina pokrenute mase mjerena okomito na ravninu širine i duljine klizišta
7. Dubina klizne plohe – maksimalna dubina plohe sloma mjerena od originalne površine terena okomito na ravninu koju definiraju širina plohe sloma i duljina plohe sloma. [10]



Slika 9. Shematski prikaz osnovnih dimenzija klizišta [10]

2.2.2. *Procesi klizanja*

Prema klasifikaciji koju je predložio Varnes (1978) procesi klizanja opisani su kao pomaci mase uključeni u kontinuirani slijed događaja od uzroka do posljedica. Također, Varnes (1978) opisuje tri osnovna tipa procesa, odnosno događaja koji uzrokuju klizanje:

- Porast posmičnih naprežanja u kosini
- Niska čvrstoća materijala
- Smanjenje čvrstoće materijala.

Porast posmičnih naprežanja uzrokuje uklanjanje oslonca u nožici kosine, nametanje većih opterećenja, prometna i pokretna opterećenja te izdizanje ili nagnjanje. Nisku čvrstoću materijala karakteriziraju materijalne karakteristike prirodno slabih materijala ili materijala koji postaju slabi uslijed procesa u tlu pri čemu se mogu izdvojiti saturacija, kemijsko trošenje, promjene u senzitivnim materijalima i dr. Također, nisku čvrstoću materijala može uzrokovati različita karakteristika mase odnosno rasjedi, diskontinuiteti, slojevitost, folijacija, smicanje dok smanjenje posmične čvrstoće uzrokuje hidratacija glina – smanjenje kohezije, sušenje u raspucalim glinama, kationska zamjena na mineralima glina, promjena električnog potencijala, temperaturne promjene u stijenskoj masi, isušivanje vode iz pukotina u stijenskoj masi, kišovito i vlažno vrijeme pri čemu se čestice cementiraju u pukotinama u stijenskoj masi te saturacija vodom pri čemu se razbijaju kapilarne sile. [1]

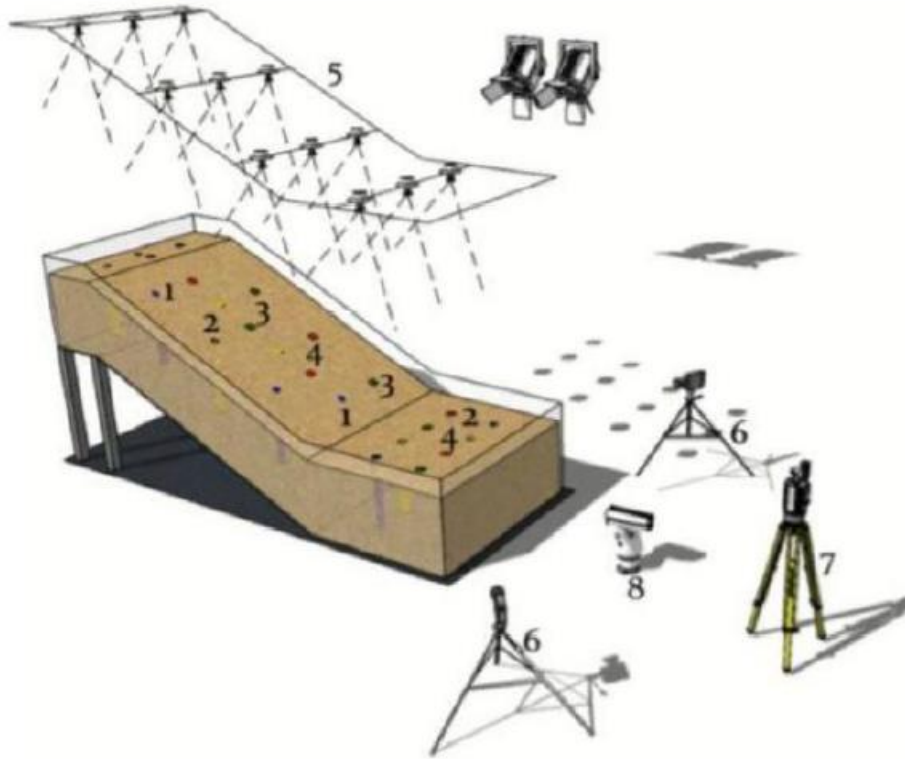
3. FIZIČKO MODELIRANJE PONAŠANJA KONSTRUKCIJA ZA SANACIJU KLIZIŠTA U UVJETIMA STATIČKIH I SEIZMIČKIH DJELOVANJA

Fizičko modeliranje klizišta na temelju ponašanja umanjenih modela klizišta započelo je 1970-ih godina u Japanu korištenjem skaliranih prirodnih kosina kao fizičkih modela. Njihova glavna uloga u posljednjih 25 godina bilo je istraživanje pokretanja, gibanja i akumulacije brzih klizišta uzrokovanih infiltracijom vode u kosinu. Tijekom 2018. godine na Građevinskom fakultetu u Rijeci započeo je četverogodišnji istraživački projekt naslovljen kao i ovo poglavlje. Projekt je financiran od Hrvatske zaklade za znanost te je njegov cilj modeliranje ponašanja sanacijskih konstrukcija u fizičkim modelima umanjenih klizišta u statičkim uvjetima (klizišta izazvana oborinama) i seizmičkim uvjetima (klizišta izazvana potresom). Budući da se glavni pokretači klizišta mogu podijeliti u dvije skupine – oborine i potresi, projektirana su dva fizička modela umanjenih klizišta na temelju njihovih pokretača. [11]

Promatranje pokretanja i daljnjeg razvitka klizišta u fizičkom modelu provodi se pomoću instalirane senzorske mreže za mjerenje pomaka, vlažnosti tla, pornih pritisaka i pritisaka unutar tijela klizišta. Platforma pomoću koje se provode ispitivanja u statičkim uvjetima sastoji se od čelične baze s prozirnim pleksiglas stranicama tlocrtnih dimenzija 2,30x1,00 m i leži na radnom stolu. Maksimalna visina materijala tla u modelu je 30 cm. Nagib kosine može se podešavati od 20° do 45° ovisno o vrsti materijala koji se ugrađuje u model. Kako bi se spriječilo klizanje mase tla na kontaktu s podlogom modela, na dno podloge je postavljena geomreža. Prema sljedećoj fotografiji (slika 10) označeni su mjerni uređaji koji se koriste pri izvedbi umanjenog statičkog modela koji se inicira simuliranom oborinom:

1. Tenziometri
2. Mjerači pornog pritiska
3. Mjerne trake
4. Akcelerometri
5. Simulator oborina
6. High speed kamere

7. TLS
8. Infracrvena kamera



Slika 10. Shema umanjenog statičkog modela s opremom [11]

3.1. Materijali i metode

Za izvođenje pokusa u model je ugrađen pjeskoviti materijal odnosno dobro graduiran dravski riječi pijesak granulacije od 0 do 1,0 mm. Materijal koji se ugradio ima određene karakteristike te njegova relativna gustoća (D_r) iznosi 0,5, koeficijent pora ϵ iznosi 0,78 dok specifična gravitacija čestica (G_s) iznosi 2,7.

Monitoring sustav uspostavljen u modelu slijedi principe monitoringa stvarnih klizišta te se sastoji od geodetskog i geotehničkog sustava monitoringa. Geodetski monitoring temelji se na fotogrametrijskoj opremi za multi-temporalnu analizu klizišta iz niza stereo slika

dobivenih parom high speed kamera. Terestrički laserski skener (TLS) i fotogrametrijsko snimanje omogućili su vrlo precizno utvrđivanje 3D površine klizišta i digitalnog modela visoke rezolucije modela klizišta prije i poslije klizanja. Geotehnički monitoring čini kompleksna mreža minijaturnih senzora ekvivalentnih sensorima korištenim na terenu za monitoring realnih klizišta. Ugrađeni senzori imaju mogućnost praćenja pomaka, vlažnosti i pornih pritisaka, pritisaka tla i kontaktnih sila te sukcije u tlu.

Simulator oborina (slika 11) novina je pri praćenju kontrole intenziteta umjetno izazvanih oborina. Simulator oborina te njegova izrada potrebna je iz razloga što postoji mogućnost prilagodbe simulacije oborine koja je karakteristična za određeno područje, u ovom slučaju, intenzitet oborina i pojavu kiše u Hrvatskoj. Simulator oborina je sustav koji se sastoji od 3 grane sprinklera s 4 različite mlaznice na svakoj. Intenzitet koji se može postići s radom mlaznica iznosi 30 do 150 mm/h, dok maksimalan protok iznosi preko 600 mm/sat koristeći sve 4 mlaznice na svakoj grani. [12]



Slika 11. Simulator oborina s 4 mlaznice [12]

U nastavku diplomskog rada detaljnije će se obraditi jedan od provedenih pokusa prema gore opisanom umanjenom statičkom modelu klizišta. Detaljnije će se prikazati prikupljeni podaci tijekom provedbe pokusa sa različitih uređaja (Teros 10, Teros 12, Teros 31 i Teros 21). Senzori su tijekom provedbe pokusa prikupljali podatke o temperaturi u materijalu i okolini u kojoj su ugrađeni, tlakove, porne pritiske i vlažnost. Ideja ovog diplomskog rada proizlazi iz fizičkog modeliranja ponašanja konstrukcija za sanaciju klizišta u uvjetima statičkih djelovanja gdje se tijekom dugotrajnijeg praćenja i promatranja utvrđuje ponašanje materijala s obzirom na njegovu zbijenost, postotak saturacije ili vlažnosti. U

ovom slučaju saturacija je jedan od većih faktora koji uzrokuje pojavu nestabilnosti kosine. Visok stupanj saturacije dovodi do pojave destabilizirajućih sila koje u konačnici dovode do pojave klizne plohe i sloma unutar kosine. Također, važno je napomenuti kako se detaljnije ulazi u principe rada senzora ugrađenih unutar modela u potpuno laboratorijskim uvjetima.

4. SENZORI ZA MJERENJE VLAŽNOSTI I PORNIH PRITISAKA U MODELU

Pri izradi laboratorijskih uzoraka za provedbu pokusa korišten je dravski pijesak čije su osnovne značajke opisane unutar prethodnog poglavlja 3.1. Osim dravskog pijeska koristio se i kaolin čiji udio iznosi 10% na ukupnu određenu masu dravskog pijeska. U tablici 1 dane su osnovne značajke dravskog pijeska i mješavine pijesak-kaolin (10%) korištenih pri izradi umanjenih modela. [11]

Tablica 1. Osnovna svojstva pijeska i mješavine pijesak-kaolin [11]

PARAMETAR	DRAVSKI PIJESAK	PIJESAK-KAOLIN (UDIO KAOLINA IZNOSI 10%)
SPECIFIČNA TEŽINA, G_s	2,70	2,69
SUHA GUSTOĆA, ρ_d (g/cm ³)	1,52	1,43
UKUPNA GUSTOĆA ρ_t (g/cm ³)	1,55	1,50
EFEKTIVNA VELIČINA ČESTICA		
D_{10} (mm)	0,19	0,038
D_{60} (mm)	0,37	0,31
KOEFICIJENT JEDNOLIKOSTI, c_u	1,947	8,160
MINIMALNI OMJER ŠUPLJINA, e_{min}	0,641	0,647
MAKSIMALNI OMJER ŠUPLJINA, e_{max}	0,911	1,121
HUDRAULIČNI KONDUKTIVITET, k_s (m/s)	1,00E-05	6,78E-06
KUT TRENJA, ϕ (°)	34,90	31,30
KOHEZIJA, c (kPa)	0,00	3,90
POČETNI POROZITET, n_i	0,44	0,469
POČETNI OMJER ŠUPLJINA, e_i	0,78	0,884
POČETNA RELATIVNA GUSTOĆA, D_{ri}	0,50	0,50
POČETNA VLAŽNOST, w_i (%)	2,00	5,00

S obzirom na značajke korištenih materijala u svrhu izrade diplomskog rada izvedena su tri pokusa u svrhu kalibriranja senzora u materijalu koji se koriste za izgradnju umanjenih modela klizišta. Kutije unutar kojih je ugrađen materijal su različitog postotka vlažnosti i/ili saturacije čije su promjene mjerene sensorima i evidentirane u bazu podataka korištenog računala. Korišteni senzori razlikuju se prema načinu rada odnosno prikupljanja podataka iz okoline unutar koje su instalirani. S obzirom na provedene pokuse odvijene u tri slijeda, senzori su se koristili u različitim kombinacijama u međuslojevima materijala koji se ugrađivao unutar svake kutije. Pri odvijanju pokusa korišteni su sljedeći senzori:

- Teros 21 – mjeri vrijednosti matrične sukcije (negativnih pornih pritisaka) i temperaturu u tlu,
- Teros 10 – mjeri vlažnost (volumetrijsku) tla,
- Teros 31 – mjeri porne pritiske (pozitivne i negativne) i temperaturu u tlu,
- Teros 12 – mjeri električni konduktivitet, temperaturu i vlažnost (volumetrijski) tla.

Uz navedene senzore koji su se koristili pri kalibracijskim mjerenjima, mjerni uređaj Teros 32 je dodatni uređaj koji omogućava mjerenje pornih pritisaka i temperature u tlu, koji se koristio pri izradi i mjerenju umanjenog fizikalnog modela klizišta ispitivanog u statičkim uvjetima osiguranih u laboratoriju. [11]

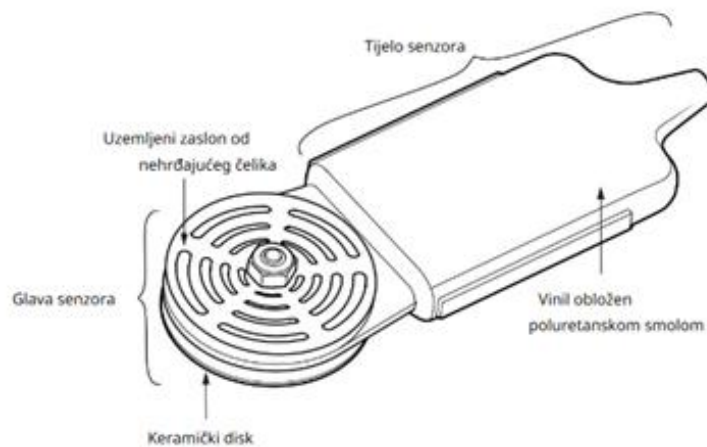
4.1. Princip rada i osnovne značajke senzora

U nastavku se prikazuju osnovne značajke senzora korištenih za praćenje promjena vlažnosti i pornih pritisaka u modelu tijekom pokusa. Senzori su ugrađivani paralelno s ugradnjom materijala i zatrpavani neposredno nakon ugradnje. Nakon ugradnje senzora isti se povezuju na uređaje (data loggere) pomoću kojih se, uz odgovarajući softver, informacije prikupljaju i pohranjuju. Senzori su proizvedeni od renomiranih proizvođača te se u ovom slučaju govori o Meter grupi.

4.1.1. Teros 21

Senzor Teros 21, prikazan na slici 12, mjeri promjene sadržaja vlage na dvjema poroznim keramičkim pločicama smještenim između zaslona od nehrđajućeg čelika. Teros 21 namijenjen je za mjerenje potencijala vode što znači da nisu osjetljivi na poremećaje u tlu. Kako bi senzor ispravno radio i pri tome prikupljao i pohranjivao relativno točne podatke važno je da se pri ugradnji ostvari dobar hidraulični kontakt s okolnim tlom. [13]

Senzor implementira tehniku mjerenja dielektrične permitivnosti čvrste matrice uz pomoć poroznih keramičkih pločica koje izmjereni sadržaj vode pretvaraju u potencijal vode pomoću poznate krivulje retencije vode keramičkih diskova. Osim mjerenja potencijala vode, Teros 21 koristi i površinski termistor pomoću kojeg se očitavaju i temperature. [13]



Slika 12. Senzor Teros 21 [13]

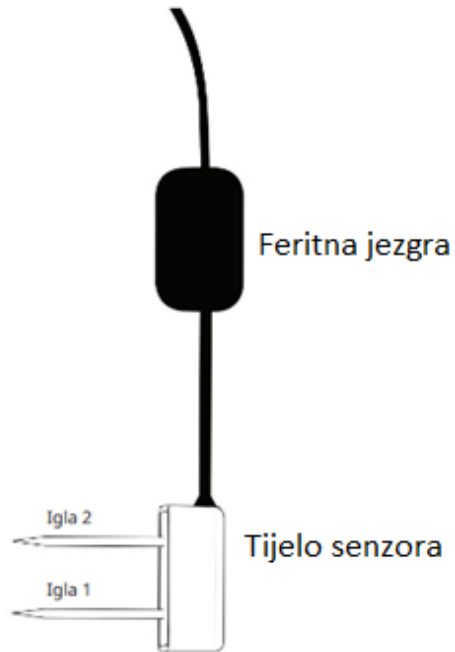
Senzor je kalibriran u zasićenom stanju (0 kPa) te zračno suhom stanju (100 000 kPa) te na tri kalibracijske točke u rasponu od 0 do 100 kPa, što u konačnici rezultira s točnošću u iznosu od +/- 10% očitavanja na što se dodaje još 2 kPa u rasponu od -9 do -100 kPa. Općenite laboratorijske procjene pokazale su dobru točnosti i nisku varijabilnost senzora. U nastavku dana je tablica 2 s osnovnim specifikacijama senzora. [13]

Tablica 2. Osnovne specifikacije senzora Teros 21 [14]

TEROS 21	
VODENI POTENCIJAL	
Raspon:	od 9 do 100 000 kPa
Rezolucija:	0,1 kPa
Točnost:	'+/- 10% očitavanja + 2 kPa od -9 do -100 kPa
TEMPERATURA	
Raspon:	40 do 60 °C
Rezolucija:	0,1 °C
Točnost:	'+/- 1 °C
FIZIČKE SPECIFIKACIJE	
Dimenzije:	9,60x3,50x1,50 cm
Promjer:	3,20 cm
Frekvencija dielektričnog mjerenja:	70 MHz
Vrijeme mjerenja:	150 ms
Vrste konektora:	3,50 mm stereo utični konektor

4.1.2. Teros 10

Senzor Teros 10 prikazan na slici 13. dizajniran je prvenstveno za ugradnju u mineralna tla. Njegova uloga je mjeriti volumetrijski sadržaj vode u tlu pomoću dviju igala izrađenih od nehrđajućeg čelika. Njegova feritna jezgra postavljena na kabel senzora iznosi 7,60 cm od glave senzora čija je uloga prvenstveno izolirati senzor od bilo kakvih smetnji u sustavu. Time se ublažava svaki potencijalni šum sustava na izmjerenim podacima senzora. [14]



Slika 13. Senzor Teros 10 [14]

Teros 10 pri radu koristi elektromagnetsko polje za mjerenje relativne dielektrične permitivnosti unutar medija u kojem je instaliran. U nastavku tablicom 3 prikazane su specifikacije mjerenja, komunikacije i fizičke specifikacije Terosa 10. [14]

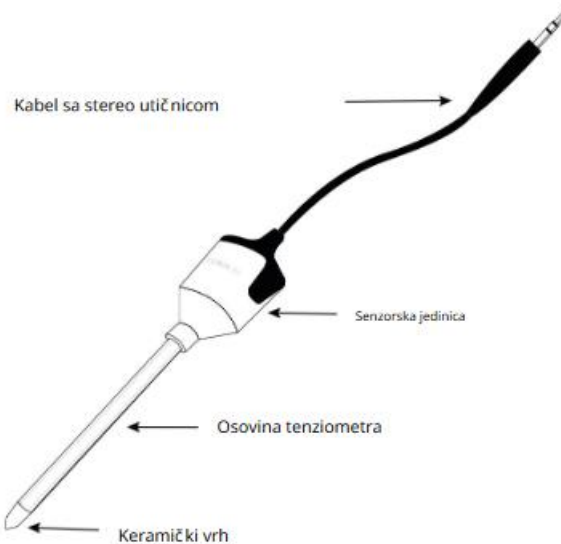
Tablica 3. Osnovne specifikacije senzora Teros 10 [14]

TEROS 10	
SPECIFIKACIJE MJERENJA	
<i>Volumetrijski sadržaj vode</i>	
Raspon	
Kalibracija mineralnog tla:	0,00-0,64 m ³ / m ³
Mediji bez tla kalibriranje:	0,0-0,7 m ³ / m ³
Prividna dielektrična permitivnost:	1 (zrak) do 80 (voda)
Točnost	
Kalibracija mineralnog tla:	'+/-0,03 m ³ / m ³
Kalibracija medija bez prljavštine:	'+/-0,05 m ³ / m ³
Srednja specifična kalibracija:	'+/-0,01-0,02 m ³ / m ³
Prividna dielektrična permitivnost:	1-40 (raspon tla), 40-80, 15% mjerenja
Frekvencija dielektričnog mjerenja:	70 MHz
SPECIFIKACIJE KOMUNIKACIJE	
Izlaz:	1000-2500 mV
FIZIČKE SPECIFIKACIJE	
Dimenzije	
Duljina:	5,10 cm
Širina:	2,40 cm
Visina:	7,50 cm
Duljina igle:	5,40 cm
Vrsta konektora:	Stereo utični konektor
Promjer konektora:	3,50 mm

Pri ugradnji senzora u tlo, važno je voditi računa o ispravnoj orijentaciji senzora. Teros 10 može se postaviti u bilo kojem smjeru, no s tijelom u okomitom položaju (kao što je prikazano na slici 13) manja su ograničenja protoka vode. Okomit položaj ugradnje omogućuje integraciju većeg volumena tla po dubini prilikom mjerenja vlažnosti, dok vodoravan položaj senzora omogućuje mjerenja na diskretnoj dubini. [14]

4.1.3. Teros 31

Senzor Teros 31 (slika 14) prvenstveno je dizajniran za laboratorijsku primjenu, poput mjerenja u posudama ili na stupcima tla različitih visina, laboratorijske lizimetre i točkasta mjerenja. Njegova aktivna površina iznosi $0,5 \text{ cm}^2$ a promjer 5 mm. Zbog malih dimenzija keramičkog vrha prilikom ugradnje senzora se ne uzrokuju značajnija poremećenja u tlu. Teros 31 se pri ugradnji može staviti u bilo koji položaj, a mjerenja i prikupljanja podataka bit će jednoliki i uravnoteženi u svim pozicijama. [15]

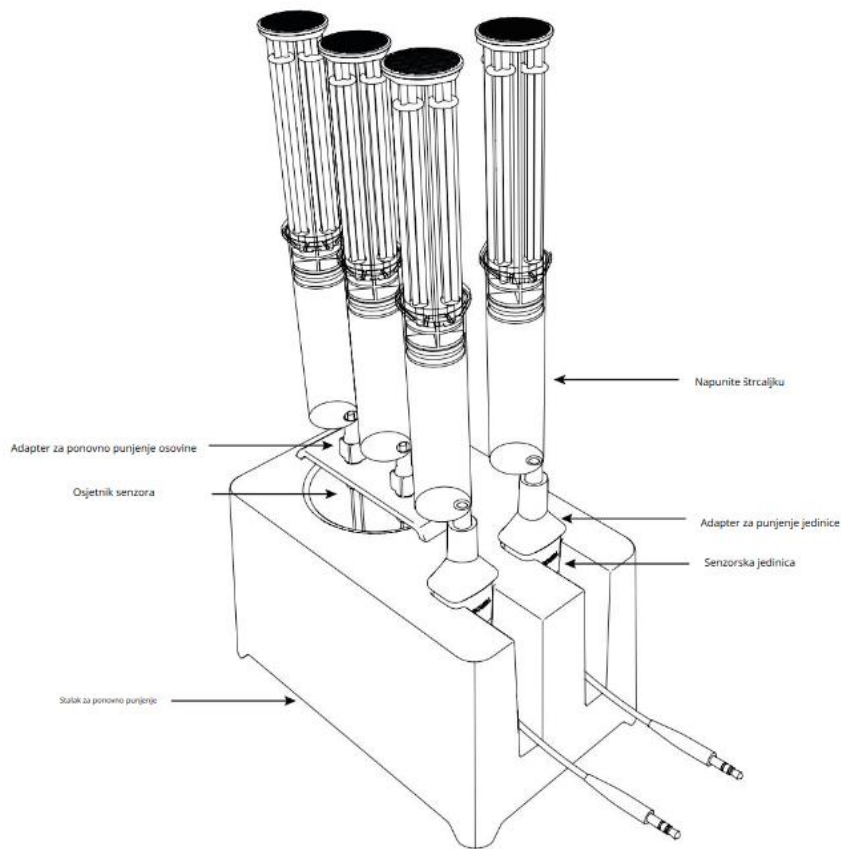


Slika 14. Senzor Teros 31 [15]

Teros 31 mjeri potencijal i temperaturu vode u tlu. Kako bi se dobili relevantni podaci, bitno je da su jedinica senzora, osovina tenziometra i keramički vrh potpuno ispunjeni demineraliziranom i deaeriranom vodom. Svaki mjehurić zraka unutar senzorske jedinice i osovine smanjit će kvalitetu mjerenja potencijala vode. Stoga, senzor Teros 31 se prije ugradnje u tlo priprema na poseban način, postupkom tzv. Prethodnog kondicioniranja uređaja.

Čašu je potrebno napuniti demineraliziranom ili destiliranom vodom isključivo iz razloga što voda iz slavine može onečistiti senzor tlaka i keramički vrh. Sljedeći korak je rastaviti senzor te odvojiti osovinu i jedinicu senzora te na nju priključiti običnu injekciju ispunjenu demineraliziranom ili destiliranom vodom. Nakon toga potrebno je spojiti senzorsku

jedinicu na adapter senzorske jedinice. Otključavanjem razmaknice potrebno je pustiti klip da se pomakne na dolje te će u tom trenutku dio zraka u adapteru biti zamijenjen vodom. Postupak je potrebno ponavljati dok se adapter ne napuni vodom. Jedinicu senzora nakon prethodne pripreme potrebno je deaerirati nekoliko sati, odnosno do trenutka kada mjehurići zraka više nisu vidljivi (slika 15). Također, vrlo je važno ne dodirivati direktno rukom keramički vrh jer takav način pripreme također može poremetiti buduća mjerenja [15].



Slika 15. Punjenje osovine tenziometra i senzorske jedinice [15]

Nakon uspješne pripreme senzora Teros 31 potrebno je keramički vrh konstantno držati mokrim. U suprotnom postoji mogućnost rasta napetosti vode uslijed isparavanja s keramičkog vrha senzora, čime se ponovo mogu pojaviti mjehurići zraka što dovodi do lošeg mjerenja i dobivanja nerefereentnih podataka. Preporučuje se senzor konstantno držati

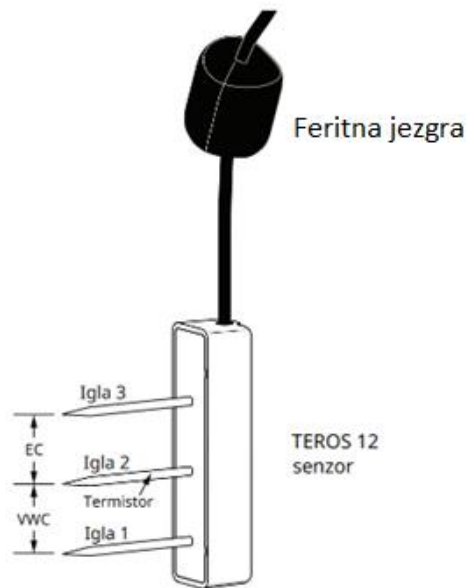
u vodi kako se navedeno ne bi dogodilo. U nastavku tablicom 4. prikazane su osnovne karakteristike i specifikacije senzora Teros 31.

Tablica 4. Osnovne specifikacije senzora Teros 31 [15]

TEROS 31	
SPECIFIKACIJE MJERENJA	
Vodeni potencijal	
Raspon:	'-85 do +50 kPa
Rezolucija:	'+/- 0,0012 kPa
Točnost:	'+/- 0,15 kPa
Temeratura	
Raspon:	'-30 do +60 °C
Rezolucija:	'+/-0,01 °C
Točnost:	'+/-0,5 °C
FIZIČKE SPECIFIKACIJE	
Dimenzije	
Širina:	23,50 mm
Dubina:	17,50 mm
Visina:	49,0 mm
Promjer osovine:	5 mm
Duljina osovine:	2,5,7,10,15 ili 20 cm

4.1.4. Teros 12

Senzor Teros 12 najčešće se upotrebljava za ugradnju u mineralna tla, mnoge druge vrste medija za uzgoj te druge porozne materijale. Osnovna uloga senzora je mjeriti podatke o vlažnosti, temperaturi i električnoj vodljivosti tla. Teros 12 sastoji se od triju igala od nehrđajućeg čelika. Između igle 1 i igle 2 senzor mjeri vlažnost tla dok se električna vodljivost mjeri između igle 2 i igle 3. Podaci o temperaturi mjere se pomoću ugrađenog termistora unutar igle 2. Teros 12, prikazan slikom 16, općenito, je idealan za trajno ukopavanje u tlo te kontinuirano očitavanje, mjerenje i bilježenje podataka [16].



Slika 16. Senzor Teros 12 [16]

Feritna jezgra senzora postavljena na kabel senzora udaljena je 7,60 cm od glave senzora čija je uloga izolirati senzor od bilo kakvih smetnji u sustavu što bi svakako utjecalo na mjerenje i prikupljanje podataka. Uloga feritne jezgre zapravo je identična kao i kod već opisanog senzora Teros 10 odnosno smanjiti potencijalne šumove sustava na izmjerenim podacima. Također, pri upotrebi senzora važno je ne pričvršćivati ništa na dio kabela između glave senzora i feritne jezgre.

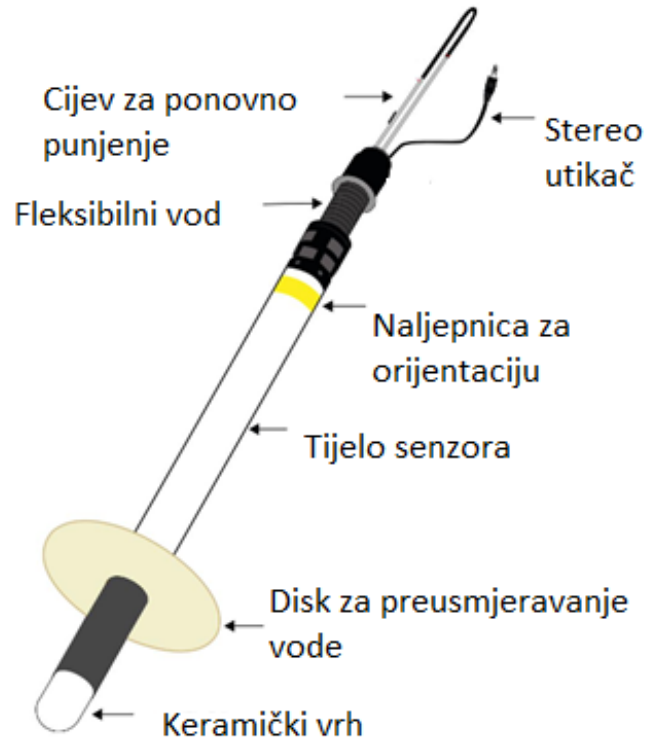
Mjerenje senzora odvija se stvaranjem elektromagnetskog polja pomoću kojeg se mjeri dielektrična permitivnost okolnog medija. Senzor upušta val frekvencije 70 Mhz na igle senzora koje se pune ovisno o dielektričnim značajkama materijala. Tablicom 5 dane su osnovne mjerne i fizičke specifikacije opisanog senzora. [16]

Tablica 5. Osnovne specifikacije senzora Teros 12 [16]

TEROS 12	
SPECIFIKACIJE MJERENJA	
<i>Volumetrijski sadržaj vode</i>	
Raspon	
Kalibracija mineralnog tla:	0,00-0,70 m ³ / m ³
Mediji bez tla kalibriranje:	0,0-1,0 m ³ / m ³
Prividna dielektrična permitivnost:	1 (zrak) do 80 (voda)
Rezolucija:	0,001 m ³ / m ³
Točnost	
Generička kalibracija:	'+/-0,03 m ³ / m ³
Srednja specifična kalibracija:	'+/-0,01-0,02 m ³ / m ³
Prividna dielektrična permitivnost:	1-40 (raspon tla), +/-1, 40-80 15% mjerenja
Frekvencija dielektričnog mjerenja:	70 MHz
Temperatura	
Raspon:	40 do 60 °C
Rezolucija:	0,1 °C
Točnost:	'+/- 1 °C
FIZIČKE SPECIFIKACIJE	
Dimenzije	
Duljina:	9,40 cm
Širina:	2,40 cm
Visina:	7,50 cm
Duljina igle:	5,50 cm
Vrsta konektora:	3,5 mm stereo utični konektor
Promjer konektora:	3,50 mm

4.1.5. Teros 32

Mjerni uređaj Teros 32 (Slika 17) mjeri potencijal vode u tlu i temperaturu. Osim za praćenje promjene razine vode u tlu, koristi se i pri kontroli navodnjavanja te mjerenjima kapaciteta skladištenja vode u tlu. Namijenjen je za dugotrajna i kontinuirana terenska mjerenja. Sastoji se od cijevi za punjenje, poklopca za prašinu, fleksibilnog voda, osjetnika, diska za preusmjeravanje vode, keramičkog vrha i konektora odnosno stereo priključka [17].



Slika 17. Senzor Teros 32 [17]

Pri ugradnji bitno je da se uređaj instalira pod kutom od 10° do 80° s obzirom na horizontalu. Kondicioniranje senzora izvodi se na način da se štrcaljka napuni deioniziranom vodom, istisnu se mjehurići zraka i tekućina se utisne u Teros 32. Postupak se ponavlja dok se mjehurići zraka u potpunosti ne istisnu iz mjernog uređaja, a voda ne istisne iz druge cijevi. Senzor je moguće kondicionirati te ponovo puniti bez da se uređaj uklanja iz tla. Sukciju je moguće mjeriti do -85 kPa, a njegove osnovne značajke dane su u tablici 6. [17]

Tablica 6. Osnovne specifikacije senzora Teros 32 [17]

TEROS 31	
SPECIFIKACIJE MJERENJA	
Vodeni potencijal	
Raspon:	'-85 do +50 kPa
Rezolucija:	' +/- 0,0012 kPa
Točnost:	' +/- 0,15 kPa
Temperatura	
Raspon:	'-30 do +60 °C
Rezolucija:	' +/-0,01 °C
Točnost:	' +/-0,1 °C
FIZIČKE SPECIFIKACIJE	
Dimenzije	
Promjer osovine:	2,50 cm
Duljina osovine:	40,80 i 120 cm
Radna temperatura:	'-30 °C

4.2. Mjerenja za kalibraciju senzora

U geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci pripremala su se tri uzorka na kojima su provedena ispitivanja i mjerenja korištenim sensorima opisana u poglavlju 4.1. Pri izradi pokusa mjerenja su provedena na mješavini dravskog pijeska i 10% kaolina koji su se prije ugradnje sušili na temperaturi od 105 °C kroz period od 24 sata. Prije ugradnje materijala, proračunom je dobivena količina vode koju je potrebno dodati u materijal kako bi se postigao određeni postotak vlažnosti ili saturacije. Materijal se ugrađivao u posude zbijanjem u slojevima na zabijenost koja je iznosila $D=50\%$, uz paralelnu ugradnju senzora na određenu lokaciju. Netom nakon ugradnje senzora, zatrpali su se određenim slojem materijala kako isti ne bi ostali zračno suhi. Svakoj posudi točno su izmjerene osnovne dimenzije – duljina i širina te se unutar njih materijal ugrađivao na visinu od $h=15$ cm. Prije početka ugradnje, koristeći se određeni su volumeni svih korištenih senzora – Teros 21, Teros 10, Teros 31 i Teros 12, radi korekcije volumena tla

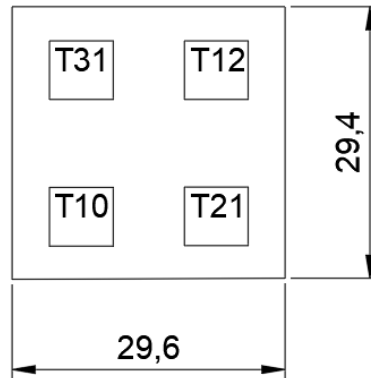
kojeg je potrebno ugraditi u kutije. Korištenjem precizne vage i posude ispunjene vodom, određeni su volumeni senzora:

- Teros 21 – $V = 25,60 \text{ cm}^3$
- Teros 10 – $V = 63,30 \text{ cm}^3$
- Teros 31 – $V = 11,90 \text{ cm}^3$
- Teros 12 – $V = 84,60 \text{ cm}^3$

Isti senzori ugrađuju se na visinu od $h=5 \text{ cm}$ i $h=10 \text{ cm}$ od dna metalne posude/kutije. Senzori s određenim volumenom ugrađivali su se horizontalno, na način da je u prvi i treći sloj materijala, odnosno na visinu od $h=5 \text{ cm}$ i $h=15 \text{ cm}$ uključena $\frac{1}{2}$ volumena sumiranih senzora, dok je unutar drugog sloja, $h=10 \text{ cm}$, uključen cjelokupan volumen senzora pri proračunu potrebnih količina materijala (dravskog pijeska, kaolina i vode) za izvedbu određene posude.

4.2.1. Pokus u posudi br. 4

Prije ugradnje materijala, pomičnom mjerkom dobivene su osnovne dimenzije kutije ($L \times B \times H$) koje iznose $29,60 \times 29,40 \times 29,7 \text{ cm}$. Materijal se ugrađuje na visinu $h=15 \text{ cm}$, pri čemu se prva serija senzora – Teros 21, Teros 10, Teros 31 i Teros 12 ugrađuje na visinu $h=5 \text{ cm}$, njihova dispozicija prikazana je Slikom 18. Dok se druga serija senzora (čine ju isti senzori kao i u prvoj seriji), ugrađuje na visinu od $h=10 \text{ cm}$, gledano od dna prema vrhu posude. U posudu 4 ugrađuje se materijal na vlažnost koja iznosi $w=5\%$ što ujedno odgovara vlažnosti izrađenom umanjenom fizikalnom modelu. Vlažnost ugrađenog materijala koja iznosi 5% odgovara stupnju saturacije koji iznosi $15,2\%$.



Slika 18. Tlocrtna dispozicija senzora u posudi br.4

U nastavku prikazan je proračun količine potrebnog materijala za ugradnju pri vlažnosti od 5%.

Izračun ukupnog volumena tla, V_{tot} :

$$\begin{aligned} V_{tot} &= 29,60 * 29,40 * 15 - (25,60 + 63,30 + 11,90 + 84,60) * 2 \\ &= 12682,80 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Izračun volumena pora, V_v :

$$V_v = n * V_{tot} = 0,469 * 12682,80 = 5948,23 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena suhih čestica:

$$V_s = V_{tot} - V_v = 12682,80 - 5948,23 = 6734,57 \text{ cm}^3$$

Izračun mase suhih čestica koju čine dravski pijesak i 10% kaolina:

$$\rho = 2,69 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

- Ukupna masa suhog materijala, m_s :

$$m_s = \rho_s * V_s = 2,69 * 6734,57 = 18115,99 \text{ g} = 18,115 \text{ kg}$$

- Masa kaolina:

$$m_k = 0,10 * 18115,99 = 1811,599 \text{ g} = 1,81 \text{ kg}$$

- Masa pijeska

$$m_p = 18115,99 - 1811,599 = 16304,39 \text{ g} = 16,30 \text{ kg}$$

- Masa vode

$$w = \frac{m_w}{m_s}$$

$$m_w = w * m_s = 0,05 * 18115,99 = 905,80 \text{ g} = 0,906 \text{ kg}$$

Proračun količina materijala prema unutar svakog sloja:

1. Sloj 1 i Sloj 3

Izračun ukupnog volumena:

$$\begin{aligned} V_{tot} &= 29,60 * 29,40 * 5 - (25,60 + 63,30 + 11,90 + 84,60) * \frac{1}{2} \\ &= 4258,50 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Izračun volumena pora:

$$V_v = n * V_{tot} = 0,469 * 4258,50 = 1997,24 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena suhih čestica:

$$V_s = V_{tot} - V_v = 4258,50 - 1997,24 = 2261,26 \text{ cm}^3$$

Izračun mase suhih čestica koju čine dravski pijesak i 10% kaolina:

$$\rho = 2,69 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

- Ukupna masa materijala

$$m_{_s} = \rho_{_s} * V_{_s} = 2,69 * 2261,26 = 6082,79 \text{ g} = 6,08 \text{ kg}$$

- Masa kaolina:

$$m_{_k} = 0,10 * 6082,79 = 608,28 \text{ g} = 0,608 \text{ kg}$$

- Masa pijeska

$$m_{_p} = 6082,79 - 608,28 = 5474,51 \text{ g} = 5,475 \text{ kg}$$

- Masa vode

$$w = \frac{m_w}{m_s}$$

$$m_{_w} = w * m_{_s} = 0,05 * 6082,79 = 304,14 \text{ g} = 0,304 \text{ kg}$$

2. Sloj 2

Izračun ukupnog volumena:

$$V_{_tot} = 29,60 * 29,40 * 5 - (25,60 + 63,30 + 11,90 + 84,60) = 4165,80 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena pora:

$$V_{_v} = n * V_{_tot} = 0,469 * 4165,80 = 1953,76 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena suhih čestica:

$$V_{_s} = V_{_tot} - V_{_v} = 4165,80 - 1953,76 = 2212,04 \text{ cm}^3$$

Izračun mase suhih čestica koju čine dravski pijesak i 10% kaolina:

$$\rho = 2,69 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_{_s} = \frac{m_s}{V_s}$$

- Ukupna masa materijala

$$m_{_s} = \rho_{_s} * V_{_s} = 2,69 * 2212,04 = 5950,39 \text{ g} = 5,95 \text{ kg}$$

- Masa kaolina:

$$m_{_k} = 0,10 * 5950,39 = 595,04 \text{ g} = 0,595 \text{ kg}$$

- Masa pijeska

$$m_{_p} = 5950,39 - 595,04 = 5355,35 \text{ g} = 5,355 \text{ kg}$$

- Masa vode

$$w = \frac{m_{_w}}{m_{_s}}$$

$$m_{_w} = w * m_{_s} = 0,05 * 5950,39 = 297,52 \text{ g} = 0,298 \text{ kg}$$

Prema dobivenim masama za svaki sloj, materijal se zamiješao i pustio određeno vrijeme u posudi prekrivenoj folijom. Izrada modela započinje ugradnjom prvog sloja materijala na visinu od 5 cm pri čemu se on zbija drvenim nabijačem na vrijednost od $D=50\%$. Nakon toga slijedi ugradnja senzora na način da su isti polegnuti u materijal i površinski zatrpani. Sensorima su očitani njihovi serijski brojevi te serijski broj data logger-a u koji su priključeni, kako bi se dobiveni rezultati kasnije lakše raspoznavali i obradili. Sljedeći korak je ugradnja drugog sloja materijala na visini od 10 cm. Materijal se površinski nabija kao i prethodno ugrađeni sloj te se u konačnici ugrađuju senzori čiji su serijski brojevi prije ugradnje pribilježeni. Senzori su također polegnuti u materijal, površinski zatrpani te se u nastavku dodaje i treći sloj materijala na konačnu visinu od 15 cm što je prikazano Slikom 19.

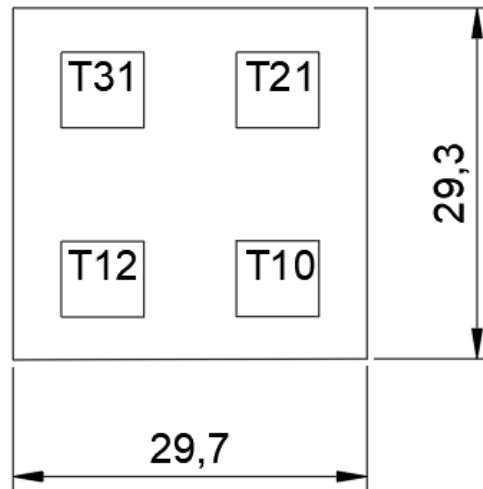
Nakon ugradnje materijala kutija je zatvorena kako se spriječilo dodatno isparavanje vode unutar zamiješanog materijala. Na dalje, tijekom provedbe pokusa u posudi 4 nekoliko puta dodana je određena količina vode kako bi se povećala saturacija materijala na određenu vrijednost. U nastavku rada pri obradi rezultata pokusa obradit će se dobivene vrijednosti koje su se prikupile mjerenjima.



Slika 19. Prikaz ugrađenih senzora unutar Posude 4 na visini od $h=5$ cm

4.2.2. Pokus u posudi br. 3

Posuda 3 izrađivala se na isti način kao i prethodno opisana posuda 4. Za početak, potrebno je izmjeriti dimenzije posude, pomičnom mjerkom dobivene vrijednosti posude iznose 29,70x29,30 cm. Materijal se ugrađuje na ukupnu visinu od 15 cm u tri sloja od kojih je svaki visine 5 cm. Senzori ugrađeni u prvi sloj materijala – Teros 21, Teros 10, Teros 31 i Teros 12 postavljeni su pognuto u materijal (Slika 19), njihova tlocrtna dispozicija vidljiva je na Slici 20. Nakon ugradnje površinski su zatrpani mješavinom materijala kako bi se ostvario bolji kontakt između senzora i materijala što će, na kraju krajeva, utjecati bolje na prikupljene rezultate. Drugi sloj materijala ugrađuje se na visinu od 10 cm, senzori su ugrađeni na način da su vertikalno utisnuti u tlo. Ovakvim načinom ugradnje senzora u cilju je bilo utvrditi da li način ugradnje senzora utječe na mjerene vrijednosti (Slika 21).



Slika 20. Tlocrtna dispozicija senzora u posudi br.3



Slika 21. Prikaz ugrađenih senzora unutar Posude 3 na visini od $h=10$ cm

U drugi sloj materijala ugradili su se senzori – Teros 21, Teros 31 i dva senzora Teros 10. Promjena volumena senzora zbog njegove promjene je zanemariva te nije uključena u proračun. U konačnici ugradio se i treći sloj materijala na ukupnu visinu od 15 cm. U posudu 3 ugradio se materijal čiji stupanj saturacije iznosi $S=50\%$ što odgovara vlažnosti od $w=23,45\%$. Nakon ugradnje svih slojeva materijala i senzora koji će se pri obradi rezultata razlikovati prema serijskim brojevima posuda je zatvorena kako voda ne bi isparavala. U nastavku dan je proračun volumena i masa materijala koji se koriste pri ugradnji s obzirom na ciljani stupanj saturacije.

Izračun ukupnog volumena:

$$\begin{aligned} V_{tot} &= 29,70 * 29,30 * 15 - (25,60 + 63,30 + 11,90 + 84,60) * 2 \\ &= 12682,35 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Izračun volumena pora:

$$V_v = n * V_{tot} = 0,469 * 12682,35 = 5948,02 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena suhih čestica:

$$V_s = V_{tot} - V_v = 12682,35 - 5948,02 = 6734,33 \text{ cm}^3$$

Izračun mase suhih čestica koju čine dravski pijesak i 10% kaolina:

$$\rho = 2,69 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

- Ukupna masa materijala

$$m_s = \rho_s * V_s = 2,69 * 6734,33 = 18115,35 \text{ g} = 18,115 \text{ kg}$$

- Masa kaolina:

$$m_k = 0,10 * 18115,35 = 1811,535 \text{ g} = 1,81 \text{ kg}$$

- Masa pijeska

$$m_p = 18115,35 - 1811,535 = 16303,815 \text{ g} = 16,30 \text{ kg}$$

- Masa vode

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

$$V_w = S * V_v = 0,5 * 5948,02 = 2974 \text{ g} = 2,974 \text{ kg}$$

Proračun količina materijala prema unutar svakog sloja:

1. Sloj 1 i Sloj 3

Izračun ukupnog volumena:

$$\begin{aligned} V_{tot} &= 29,70 * 29,30 * 5 - (25,60 + 63,30 + 11,90 + 84,60) * \frac{1}{2} \\ &= 4258,35 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Izračun volumena pora:

$$V_v = n * V_{tot} = 0,469 * 4258,35 = 1997,166 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena suhih čestica:

$$V_s = V_{tot} - V_v = 4258,35 - 1997,166 = 2261,184 \text{ cm}^3$$

Izračun mase suhih čestica koju čine dravski pijesak i 10% kaolina:

$$\rho = 2,69 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

- Ukupna masa materijala

$$m_s = \rho_s * V_s = 2,69 * 2261,184 = 6082,585 \text{ g} = 6,08 \text{ kg}$$

- Masa kaolina:

$$m_k = 0,10 * 6082,585 = 608,26 \text{ g} = 0,608 \text{ kg}$$

- Masa pijeska

$$m_p = 6082,585 - 608,26 = 5474,327 \text{ g} = 5,474 \text{ kg}$$

- Masa vode

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

$$V_w = S * V_v = 0,5 * 1997,166 = 998,583 \text{ g} = 0,999 \text{ kg}$$

2. Sloj 2

Izračun ukupnog volumena:

$$V_{tot} = 29,70 * 29,30 * 5 - (25,60 + 63,30 + 11,90 + 84,60) = 4165,65 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena pora:

$$V_v = n * V_{tot} = 0,469 * 4165,65 = 1953,689 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena suhih čestica:

$$V_s = V_{tot} - V_v = 4165,65 - 1953,689 = 2211,961 \text{ cm}^3$$

Izračun mase suhih čestica koju čine dravski pijesak i 10% kaolina:

$$\rho = 2,69 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

- Ukupna masa materijala

$$m_s = \rho_s * V_s = 2,69 * 2211,961 = 5950,175 \text{ g} = 5,95 \text{ kg}$$

- Masa kaolina:

$$m_k = 0,10 * 5950,175 = 595,0175 \text{ g} = 0,595 \text{ kg}$$

- Masa pijeska

$$m_p = 5950,175 - 595,0175 = 5355,158 \text{ g} = 5,36 \text{ kg}$$

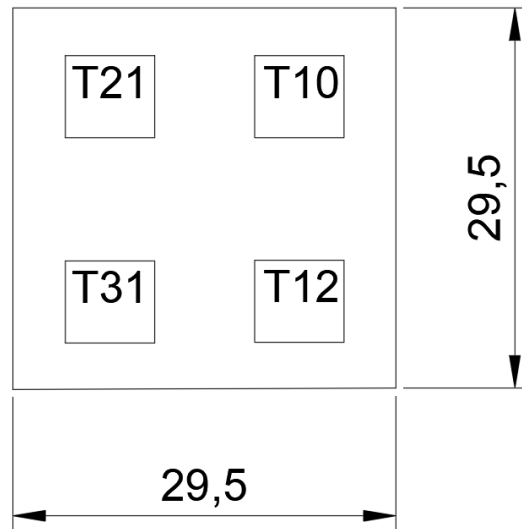
- Masa vode

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

$$V_w = S * V_v = 0,5 * 1953,689 = 976,84 \text{ g} = 0,977 \text{ kg}$$

4.2.3. Pokus u posudi br.2

Pomičnom mjerkom dobivene su pravilne kvadratne dimenzije posude 2 u koju će se ugraditi mješavina materijala (dravski pijesak i kaolin) te one iznose 29,50x29,50x19,7 cm. Materijal se ugrađuje na ukupnu visinu od 15 cm u slojevima čije visine iznose 5 cm. Senzori koji se ugrađuju u posudu jednaki su onima koji su prethodno ugrađeni u posudu 4 odnosno Teros 21, Teros 31, Teros 10 i Teros 12 čija je tlocrtna dispozicija prikazana na Slici 22. Njihove karakteristike ukratko su navedene u poglavlju 4.1. Senzori na visini od 5 cm, gledano od dna posude prema njenom vrhu, ugrađuju se na način da su položeni u materijal te površinski zatrpani kako bi se ostavio bolji kontakt između okolnog tla tj. materijala i samog senzora (Slika 19.). Drvenim nabijačem zbija se površinski sloj materijala. Na visini od h=10 cm senzori su ugrađeni na način da su vertikalno utisnuti u materijal (Slika 21). Materijal posude 2 ugrađuje se sa stupnjem saturacije koji iznosi S=35% što odgovara vlažnosti u iznosu w=16,42%. U nastavku dan je proračun količina materijala potrebnog za izradu posude 2 s obzirom na određeni stupanj saturacije.



Slika 22. Tlocrtna dispozicija senzora u posudi br. 2

Izračun ukupnog volumena:

$$V_{tot} = 29,50 * 29,50 * 15 - (25,60 + 63,30 + 11,90 + 84,60) * 2$$

$$= 12682,95 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena pora:

$$V_v = n * V_{tot} = 0,469 * 12682,95 = 5948,30 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena suhih čestica:

$$V_s = V_{tot} - V_v = 12682,95 - 5948,30 = 6734,65 \text{ cm}^3$$

Izračun mase suhih čestica koju čine dravski pijesak i 10% kaolina:

$$\rho = 2,69 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

- Ukupna masa materijala

$$m_{_s} = \rho_{_s} * V_{_s} = 2,69 * 6734,65 = 18116,21 \text{ g} = 18,12 \text{ kg}$$

- Masa kaolina:

$$m_k = 0,10 * 18115,35 = 1811,62 \text{ g} = 1,81 \text{ kg}$$

- Masa pijeska

$$m_p = 18116,21 - 1811,62 = 16304,59 \text{ g} = 16,30 \text{ kg}$$

- Masa vode

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

$$V_w = S * V_v = 0,35 * 5948,30 = 2081,91 \text{ g} = 2,082 \text{ kg}$$

Proračun količina materijala prema unutar svakog sloja:

1. Sloj 1 i Sloj 3

Izračun ukupnog volumena:

$$\begin{aligned} V_{tot} &= 29,50 * 29,50 * 5 - (25,60 + 63,30 + 11,90 + 84,60) * \frac{1}{2} \\ &= 4258,55 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Izračun volumena pora:

$$V_v = n * V_{tot} = 0,469 * 4258,55 = 1997,26 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena suhih čestica:

$$V_s = V_{tot} - V_v = 4258,55 - 1997,26 = 2261,29 \text{ cm}^3$$

Izračun mase suhih čestica koju čine dravski pijesak i 10% kaolina:

$$\rho = 2,69 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

- Ukupna masa materijala

$$m_s = \rho_s * V_s = 2,69 * 2261,29 = 6082,87 \text{ g} = 6,08 \text{ kg}$$

- Masa kaolina:

$$m_k = 0,10 * 6082,87 = 608,29 \text{ g} = 0,608 \text{ kg}$$

- Masa pijeska

$$m_p = 6082,87 - 608,29 = 5474,58 \text{ g} = 5,474 \text{ kg}$$

- Masa vode

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

$$V_w = S * V_v = 0,35 * 1997,26 = 699,04 \text{ g} = 0,699 \text{ kg}$$

2. Sloj 2

Izračun ukupnog volumena:

$$V_{tot} = 29,50 * 29,50 * 5 - (25,60 + 63,30 + 11,90 + 84,60) = 4165,85 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena pora:

$$V_v = n * V_{tot} = 0,469 * 4165,85 = 1953,78 \text{ cm}^3$$

Izračun volumena suhih čestica:

$$V_s = V_{tot} - V_v = 4165,85 - 1953,78 = 2212,07 \text{ cm}^3$$

Izračun mase suhih čestica koju čine dravski pijesak i 10% kaolina:

$$\rho = 2,69 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

- Ukupna masa materijala

$$m_s = \rho_s * V_s = 2,69 * 2212,07 = 5950,47 \text{ g} = 5,95 \text{ kg}$$

- Masa kaolina:

$$m_k = 0,10 * 5950,47 = 595,05 \text{ g} = 0,595 \text{ kg}$$

- Masa pijeska

$$m_p = 5950,47 - 595,05 = 5355,42 \text{ g} = 5,36 \text{ kg}$$

- Masa vode

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

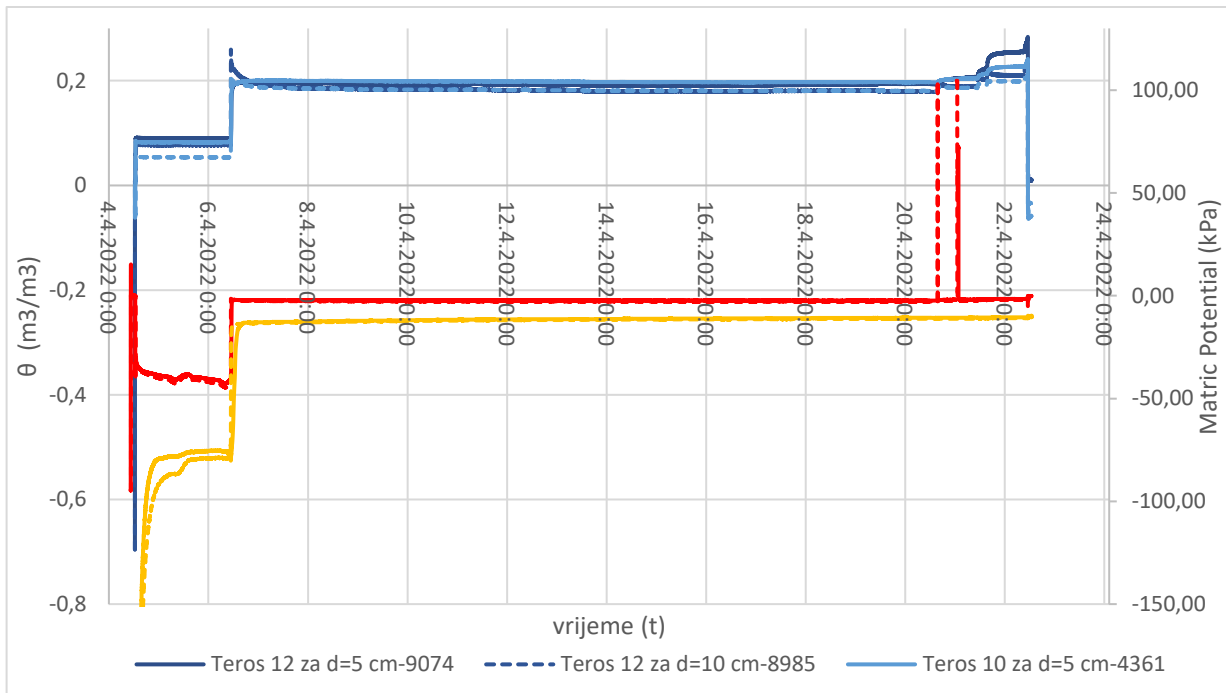
$$V_w = S * V_v = 0,5 * 1953,78 = 683,82 \text{ g} = 0,683 \text{ kg}$$

4.3. Prikaz rezultata kalibracije senzora

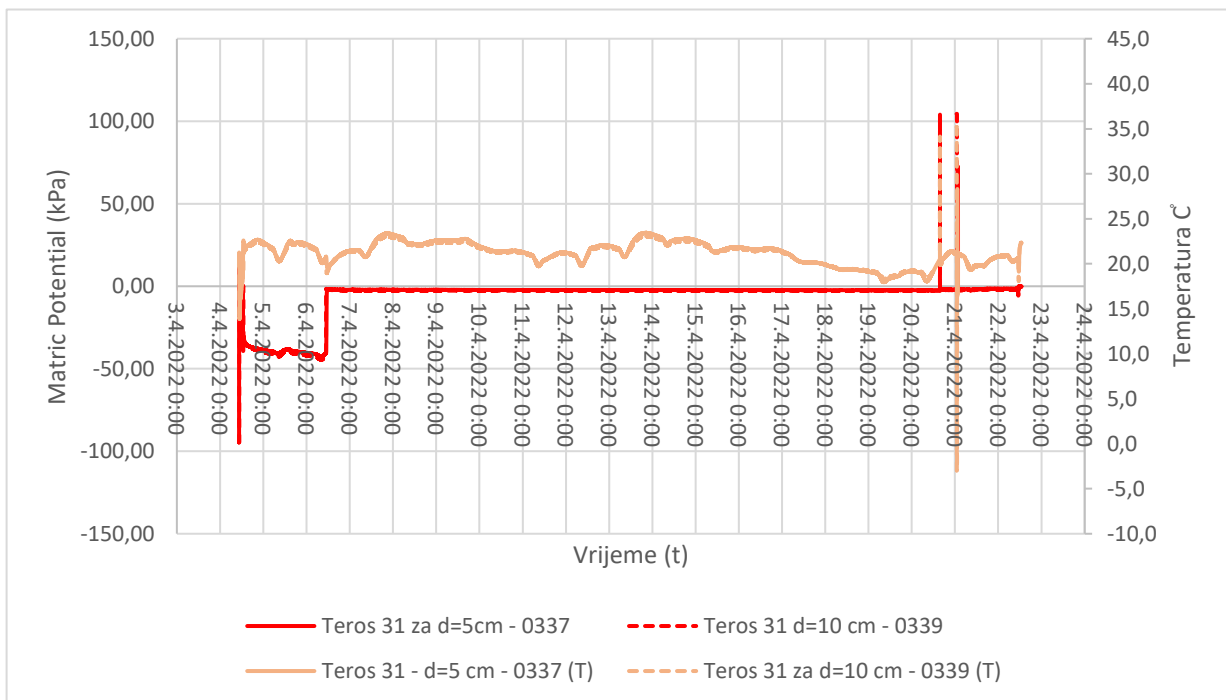
U nastavku kroz nekoliko poglavlja prikazat će se rezultati provedenih ispitivanja izrađenih modela prethodno definiranih Posuda 4, 3 i 2. S obzirom da svaka posuda sadrži mnoštvo prikupljenih i konvertiranih podataka isti su obrađeni i sažeti u nekoliko dijagrama koji će se sukladno rezultatima i obraditi. Također, prikupljeni su i rezultati provedenog petog izvedenog ispitivanja u statičkim uvjetima umanjenog modela klizišta. Rezultati su obrađeni te je na temelju svih ispitivanja dobivena pojedina sukcijska krivulja čije su osnovne točke dobivene na osnovi promjene količine vode unutar uzorka.

4.3.1. Prikaz rezultata mjerenja Posude 4

Na sljedećem dijagramu (Slika 23) prikazani su rezultati mjerenja prikupljeni za posudu 4 od 04.04.2022. do 22.04.2022. kada je pokus dovršen. Materijal koji se ugrađivao zamiješan je na vlažnost koja iznosi $w=5\%$. Također, slikom 24 i 25 prikazat će se mjerenja temperature i apsolutnog pritiska.

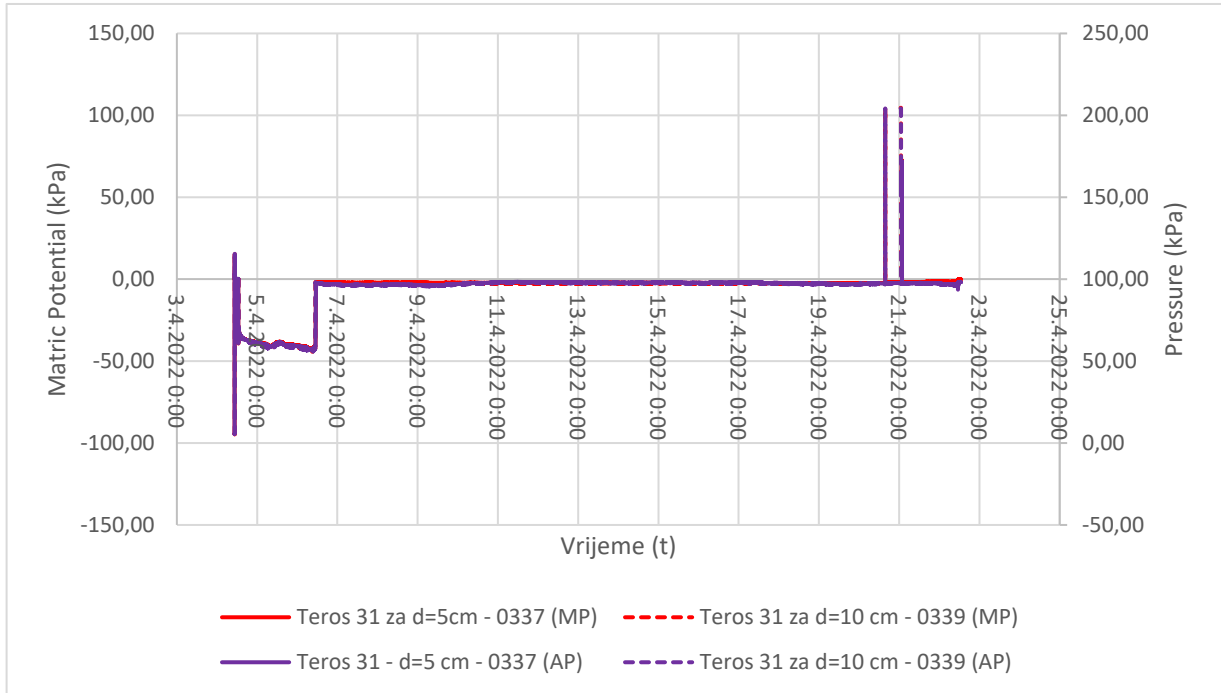


Slika 23. Rezultati mjerenja unutar posude 4

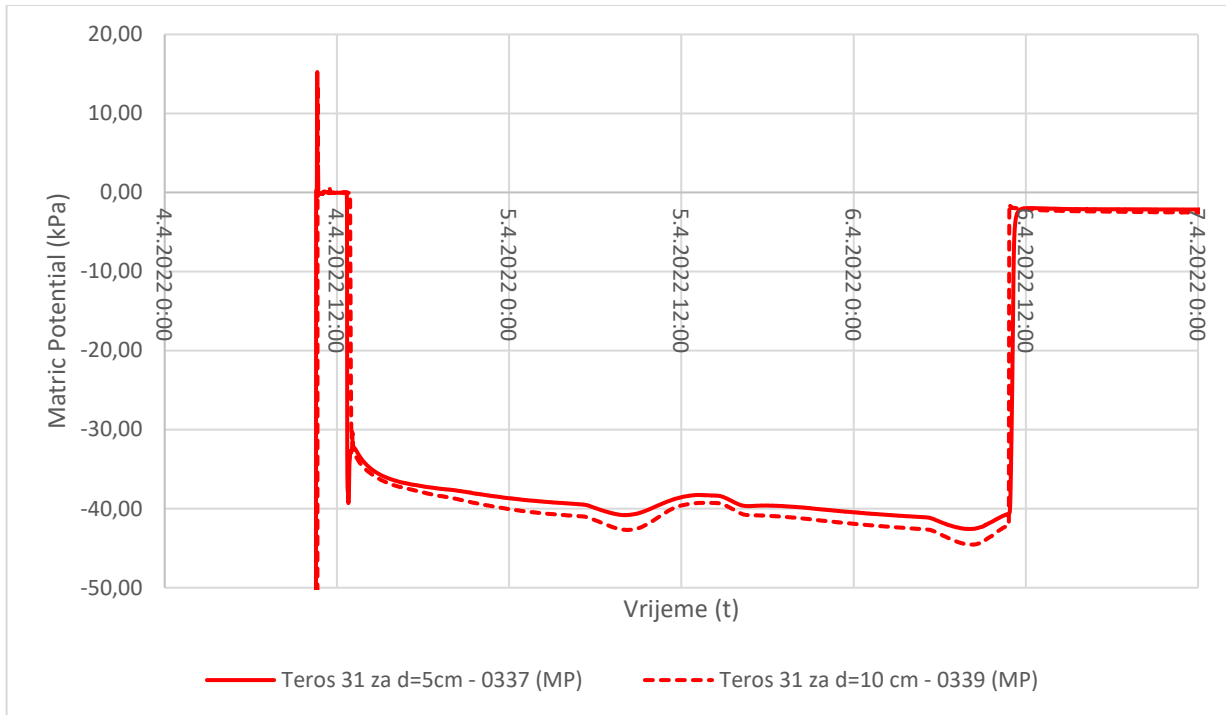


Slika 24. Rezultati mjerenja posude 4 - raspon temperatura

Prethodni dijagram (slika 24) prikazuje kretanje temperature u laboratoriju. Prema mjerenjima dobivene se vrijednosti između 17 i 24 °C.



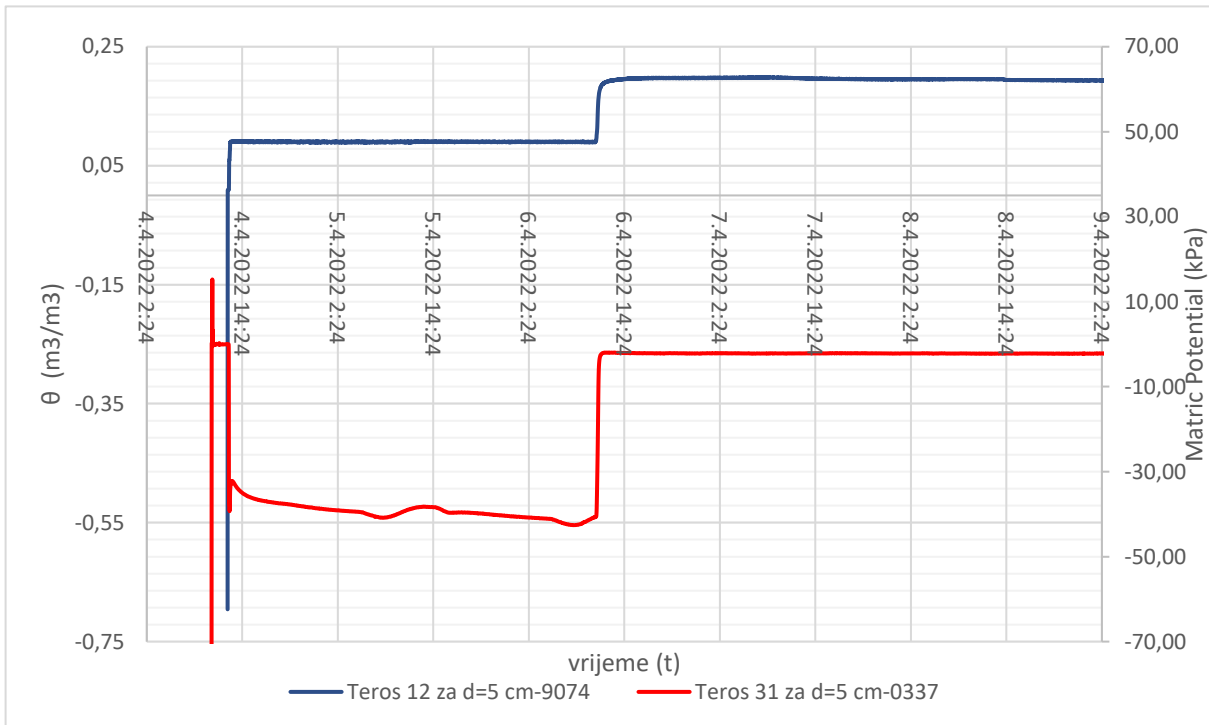
Slika 25. Rezultati mjerenja posude 4 – raspon tlakova



Slika 26. Rezultati mjerenja posude 4

4.3.2. Rezultati mjerenja senzora Teros 31 na dubini od $h=5$ cm i $h=10$ cm

Kako je već navedeno mjerni uređaj Teros 31 direktno mjeri sukciju dok Teros 12 i Teros 10 mjere volumetrijski sadržaj vode te su sljedećom Slikom 27 prikazani rezultati mjerenja na dubini od 5 cm gledano od dna kutije prema njenom vrhu.



Slika 27. Prikaz rezultata mjerenja posude 4 - Teros 31 i Teros 12 ($h=5\text{cm}$)

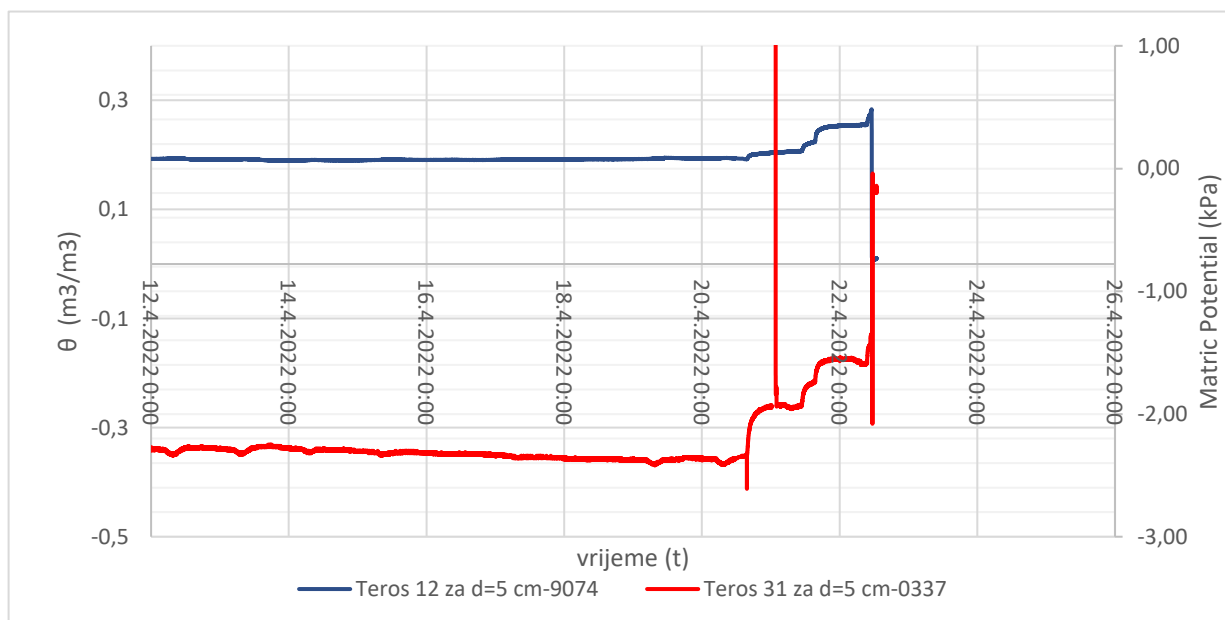
Na dijagramu se može primijetiti kako vrijednost rezultata i mjerenja kreće iz negativne vrijednosti zabilježene 04.04.2022. u 10:28 sati te ona iznosi -94,52 kPa. Tom vrijednosti potvrđuje se stanje kondicioniranja senzora špricom koja stvara podtlak koji iznosi -100 kPa. Sljedeća dva dana senzor miruje u čaši s demineraliziranom odnosno destiliranom vodom.

Također, na grafu je vidljiv lagani porast iz negativne vrijednosti prema pozitivnoj, gdje se granica (nula) još uvijek ne prelazi, iz razloga što se u tom trenutku senzor skida s šprice. Prijelaz iz negativnog u pozitivan kvadrant događa se u trenutku kada se na senzor instalira keramika na način da se navije na senzor. Time se postiže tlačno naprezanje na vodu i vrijednost prelazi u plus te doseže maksimalnu vrijednost koja iznosi 15,23 kPa, a je zabilježena u vremenu 04.04.2022. u 10:23. Nakon što se instalira keramika senzor se vraća u stanje mirovanja, u čašicu s vodom kako bi se vrijednosti stabilizirale te se vratile u negativnu vrijednost u periodu od 10:39 do 12:41.

Nakon što se senzor ugradi u materijal u vremenu 12:42 može se primijetiti ponovo veća negativna vrijednost koja se kreće od minimalne -1,42 kPa pa do -39,30 kPa što je zabilježeno u 12:48. Ovaj događaj pojašnjava se na način da je senzor u trenutku ugradnje u sebe povukao određenu količinu vode pa vrijednosti od 04.04.2022. u 12:49 do 05.04.2022. u 2:05 osciliraju u vrijednosti od -38,94 kPa do -39,06 kPa.

Na dan 06.04.2022. u posudu je dodana određena količina vode kako bi se početna vlažnost materijala koja je iznosila 5%, odnosno njen stupanj saturacije iznosi $S=15,2\%$ povećala se na stupanj saturacije koji će iznositi 33,6%. Ukupno se dodalo 1093,68 grama vode kako bi se vlažnost dovela do tražene vrijednosti. U tom slučaju volumetrijski sadržaj vode iznosi (θ) 0,158.

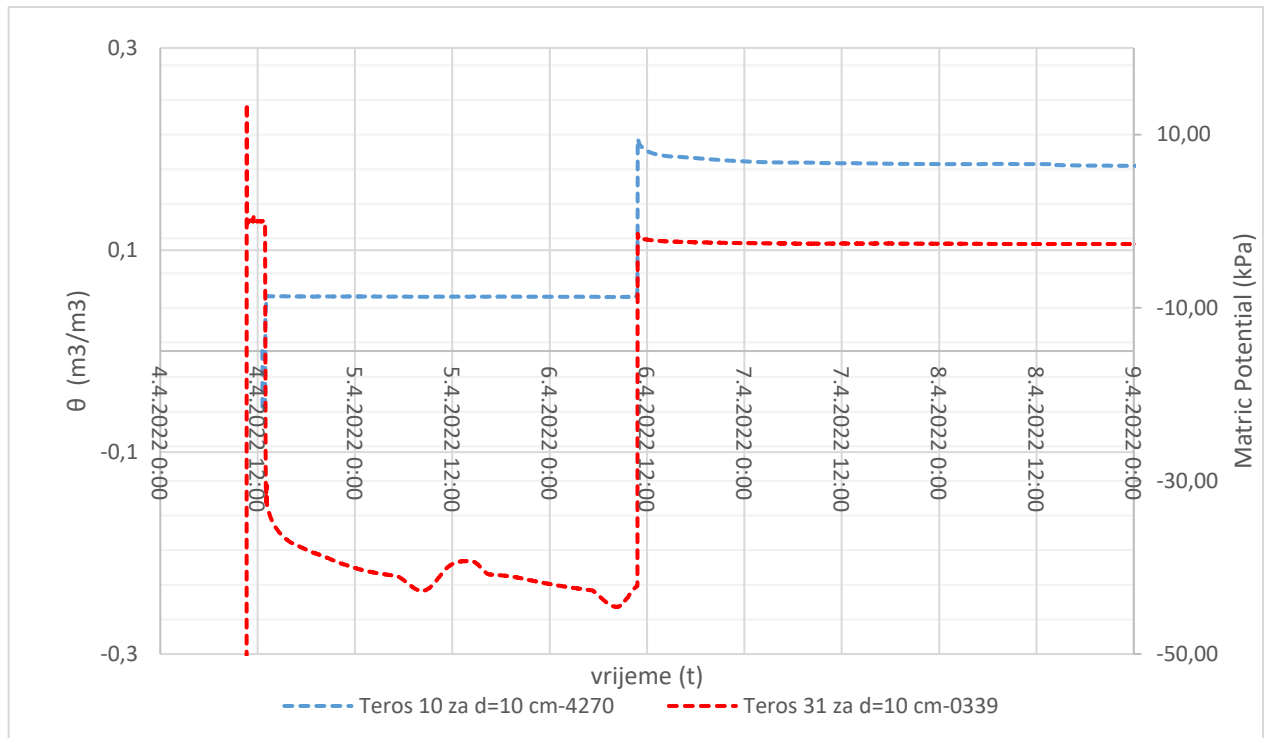
Dana 20.04.2022. u 15:36 sati dodaje se nova količina vode u materijal te ona iznosi 1093,68 g u prvoj fazi te dok u drugoj fazi ponovno špricanje vode u količini od 216,30 g. Voda se dodaje jednolikim špricanjem po površini materijala, količina dodane vode izazvala je slijeganje materijala u iznosu od 5,66 mm. S obzirom na primijećeno slijeganje materijala proračunate su nove komponente unutar materijala – volumen pora i volumen vode kako bi se dobio novi stupanj saturacije koji iznosi 38,80% i volumetrijski sadržaj vode u iznosu od 0,182.



Slika 28. Prikaz rezultata mjerenja posude 4 - Teros 31 i Teros 12 ($h=5$ cm)

Dana 21.04.2022. dodaje se još 204,70 g vode u uzorak te novi stupanj saturacije u tom slučaju iznosi 42,34%, a volumetrijski sadržaj vode iznosi 0,199.

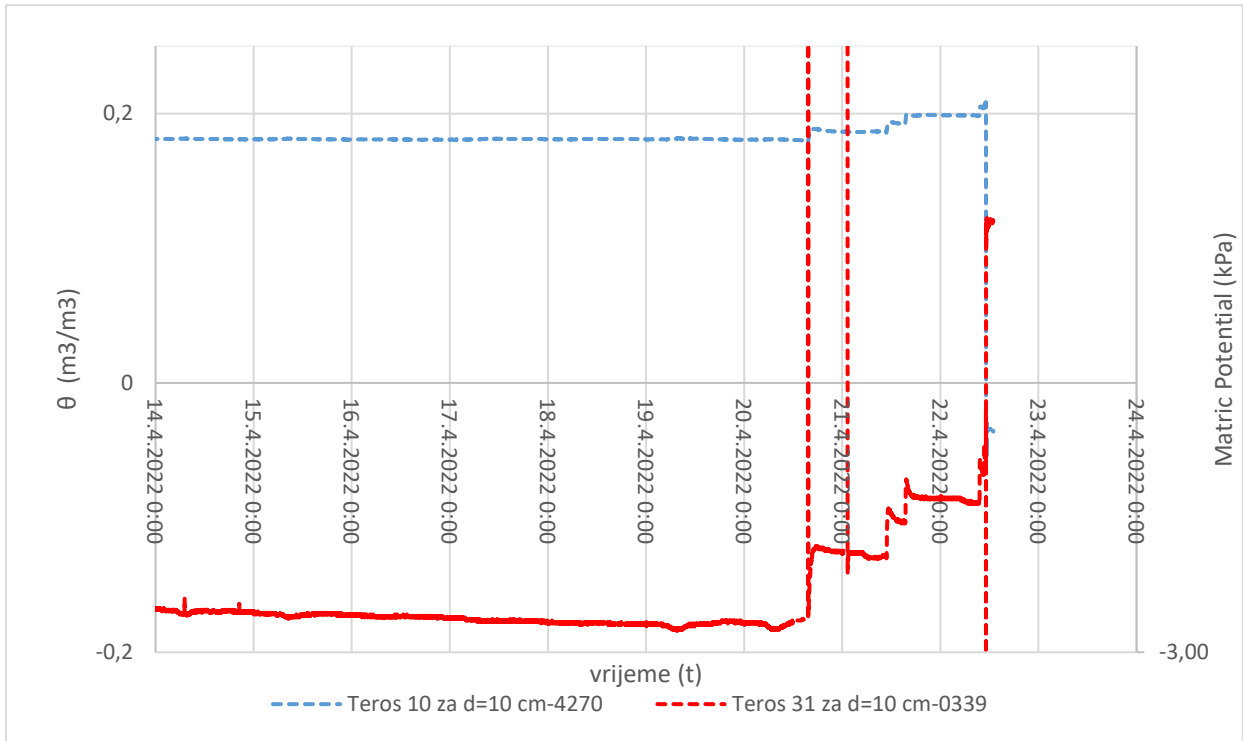
U nastavku prikazani su rezultati mjerenja Teros 31 na dubini od $h=10$ cm gledao od dna posude prema vrhu (Slika 29).



Slika 29. Prikaz rezultata mjerenja posude 4 – Teros 31 i Teros 10 ($h=10$ cm)

Dijagram na Slici 29. prikazuje izdvojen segment dijagrama će se u nastavku opisati. Način kondicioniranja objašnjen je u prethodnim odlomcima, no na dubini od 10 cm u vremenu kada je senzor spojen na špricu (04.04.2022 u 10:38) negativna vrijednost u dijagramu iznosi -94,60 kPa. Veća pozitivna vrijednost zbog navijanja keramike javlja se 04.04.2022. u 10:40 te iznosi 13,60 kPa. Proces daljnjeg stabiliziranja vrijednosti traje od 10:52 kada vrijednost iznosi -0,15 kPa do 12:53 čija je vrijednost -0,07 kPa. Nakon ugradnje senzora (12:54 sati) ponovo se očitava veća negativna vrijednost koja iznosi -34 kPa te proces umjerenog osciliranja vrijednosti traje od 04.04.2022. 15:21 do 05.04.2022. 17:39 te

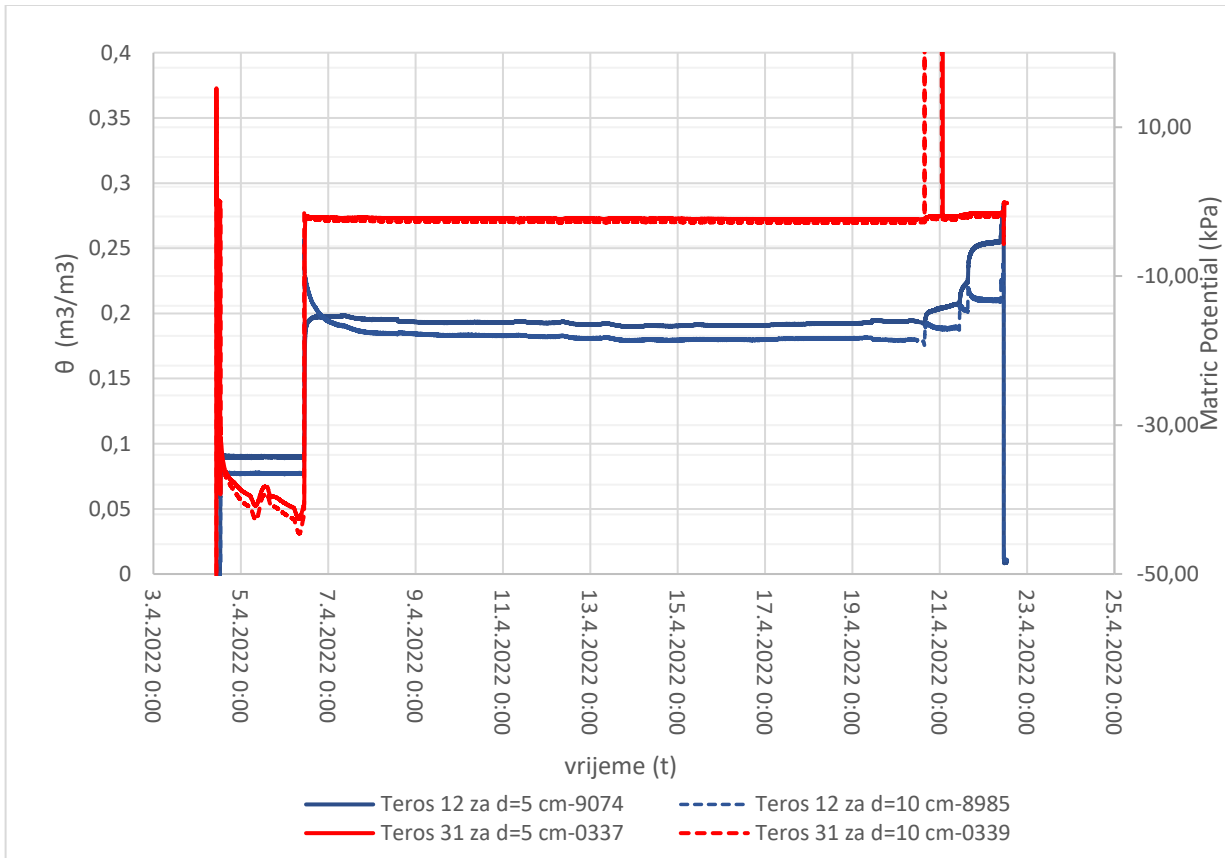
njihove vrijednosti međusobno osciliraju od -36,60 kPa do -40,88 kPa. Pri ponovnom dodavanju vode 06.04.2022. na dijagramu je očitana vrijednost u iznosu -1,94 kPa.



Slika 30. Prikaz rezultata mjerenja posude 4 - Teros 31 i Teros 10 ($h=10$ cm)

Senzor ugrađen na dubini od $h=10$ cm daje nešto veće negativne vrijednosti. Razlog tome je to što je senzor ugrađen bliže površini posude te ranije reagira na procese isparavanja odnosno sušenja materijala te ponovnog dodavanja nove količine vode. Senzor ugrađen na visini od 5 cm reagira nešto sporije iz razloga što je potrebno neko vrijeme da se nova količina vode infiltrira na dno posude što ovisi o zbijenosti i propusnosti mješavine materijala.

Slika 31 prikazuje rezultate mjerenja senzora Teros 31 i Teros 12.



Slika 31. Prikaz rezultata mjerenja posuda 4 – Teros 12 i Teros31 ($h=5$ cm i $h=10$ cm)

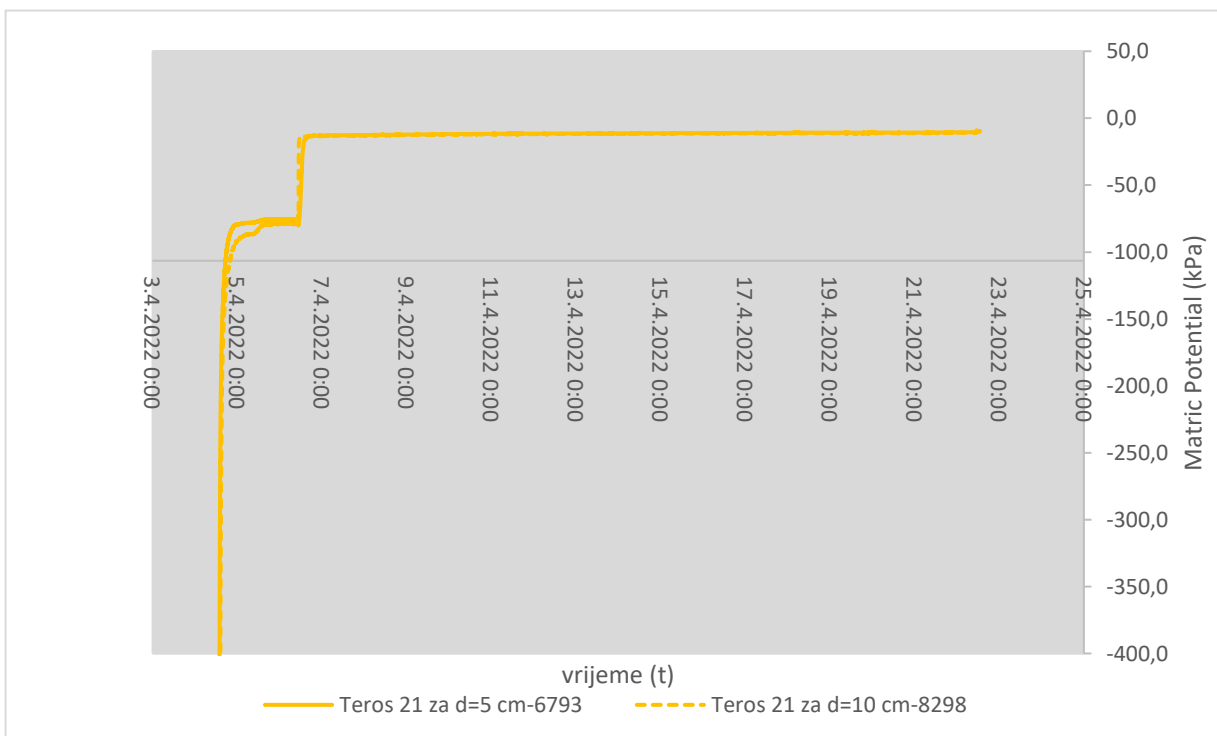
Teros 12 na dubinu od 5 cm ugrađen je u 12:44 te u tom trenutku pokazuje vrijednost koja je jednaka 0,033 no prije ugradnje u 12:33 vrijednost zabilježene vrijednosti iznosi -0,696 dok u periodu od 04.04.2022. 13:48 do 06.04.2022. 10:17 vrijednosti stagniraju, odnosno približno su jednake (slika 39.). Prva značajnija promjena vidljiva na rezultatima mjerenja je u periodu kada se dodala prva količina vode u uzorak, nakon čega vrijednost od 0,09 prelazi na vrijednost 0,19 u vremenu od 10:49 do 12:59.

Slikom 31 prikazani su rezultati mjerenja senzora Teros 12 i Teros 31 na dubini od 10 cm gledajući od dna posude prema njenom vrhu. U ovom slučaju senzori su postavljeni nešto više te puno ranije reagiraju na podražaj dodane vode. Senzor u vrijeme ugradnje 10:56 prikazuje vrijednost koja je jednaka 0,24. Promatrajući cjelokupni dijagram vidljivi su skokovi zatim stagnacija pri mjerenjima. Pojava skoka događa se u skladu s dodavanjem vode u posudu 4. Prvi skok u dijagramu zabilježen je 20.04.2022. u 19:39 čija vrijednost

iznosi 0,18. 22.04. dodana je nova količina vode nakon čega se vrijednost unutar dijagrama povećava na iznos od 0,21 u 15:27 sati.

Ista situacija ponavlja se i s mjerenjima senzora Teros 10. Oblik dijagrama jednak je mjerenjima prikazanim unutar dijagrama dobiven koristeći se rezultatima mjerenja Terosa 12.

Nadalje, Teros 21 (Slika 32) prikazuje većinom ujednoličine vrijednosti dijagrama. Dijagram kreće iz visoke negativne vrijednosti (-94,60 kPa) sve do vrijednosti kada se ona prvi puta ujednači što traje do trenutka ugradnje. Uzrok prikaza visoke negativne vrijednosti jer se senzor u tlo ugrađuje suh, a nekoliko dana ranije bio je na zraku u laboratorijskim uvjetima. Nakon ugradnje dijagram mjeri vrijednost u iznosu -29,00 u trenutku ugradnje te je u nastavku podjednaka. Teros 21 nije u mogućnosti izmjeriti niske vrijednosti sukcije koje su bliže pozitivnom kvadrantu zbog svog raspona mjerenja koji seže od 9 do 100 000 kPa.



Slika 32. Prikaz rezultata mjerenja posude 4 - Teros 21 ($h=5$ cm i $h=10$ cm)

4.3.3. Odnos matična sukcijska – vlažnost za ravnotežne uvjete u pokusu br. 4

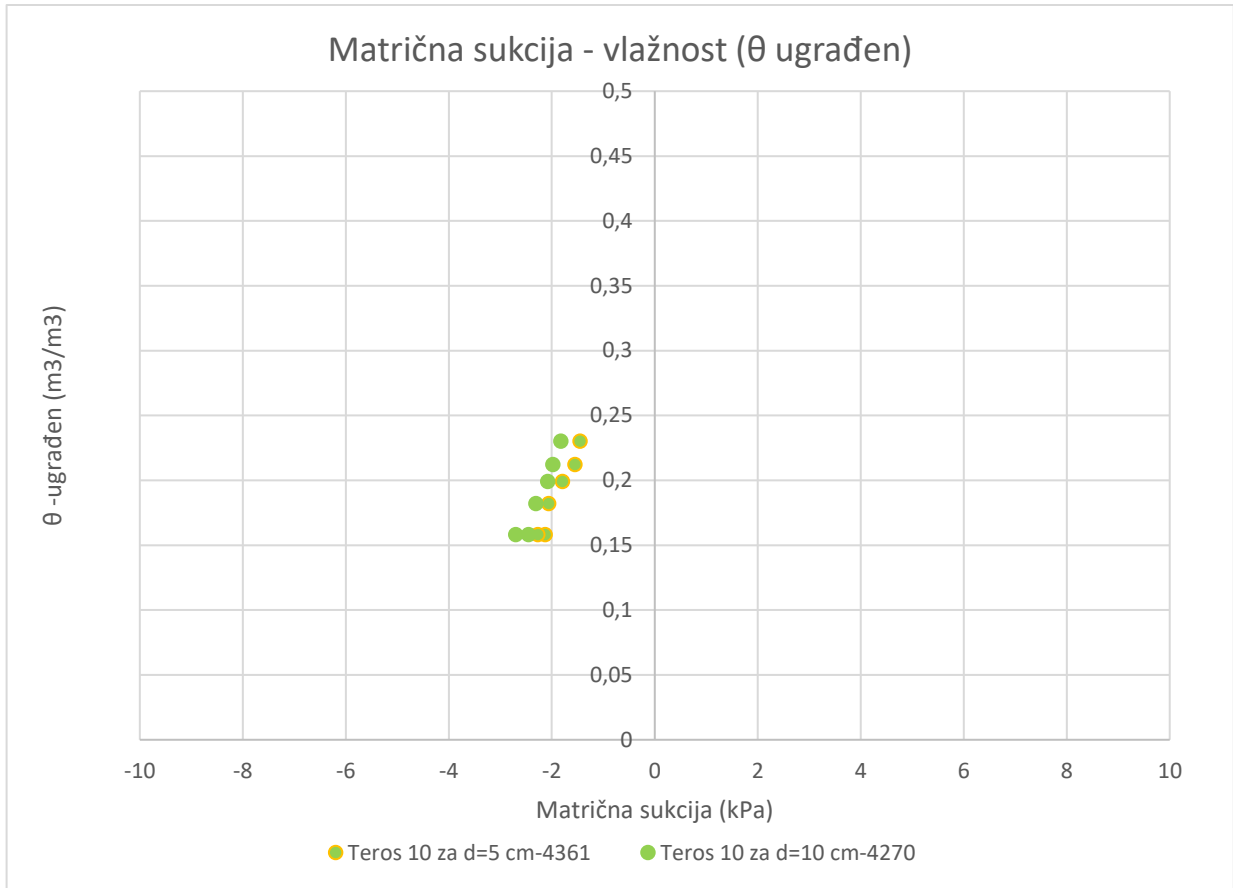
U nastavku prikazat će se ravnotežni odnosi između vlažnosti i sukcijske mjereni uređajima Teros 10, Teros 12 i Teros 31 koji su bili ugrađeni na visini od $h=5$ cm i $h=10$ cm (tablica 7., tablica 8. i tablica 9.). Rezultati su prikazani tablicama x do x i slikama x do x . Parametar θ definiran je za ugrađen materijal (Slika 33 i Slika 34) te u trenutku mjerenja (Slika 35). Mjereni parametri određeni su u trenutku dodavanja vode u posudu raspršujući je ravnomjerno po površini modela. Crvenom bojom označena je početna vlažnost i/ili stupanj saturacije mješavine dravskog pijeska i 10%-tnog kaolina.

Tablica 7. Podaci korišteni za dobivanje sukcijske krivulje - Teros 10 ($h=5$ cm)

VRIJEME	pwp	θ - mjeren	S	θ - ugrađen
05.04. 19:50	-39,76	0,082	15,2	0,071
06.04. 18:45	-2,13	0,199	33,6	0,158
10.04. 16:32	-2,27	0,199	33,6	0,158
20.04. 17:12	-2,06	0,201	38,8	0,182
21.04. 11:52	-1,79	0,21	42,34	0,199
21.04. 23:04	-1,55	0,226	45,18	0,212
22.04. 10:37	-1,45	0,233	48,94	0,23

Tablica 8. Podaci korišteni za dobivanje sukcijske krivulje - Teros 10 ($h=10$ cm)

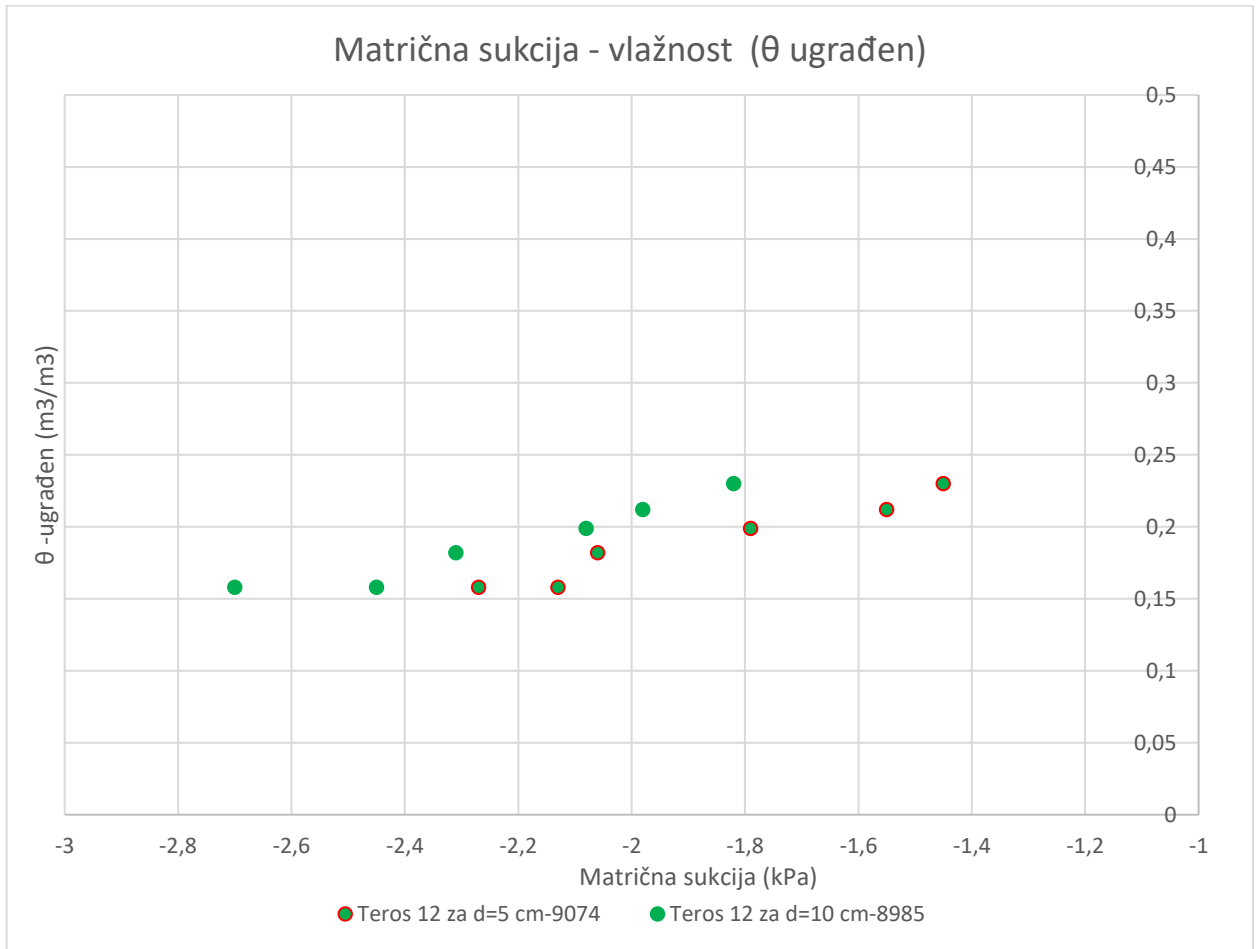
VRIJEME	pwp	θ - mjeren	S	θ - ugrađen
05.04. 19:50	-41,13	0,054	15,2	0,071
06.04. 18:45	-2,45	0,191	33,6	0,158
10.04. 16:32	-2,7	0,183	33,6	0,158
20.04. 17:12	-2,31	0,189	38,8	0,182
21.04. 11:52	-2,08	0,194	42,34	0,199
21.04. 23:04	-1,98	0,199	45,18	0,212
22.04. 10:37	-1,82	0,204	48,94	0,23



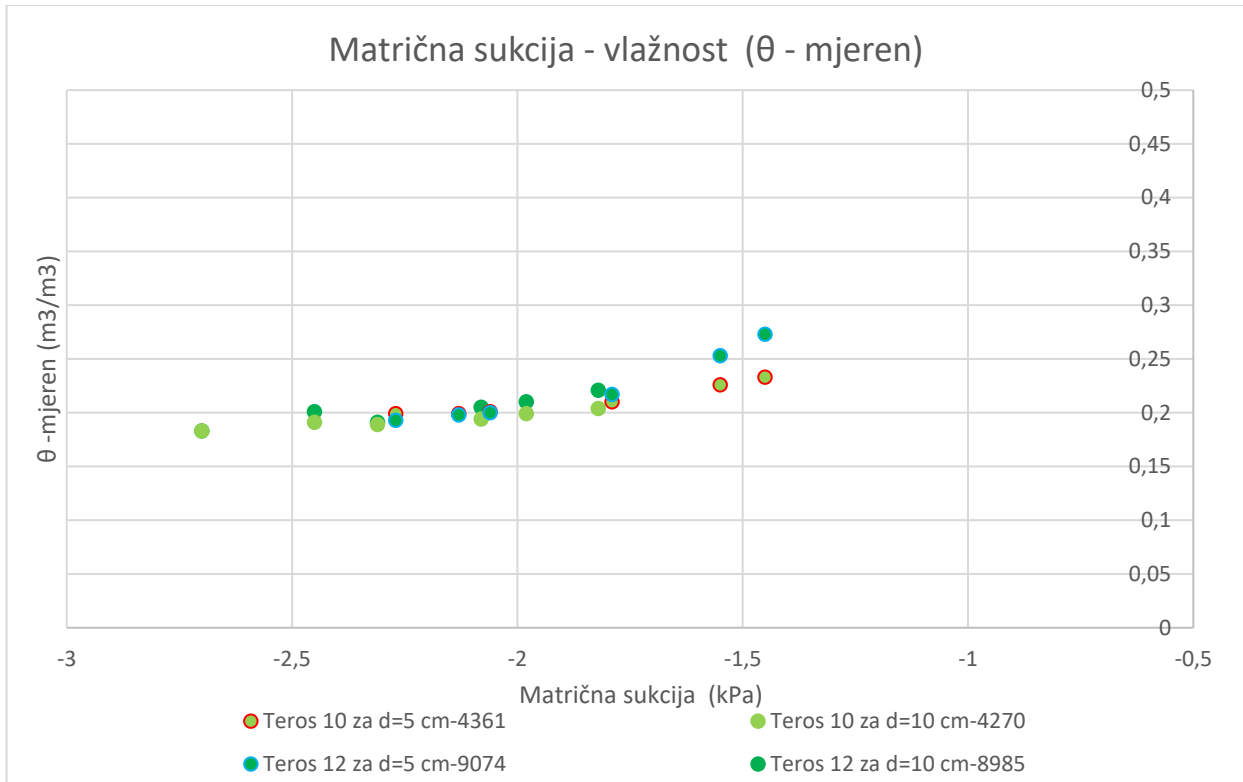
Slika 33. Saturacijska krivulja ugrađenog materijala mjereno Terosom 10 na visini $h=5$ cm i $h=10$ cm

Tablica 9. Podaci korišteni za dobivanje sukucijske krivulje - Teros 12

VRIJEME	pwp	θ - mjereno	θ - ugrađen
05.04. 19:50	-39,76	0,090	0,077
06.04. 18:45	-2,13	0,198	0,201
10.04. 16:32	-2,27	0,193	0,183
20.04. 17:12	-2,06	0,200	0,191
21.04. 11:52	-1,79	0,217	0,205
21.04. 23:04	-1,55	0,253	0,21
22.04. 10:37	-1,45	0,273	0,221



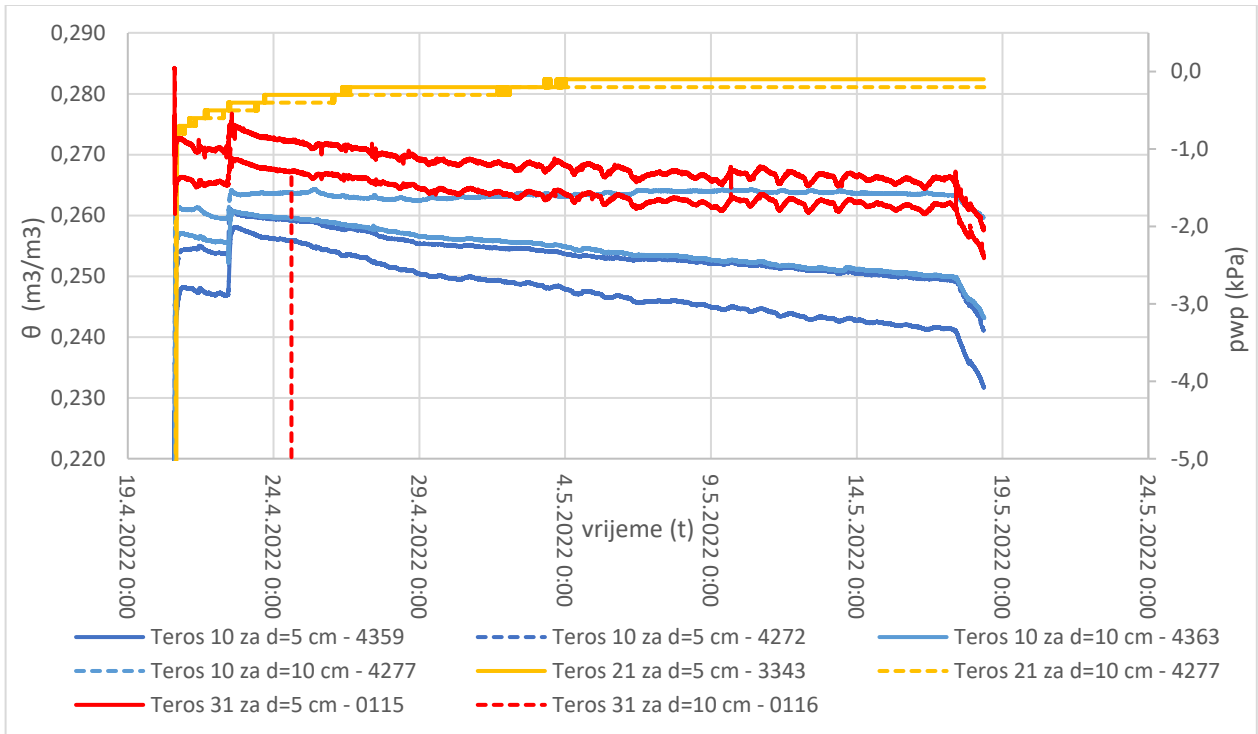
Slika 34. Saturacijska krivulja ugrađenog materijala mjereno Terosom 12 na visini $h=5$ cm i $h=10$ cm



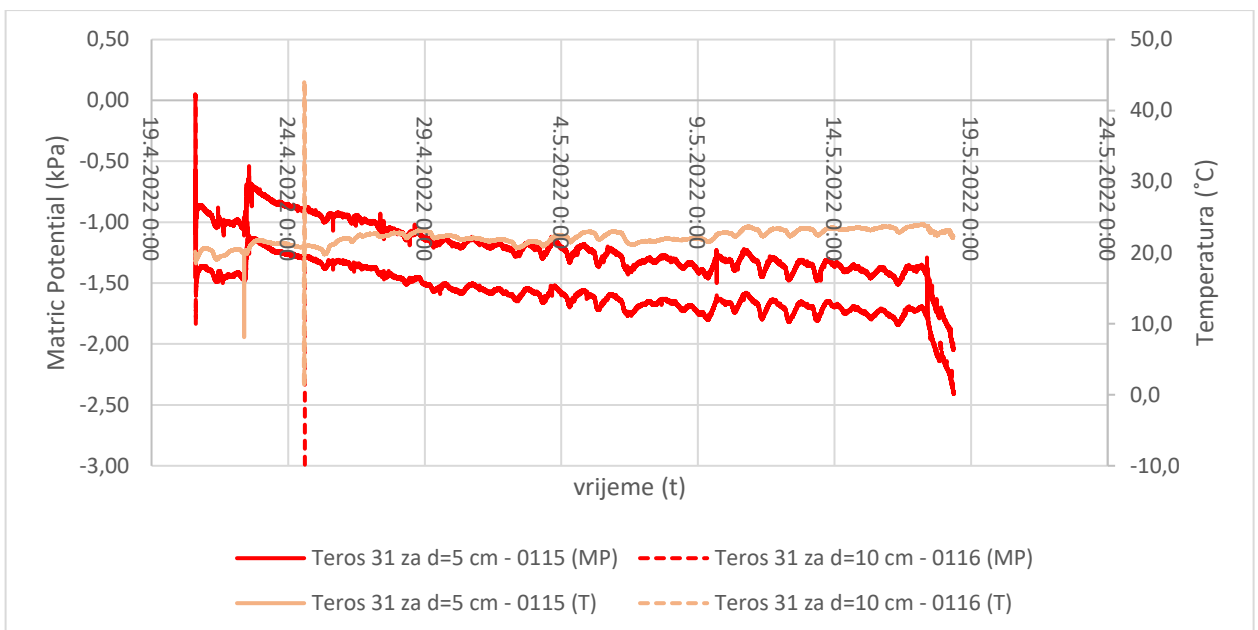
Slika 35. Saturacijska krivulja mjerenog materijala Terosom 10 i Terosom 12 - ($h=5$ cm i $h=10$ cm)

4.3.4. Prikaz rezultata mjerenja u posudi br. 3

Materijal unutar posude 3 ugradio se na stupanj saturacije koji je iznosio $S=50$ %. Pri ugradnji senzora, Teros 12 zamijenjen je senzorom Teros 10, promjena i utjecaj volumena na ugrađeni materijal je zanemaren. Važno je napomenuti kako su senzori na visini od $h=5$ cm ugrađeni na način da su polegnuti u materijal, dok su na visini od $h=10$ cm senzori vertikalno utisnuti u materijal. U nastavku prikazani su rezultati mjerenja svih senzora (Slika 36).

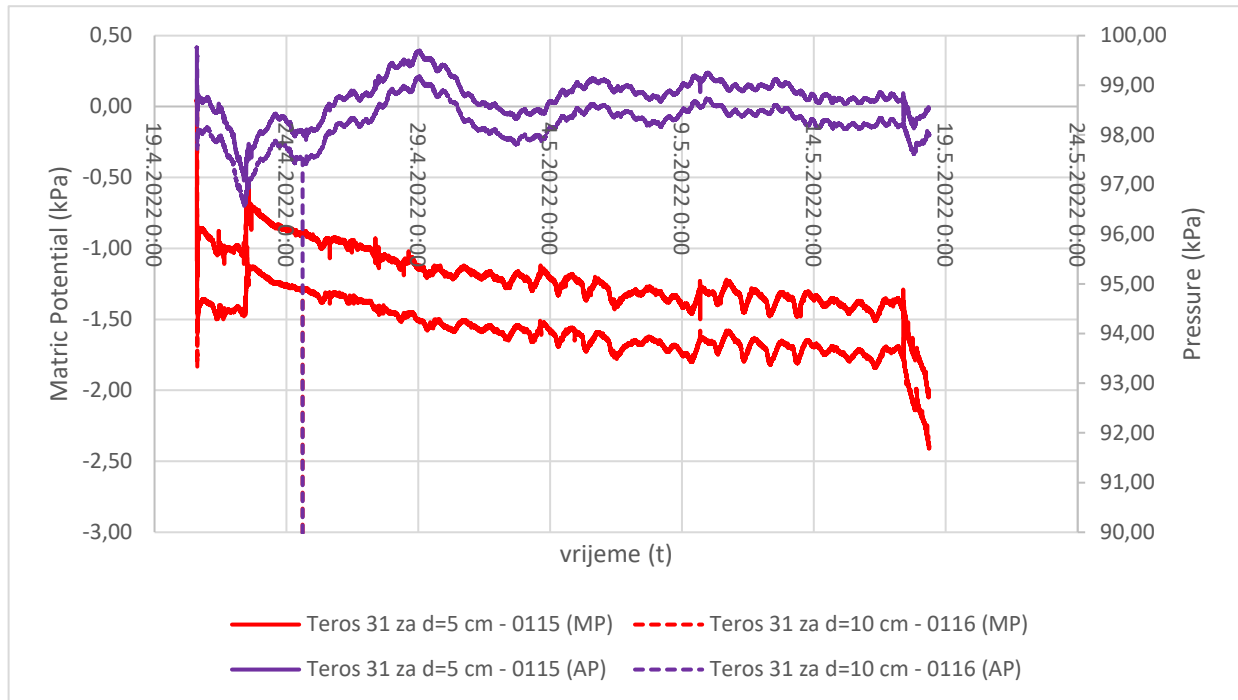


Slika 36. Prikaz rezultata mjerenja unutar posude 3



Slika 37. Rezultati mjerenja posude 3 - raspon temperatura

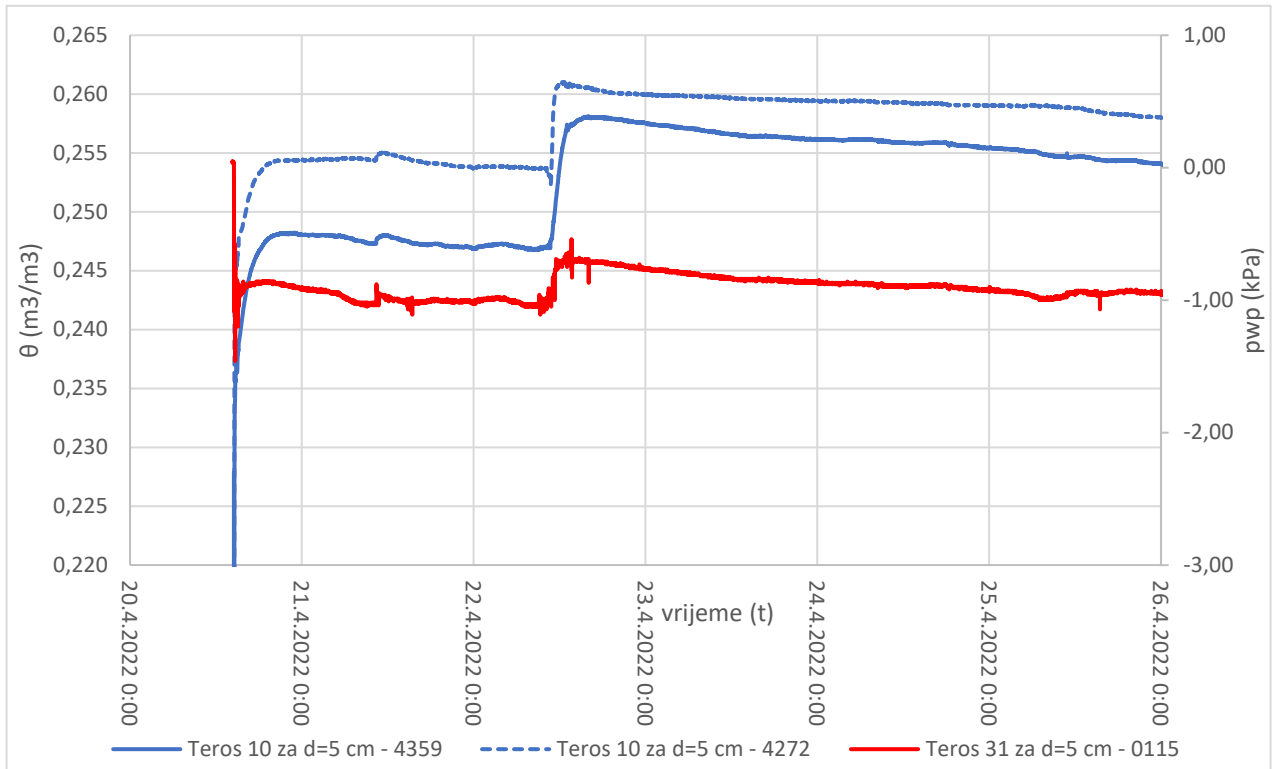
Dijagram prikazan na slici 37. prikazuje raspon izmjerenih temperatura u laboratoriju tijekom mjerenja. Temperature se kreću od izmjerenog minimuma koji iznosi 17 °C pa do maksimuma koji je 24 °C. Na slici 48. prikazani su rezultati izmjerenih apsolutnih pritisaka.



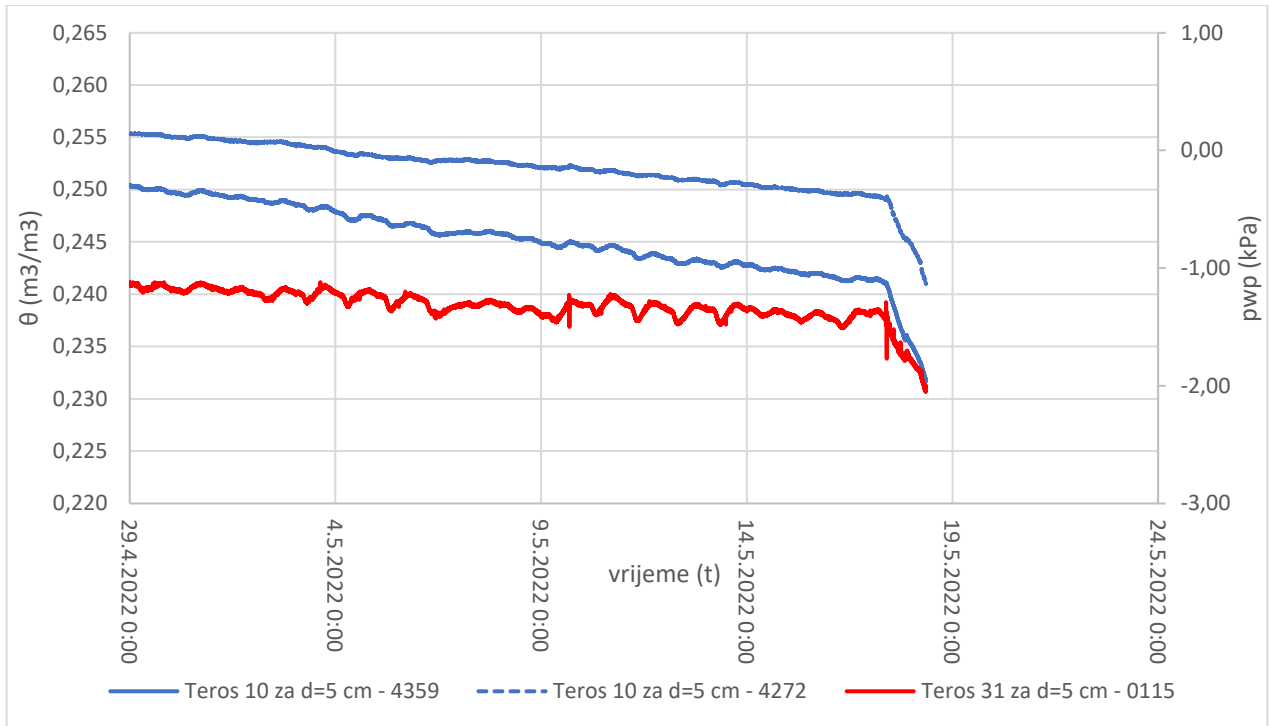
Slika 38. Rezultati mjerenja posude 3 - pritisak

4.3.5. Rezultati mjerenja senzora Teros 10 na dubini od $h=5$ cm i $h=10$ cm

Dana 20.04.2022. izrađena je posuda 3. Slikom 39 prikazani su rezultati mjerenja Teros 10 koji je ugrađen na dubini od 5 cm, gledajući od dna posude prema njenom vrhu. Teros 10 ugrađen je u 14:28 sati te je u tom trenutku izmjerena vrijednost -0,035, nakon čega dijagram prelazi u pozitivan kvadrant. Vrijednost se povećava na iznos koji je jednak 0,239 u 15:20 što je rezultat ekvibracije senzora. 20.04.2022. vrijednost zabilježena u 18:09 iznosi 0,247 te je poprilično konstanta sve do 22.04.2022 u 9:37 kada se prvi puta dodaje voda u posudu na način da se jednoliko raspršuje po cijeloj površini materijala. Na dijagramu se može uočiti uzlazna putanja kada se vrijednosti od 10:56 do 16:22 kreću od 0,248 do 0,258 te je nadalje model ostavljen u procesu prirodnog sušenja.



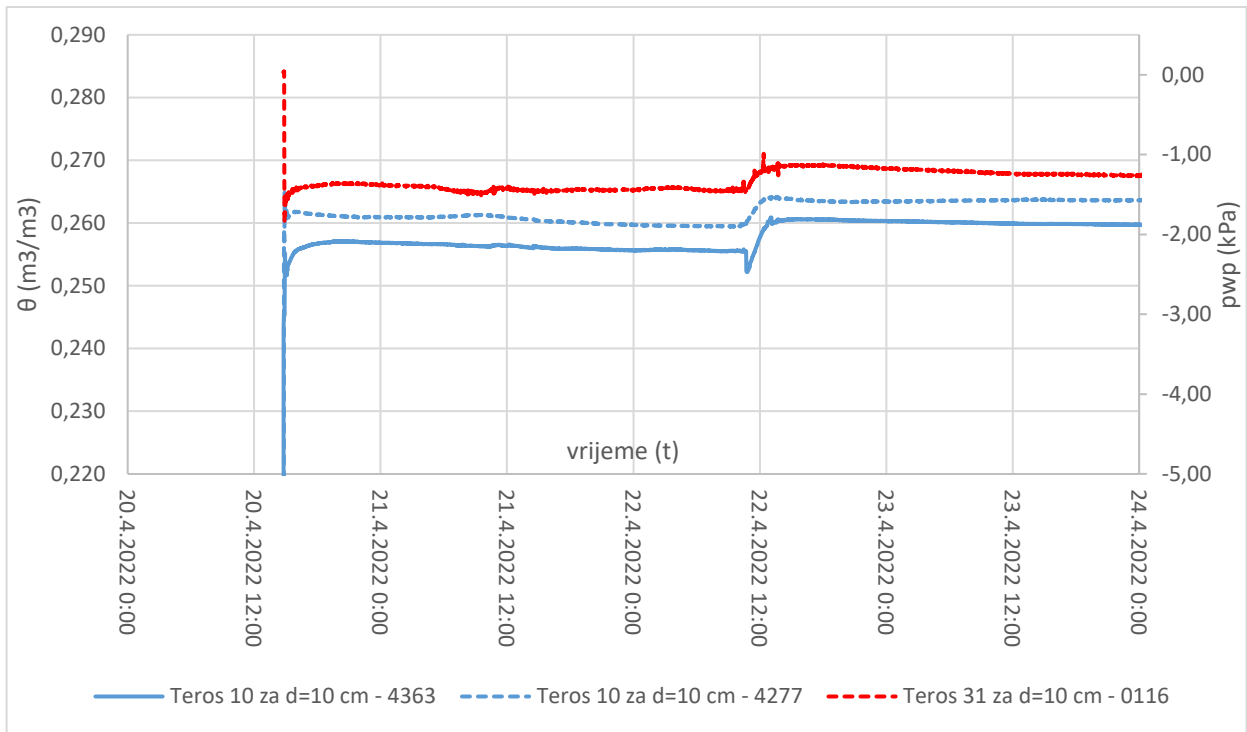
Slika 39. Prikaz rezultata mjerenja posude 3 - Teros 10 i Teros 31 ($h=5$ cm)



Slika 40. Prikaz rezultata mjerenja posude 3 – Teros 10 i Teros 31 ($h=5$ cm)

Rezultati mjerenja prikazani na Slici 39 i Slici 40 dani su za dva senzora Teros 10 koji su ugrađeni na dubini od 5 cm. Senzor se ugradio u 14:30 te je u tom trenutku zabilježena vrijednost senzora je iznosila -0,016 te nakon toga vrijednosti prelaze u pozitivan kvadrant u iznosu od 0,254, proces ekvibracije traje do vrijednosti 0,252 koja je zabilježena u 10:44. Nakon dodane vode u posudu, vrijednost se povećava na iznos koji je jednak 0,253 te porast vrijednosti traje do iznosa 0,260 z vremenu do 16:17 sati. Nakon tog perioda model je ostavljen u procesu prirodnog sušenja te je na dijagramu vidljiv pad vrijednosti kroz neko određeno vrijeme.

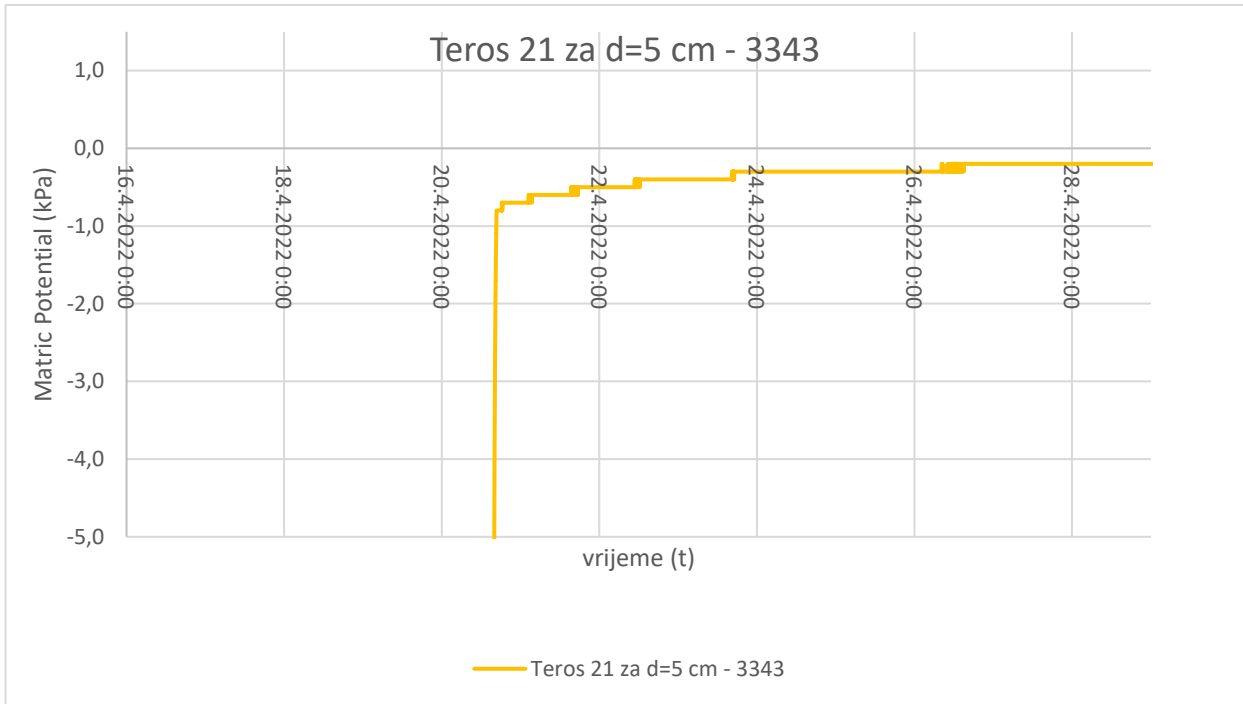
Ista situacija događa se sa sensorima koji su ugrađeni na visini od $h=10$ cm. Oblik i ponašanje modela vrlo je slično. Na Slici 41 prikazani su rezultati mjerenja posude 3 na visini od 10 cm. Jedan senzor ugrađen je u 14:47 dok je drugi ugrađen u 14:49. Može se primijetiti kako senzori na visini od 10 cm reagiraju ranije na promjene unutar materijala nego senzori na visini od 5 cm. U trenutku dodavanja vode u model vrijednosti rastu od 0,256 pa do vrijednosti 0,260, dok je u drugom slučaju situacija takva da vrijednosti rastu s 0,260 do 0,263.



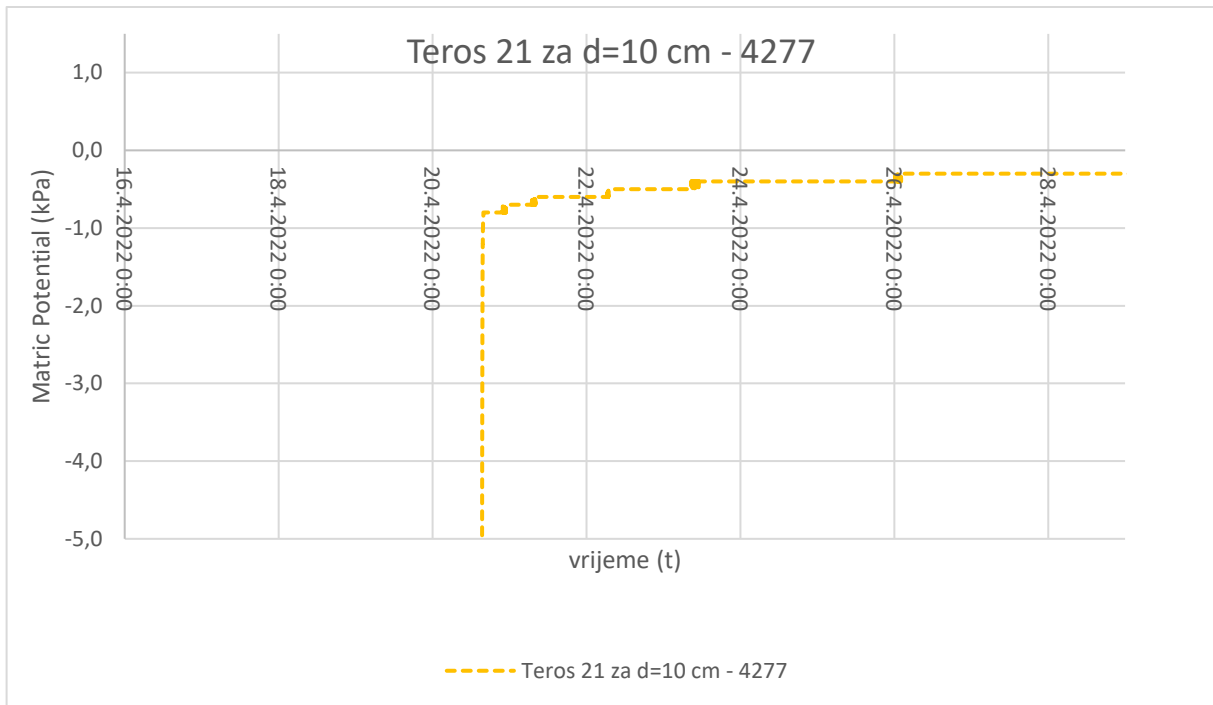
Slika 41. Prikaz rezultata mjerenja posude - Teros 10 i Teros 31 ($h=10$ cm)

Slikom 39 i Slikom 40 prikazani su rezultati mjerenja senzora Teros 10 i Teros 31 na dubini od 5 cm. Vrijeme ekvilibracije senzora Teros 31 traje od 20.04.2022., 14:31 kada vrijednost iznosi -1,46 kPa pa sve do 15:39 kada očitana vrijednost iznosi -0,95 kPa. Postupak ekvilibracije je isti kao i pri ugradnji Terosa 31 u posudu 4. Sljedećom fotografijom 53. na kojoj su prikazani rezultati mjerenja senzora Teros 31 na dubini od 10 cm, situacija je vrlo slična, proces ekvilibracije senzora traje od 14:53 kada vrijednost iznosi -1,84 kPa pa do 15:18 gdje očitana vrijednost iznosi -1,51 kPa. Postupkom ekvilibracije u ovom slučaju je i prilagodba senzora materijalu, odnosno trenutak do kada vrijednosti počinju biti približno jednake. U oba dijagrama vidljiv je pad vrijednosti s vremenom što se događa zbog prirodnog procesa sušenja materijala.

Što se tiče senzora Teros 21, on nije u mogućnosti dati točne i precizne vrijednosti sve dok tlak ne padne ispod 10 kPa prema kojem on može bilježiti i prikupljati podatke. Stoga rezultati ovog dijagrama nisu referentni pa se neće zasebno obrađivati (Slika 42 i Slika 43).



Slika 42. Prikaz rezultata mjerenja unutar posude 3 - Teros 21 ($h=5$ cm)



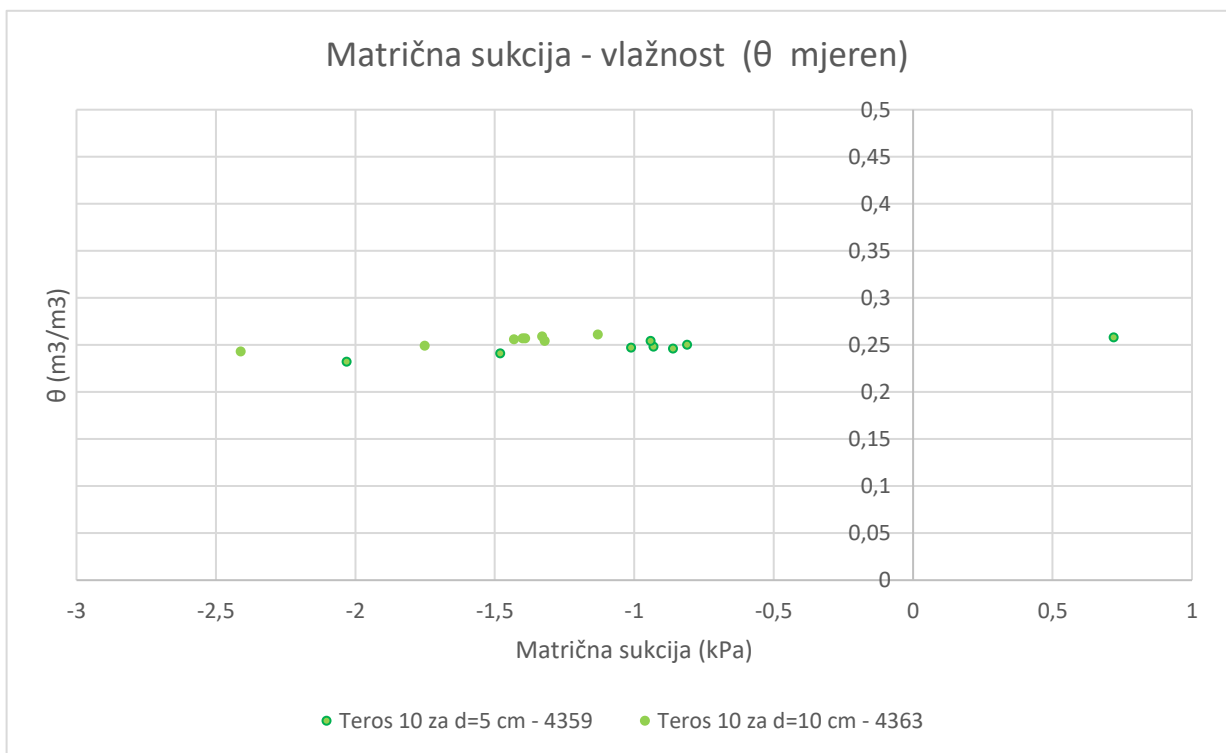
Slika 43. Prikaz rezultata mjerenja unutar posude 3 - Teros 21 ($h=10$ cm)

4.3.6. Odnos matrična sukcijska – vlažnost za ravnotežne uvjete u posudi br.3

U nastavku prikazat će se parovi (tablica 10., tablica 11. i tablica 12.) na temelju kojih je dobivena sukcijska krivulja materijala (Slika 44., Slika 45., i Slika 46.). Vrijednosti su određene za vrijeme mjerenja, te vrijednosti ugrađenog materijala. Posuda 3 izrađena je s poprilično visokim stupnjem saturacije koji je iznosio $S=50\%$ nakon čega je 22.04.2022. dodana količina nova količina vode 158,80 g. Novo dodavanje vode utječe na promjenu saturacije uzorka koja će iznositi $S=52,91\%$. Zbog veće saturacije i dodavanja vode uočava se nešto veće slijeganje koje iznosi 11,86 mm. Na temelju slijeganja proračunate su nove komponente – volumen pora, ukupni volumen i volumen vode kako bi se dobila točnija i referentnija saturacijska krivulja. U nastavku dane su tablice parova θ i pwp te su prikazani dijagrami saturacijske krivulje dobivene mjerenjima Teros 10 i Teros 31 na dubini od $h=5$ cm i $h=10$ cm.

Tablica 10. Podaci mjerenja potrebni za dobivanje saturacijske krivulje – ugrađen Teros 10 i Teros 31
31

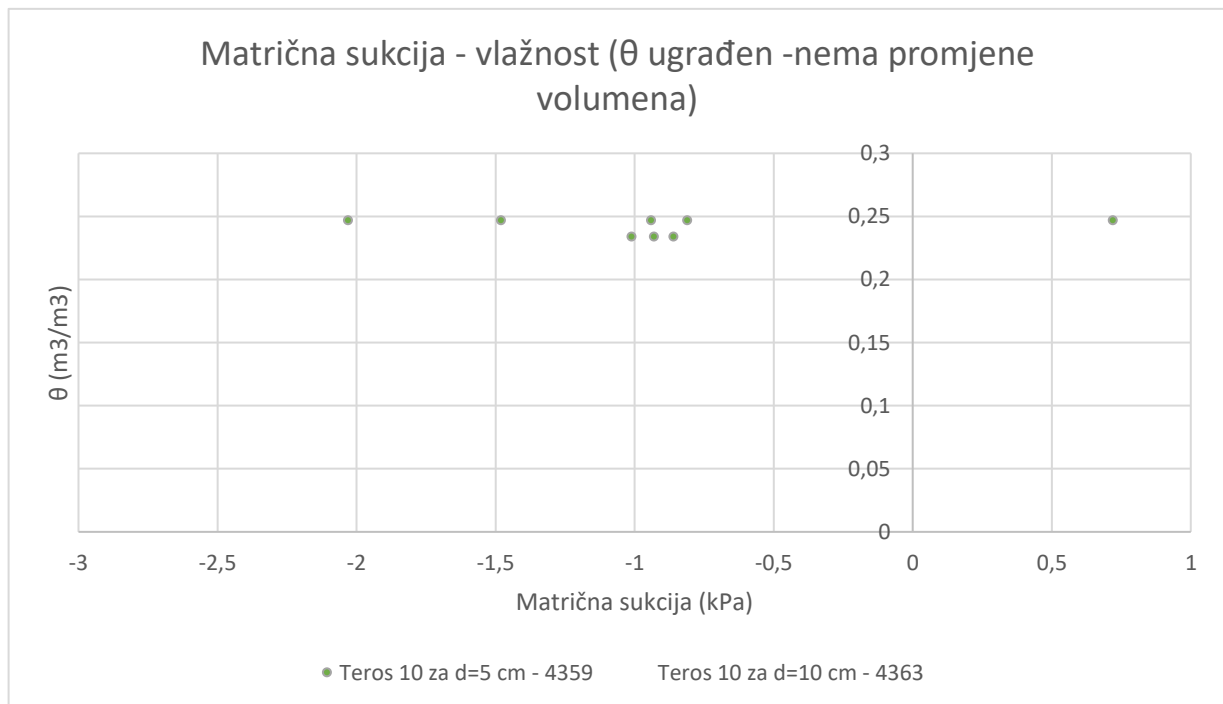
Teros 10 i Teros 31 na dubini od 5 cm			Teros 10 i Teros 31 na dubini od 10 cm		
VRIJEME	pwp	θ - mjeren	VRIJEME	pwp	θ - mjeren
20.04.2022. 17:37	-0,86	0,246	20.04.2022. 17:37	-1,4	0,257
21.04.2022. 1:46	-0,93	0,248	21.04.2022. 1:46	-1,39	0,257
22.04.2022. 5:07	-1,01	0,247	22.04.2022. 5:07	-1,43	0,256
22.04.2022. 11:15	-0,81	0,25	22.04.2022. 11:15	-1,32	0,254
25.04.2022. 17:18	0,72	0,258	25.04.2022. 17:18	-1,13	0,261
25.04.2022. 22:24	-0,94	0,254	25.04.2022. 22:24	-1,33	0,259
17.05.2022. 9:37	-1,48	0,241	17.05.2022. 9:37	-1,75	0,249
18.05.2022. 8:32	-2,03	0,232	18.05.2022. 8:32	-2,41	0,243



Slika 44. Saturacijska krivulja mjenog materijala – Teros 10 na visini $h=5$ cm i $h=10$ cm

Tablica 11. Podaci mjerenja potrebni za dobivanje saturacijske krivulje – Teros 10 i Teros 31 – ugrađen (h=5 cm i h=10 cm)

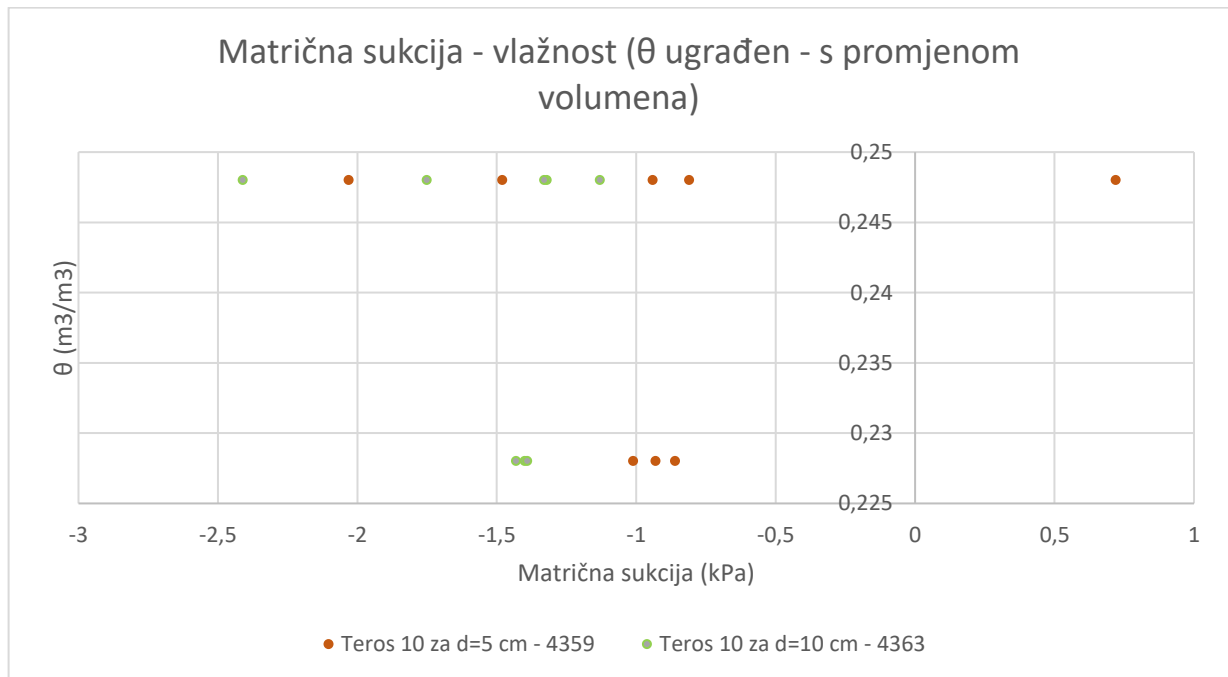
Teros 10 i Teros 31 na dubini od 5 cm			Teros 10 i Teros 31 na dubini od 10 cm		
VRIJEME	pwp	θ - ugrađen	VRIJEME	pwp	θ - ugrađen
20.04.2022. 17:37	-0,86	0,234	20.04.2022. 17:37	-1,4	0,234
21.04.2022. 1:46	-0,93	0,234	21.04.2022. 1:46	-1,39	0,234
22.04.2022. 5:07	-1,01	0,234	22.04.2022. 5:07	-1,43	0,234
22.04.2022. 11:15	-0,81	0,247	22.04.2022. 11:15	-1,32	0,247
25.04.2022. 17:18	0,72	0,247	25.04.2022. 17:18	-1,13	0,247
25.04.2022. 22:24	-0,94	0,247	25.04.2022. 22:24	-1,33	0,247
17.05.2022. 9:37	-1,48	0,247	17.05.2022. 9:37	-1,75	0,247
18.05.2022. 8:32	-2,03	0,247	18.05.2022. 8:32	-2,41	0,247



Slika 45. Saturacijska krivulja ugrađenog materijala - Teros 10 na visini h=5 cm i h=10 cm

Tablica 12. Podaci mjerenja potrebni za dobivanje saturacijske krivulje zbog promjene volumena - Teros 10 i Teros 31 (h=5 cm i h=10 cm)

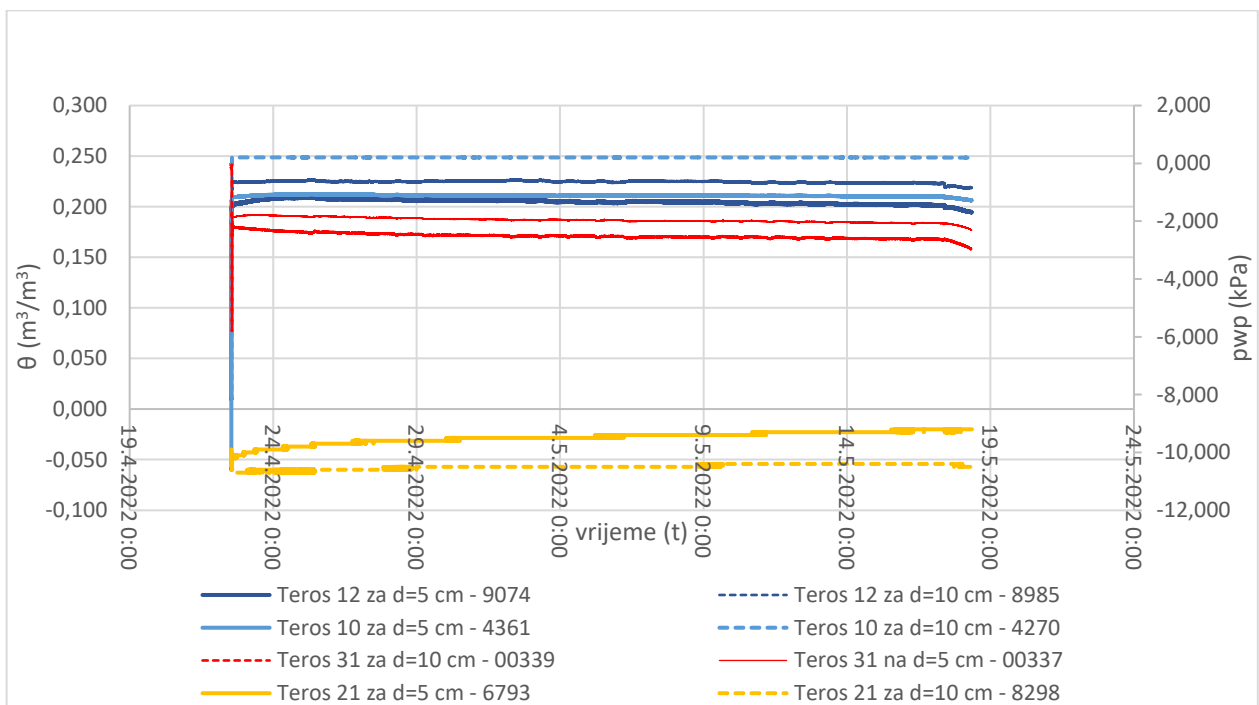
Teros 10 i Teros 31 na dubini od 5 cm			Teros 10 i Teros 31 na dubini od 10 cm		
VRIJEME	pwp	θ	VRIJEME	pwp	θ
20.04.2022. 17:37	-0,86	0,228	20.04.2022. 17:37	-1,4	0,228
21.04.2022. 1:46	-0,93	0,228	21.04.2022. 1:46	-1,39	0,228
22.04.2022. 5:07	-1,01	0,228	22.04.2022. 5:07	-1,43	0,228
22.04.2022. 11:15	-0,81	0,248	22.04.2022. 11:15	-1,32	0,248
25.04.2022. 17:18	0,72	0,248	25.04.2022. 17:18	-1,13	0,248
25.04.2022. 22:24	-0,94	0,248	25.04.2022. 22:24	-1,33	0,248
17.05.2022. 9:37	-1,48	0,248	17.05.2022. 9:37	-1,75	0,248
18.05.2022. 8:32	-2,03	0,248	18.05.2022. 8:32	-2,41	0,248



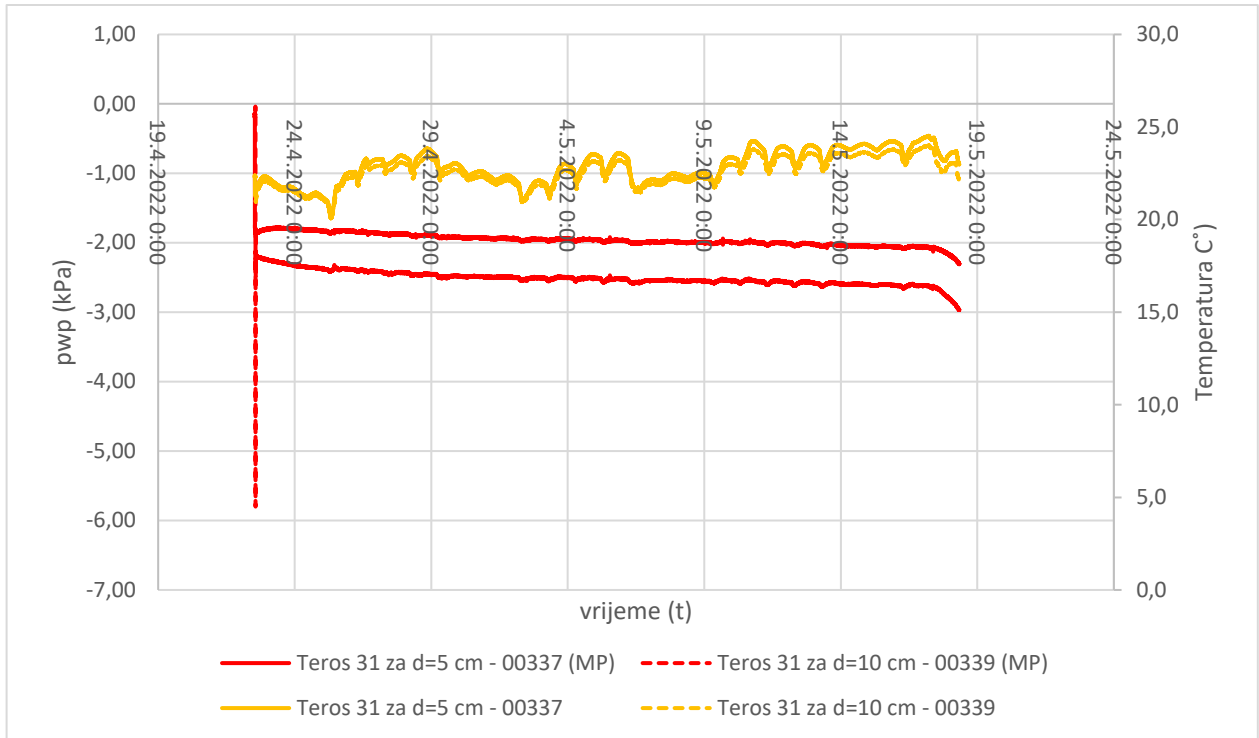
Slika 46. Saturacijska krivulja dobivena sukladno promjenom volumena unutar posude 3

4.3.7. Prikaz rezultata mjerenja posude 2

Posuda 2 izrađivala se posljednja, 22.04.2022. Materijal je zamiješan na stupanj saturacije koji je iznosio $S=35\%$. Senzori na dubini 5 cm ugrađeni su na način da su polegnuti materijal te površinski zatrpani. Na dubini od 10 cm senzori su vertikalno utisnuti u materijal. U posudu 2 tijekom provedbe pokusa voda nije dodavana. Senzori koji su ugrađivani u posudu 2, prije ugradnje bili su instalirani u posudu 4 koja je netom prije raskopana. U nastavku prikazani su cjelokupni rezultati mjerenja unutar posude 2 (Slika 47) te promjena temperatura (Slika 48) i tlakova (Slika 49).

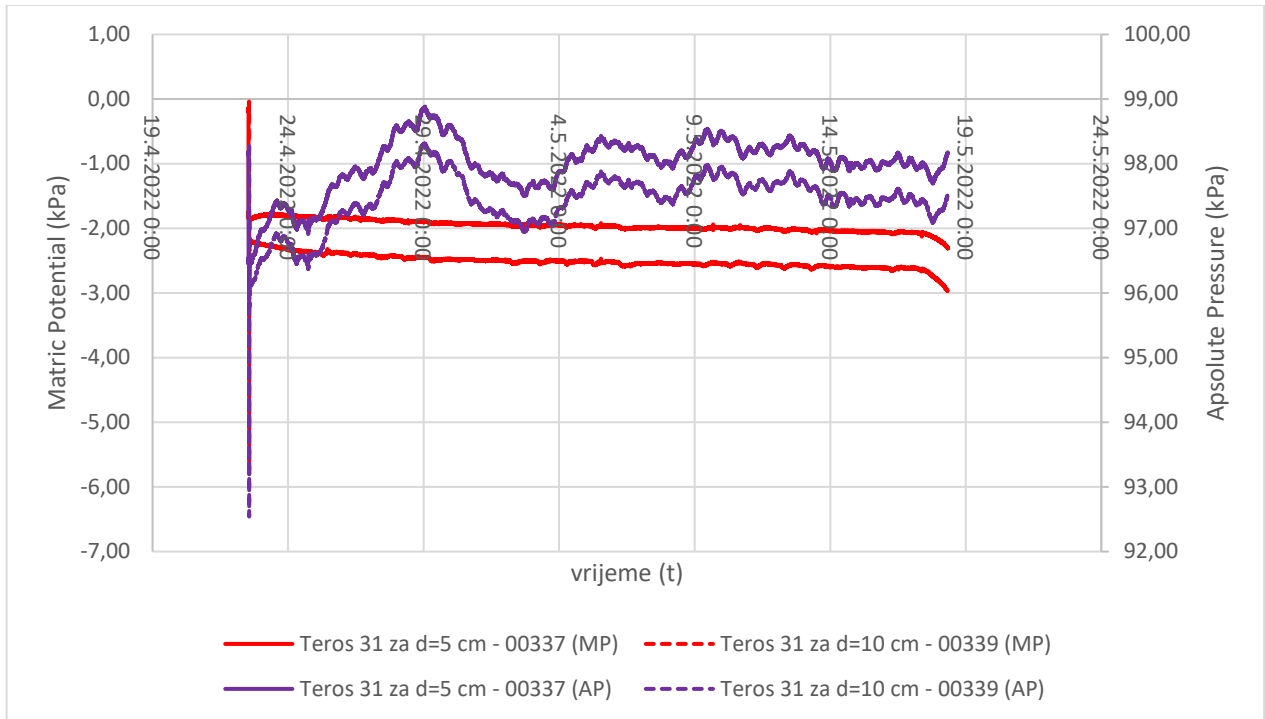


Slika 47. Prikaz rezultata mjerenja unutar posude 2



Slika 48. Prikaz rezultata mjerenja posude 2 - raspon temperatura

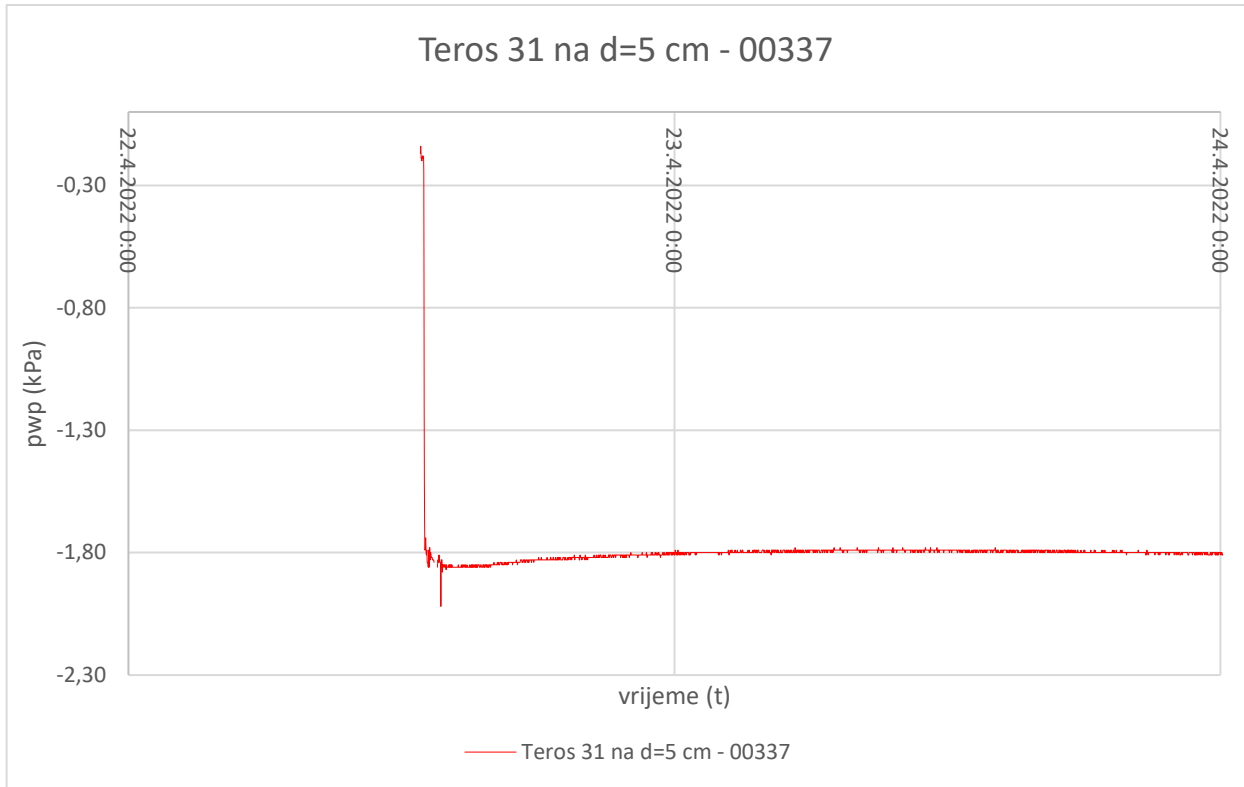
Temperatura unutar materijala, kao i u prethodna dva slučaja ne oscilira u velikim vrijednostima. Najniža zabilježena temperatura je 20,1 °C, dok je najviša izmjerena temperatura iznosila 24,9 °C.



Slika 49. Prikaz rezultata mjerenja - raspon tlakova

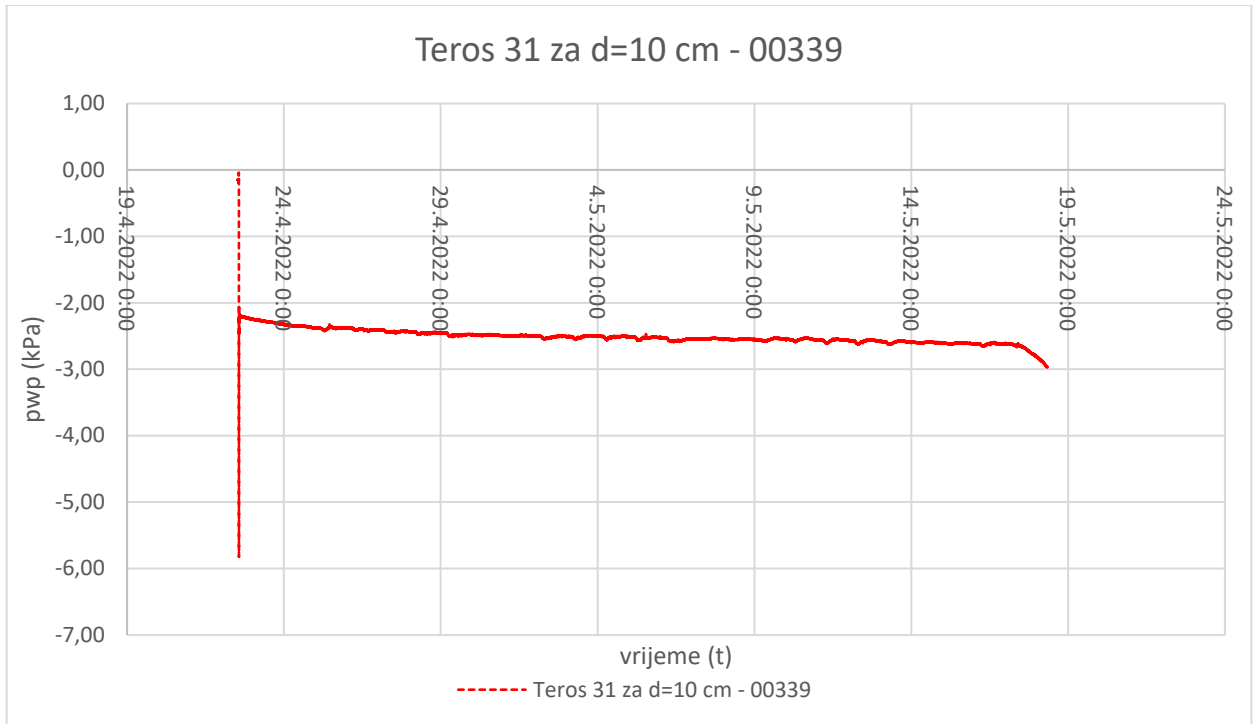
Što se tiče promjena tlakova vrijednosti su se uglavnom kretale između 99 i 97 kPa za senzor ugrađen na dubini od 5 cm, gledano od dna posude prema njenom vrhu, dok promjene senzora ugrađenog na visini od 10 cm kreću u intervalima od 98 do 97,5 kPa.

S obzirom da je senzor nakon demontiranja iz posude 4 odmah stavljen u vodu, većih promjena nema. Vrijednost u vrijeme ugradnje senzora u 12:58 sati iznosi -0,18 kPa (Slika 50) U 13:12 sati očitana vrijednost iznosi -1,79 kPa čime započinje kratki proces ekvilibracije odnosno promjene okoline senzora (iz vode ugrađuje se u tlo stupnja saturacije u iznosu od $S=35\%$). Proces ekvilibracije traje do 13:52 sati kada očitana vrijednost iznosi -1,58. Nadalje, s obzirom da u model voda nije dodava može se zamijetiti postupak isparavanja vode odnosno prirodnog sušenja materijala kada se vrijednosti kroz vrijeme spuštaju u veći negativan kvadrant.



Slika 50. rezultati mjerenja posude 2 - Teros 31 ($h=5$ cm)

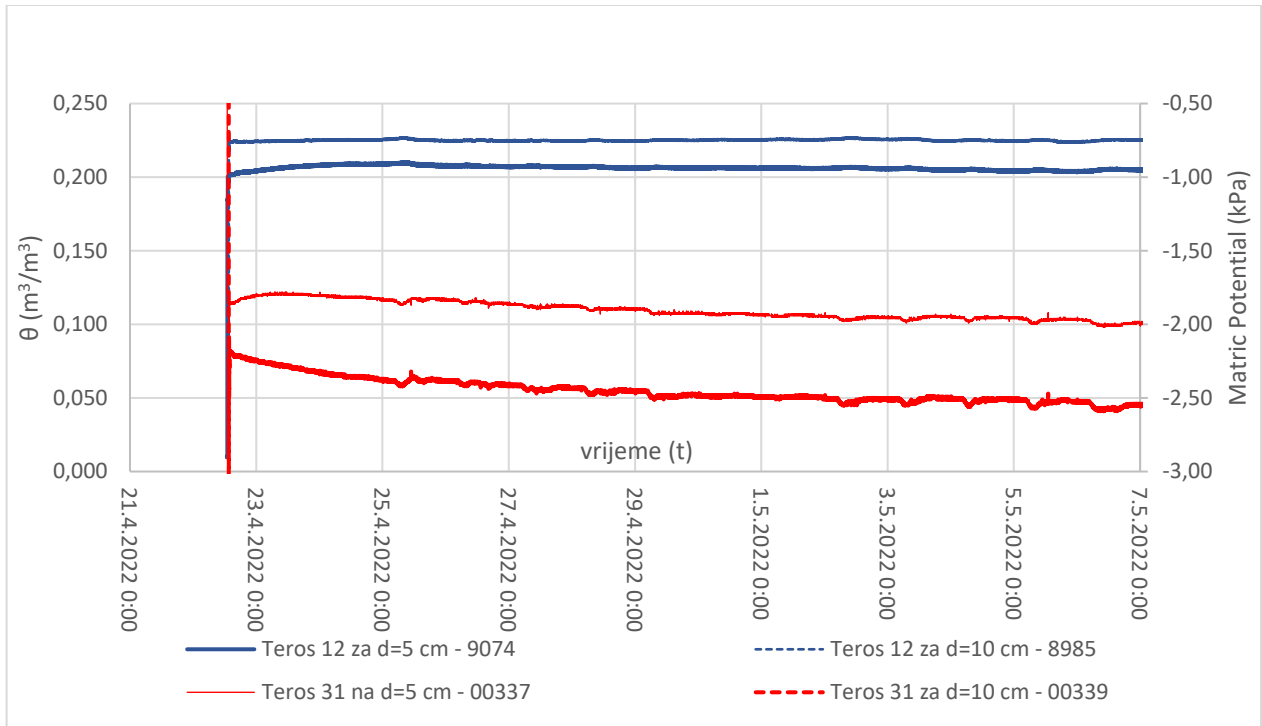
Teros 31 (Slika 51) na dubini od 10 cm ugrađen je 13:29 sati te netom ranije, u 13:25 sati vrijednost iznosi -0,13. Do vremena 13:34 sati, vrijednost navedena ranije je konstanta. U tom trenutku zabilježena je veća promjena koja iznosi - 5,80 kPa. Posljednja i ujedno veća promjena događa se u 13:35 kada vrijednost iznosi -2,23 kPa. Na ovom dijagramu, također se može zamijetiti silazna putanja dijagrama što se događa zbog procesa isparavanja vode te sušenja materijala.



Slika 51. Rezultati mjerenja posude 2 - Teros 31 ($h=10$ cm)

4.3.8. Prikaz rezultata mjerenja senzora Teros 31 u kombinaciji s ostalim sensorima na dubini $h=5$ cm i $h=10$ cm

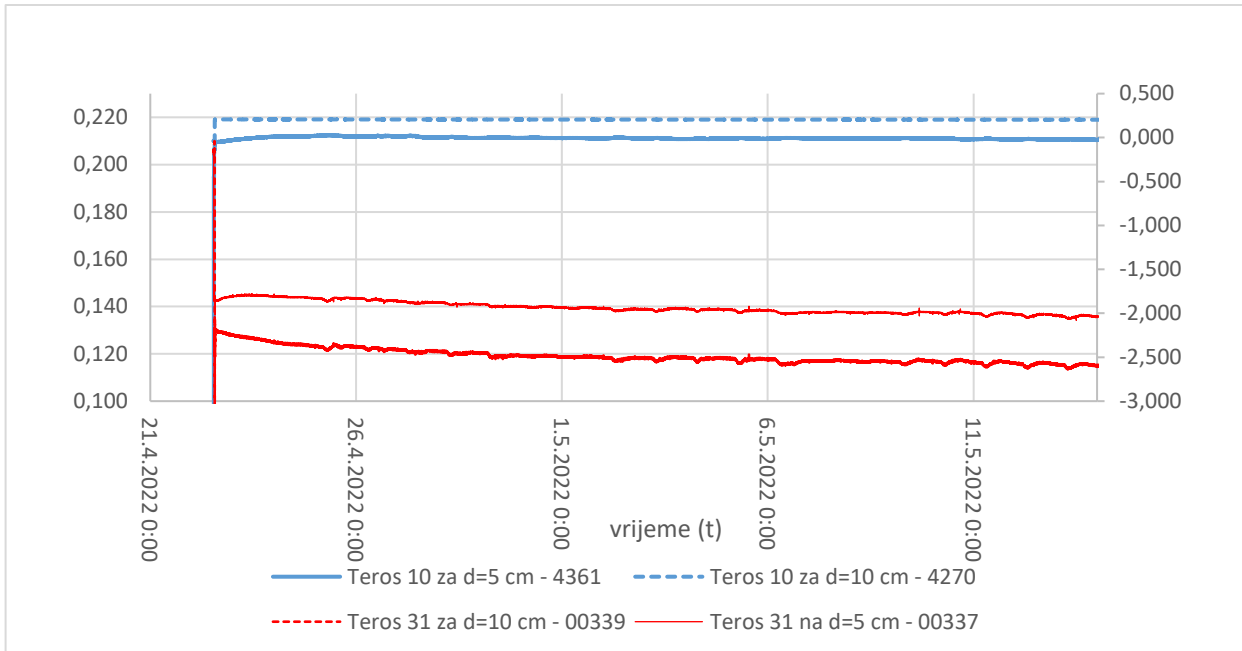
Senzor Teros 12 na dubini od 5 cm (Slika 52) u vrijeme kad je ugrađen 13:01 bilježi vrijednost koja je jednaka 0,185 te u vrijeme 15:54 dolazi do vrijednosti koja je jednaka 0,202 što se može poistovjetiti postupku ekvilibriranja senzora. Maksimalna zabilježena vrijednost je 24.04.2022. u 14:52 sati te iznosi $0,209 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Do 23:11 sati vrijednost dijagrama je konstanta te promjene u tom periodu nisu zabilježene, no u nastavku promatranja dijagram ima silaznu putanju zbog isparavanja određene količine vode i sušenja materijala ugrađenog u posudu 2.



Slika 52. Prikaz rezultata mjerenja posude 2 - Teros 12 i Teros 31 ($h=5$ cm i $h=10$ cm)

Teros 12 na dubinu od 10 cm ugrađen je u vremenu 13:31 sati. Promjene unutar dijagrama ranije su vidljive na senzoru koji je ugrađen u više slojeve materijala jer opće je poznato kako se materijal na površini suši većom brzinom nego slojevi na većim dubinama. Dijagram (Slika 52) prikazuje rezultate senzora prikazuje u poprilično ujednačenom putanjom bez većih promjena, dok dijagram Terosa 31 sadrži oscilirajuće podatke na temelju kojih se može zaključiti kako pedantnije i puno detaljnije prikuplja i bilježi postojeće promjene.

Teros 10 na dubinu od 5 cm, gledano od dna posude prema njenom vrhu ugrađen je u 13:04 sati te u tom trenutku zabilježena vrijednost iznosi 0,162, proces ekvilibracije traje do 14:55 nakon čega vrijednost raste do iznosa 0,210 – granice vertikalne dijagrama (slika 53). U daljnjem procesu promatranja materijala, vrijednost dijagrama opada do iznosa 0,206 u 7:41 na dan 18.05.2022.



Slika 53. Prikaz rezultata mjerenja posude 2 - Teros 10 i Teros 31 ($h=5$ cm i $h=10$ cm)

Senzor Teros 10 (Slika 53) na dubini od 10 cm ponaša gotovo identično. Senzor je ugrađen u 13:33 te prikazuje vrijednost koja iznosi $0,190 \text{ m}^3/\text{m}^3$. Krajnja vrijednost na vidljivoj vertikali seže do 0,198 što je bilježeno 22.04.2022. u 13:37 sati. U daljnjem razvitku pokusa vrijednosti su uglavnom konstantne te lom na kraju dijagrama iznosi 0,197 u 7:41 sati na dan 18.05.2022.

Rezultati senzora Teros 21 nisu referentni, tlak nije pao ispod 10 kPa te senzor zbog navedenog razloga nije u mogućnosti prikupiti i dati formalne rezultate koji bi se mogli razmotriti.

5. PROVEDBA POKUSA 5

Cilj izrade prethodno opisanih laboratorijskih pokusa te izrada modela bila bi projicirati količinu ugrađene vode te količinu naknadno dodane vode unutar posuda, u oblik umjetne padaline koja se izaziva pomoću simulatora oborina na umanjeni model klizišta, izrađen u geotehničkom laboratoriju Građevinskog fakulteta u Rijeci.

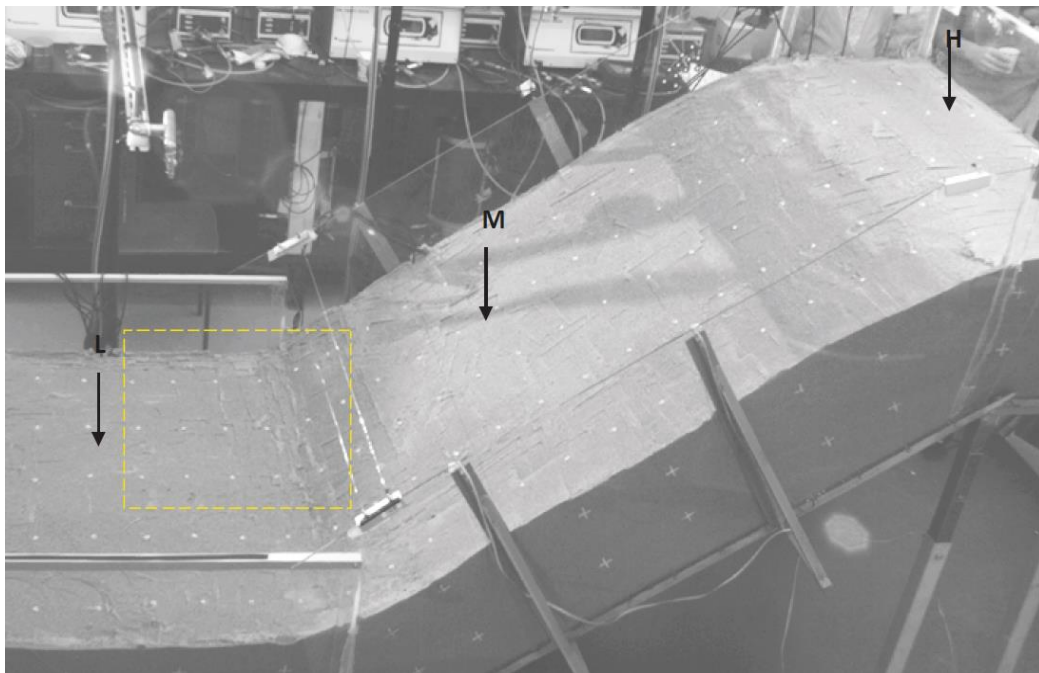
Naime, količina ugrađene vode u svaku određenu posudu razlikuje se s obzirom na početno određenu vlažnost ili stupanj saturacije. Naknadno, tijekom prikupljanja podataka i obrade istih, unutar posuda dodaje se nova količina vode, koja se ravnomjerno i jednoliko raspoređuje na površini modela. Nova količina vode dodaje se uz pomoć prskalice što se poistovjećuje s oborinom. Količina dodane vode ovisi o novo određenom stupnju vlažnosti ili saturacije. Dodana voda u posude s vremenom infiltrira te se sensorima bilježi svaka promjena unutar tla.

Promjene koje prikupljaju senzori obradit će se u posebnom poglavlju. Osim promatranja promjena tla pri svakom novom dodavanju vode u cilju je iz dobivenih rezultata kalibracije senzora dobiti odnose vlažnosti i pornih pritisaka. Dobiveni rezultati korisni su za interpretaciju mjerenja umanjenog fizikalnog modela, gdje se vlažnost materijala povećava korištenjem simulatora oborina. Također, važno je rezultate poistovjetiti umanjenom modelu klizišta te međusobno usporediti i definirati različitosti pojedinih mjerenja te ukoliko postoje mane pri prikupljanju i mjerenju podataka ukazati na njih. Osim toga, promatra se i ponašanje ugrađenog materijala (mješavine dravskog pijeska i 10% kaolina) u smislu pojave slijeganja ili deformacija prilikom dodavanja vode u posude. U konačnici, dobiveni rezultati koristiti će se za određivanje recenzijskih značajki materijala, odnosno definiranje retencijske krivulje.

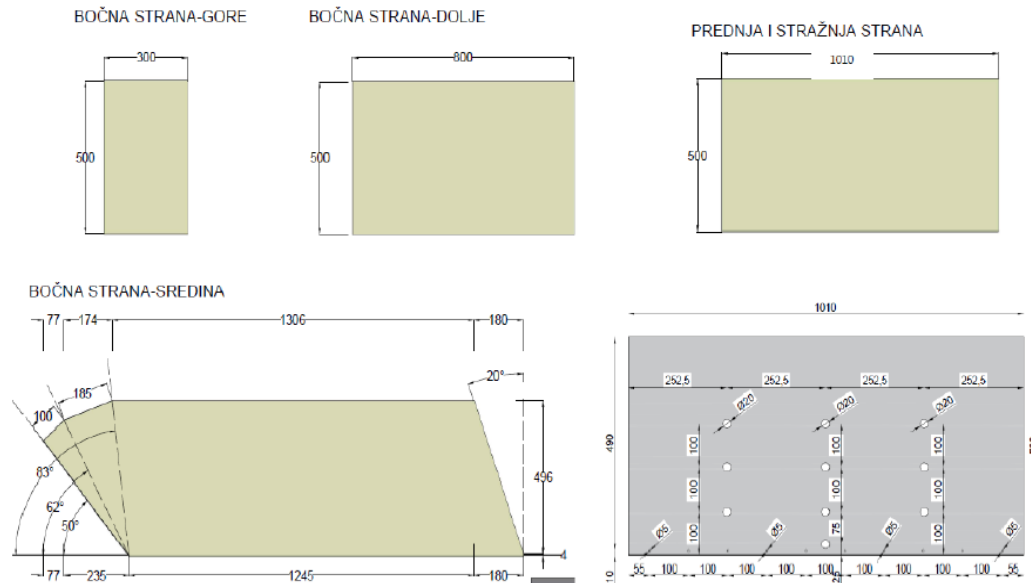
5.1. Fizikalni model klizišta

Umanjeni statički modeli klizišta u laboratoriju izrađuje se korištenjem platforme opisane u poglavlju 3. Stranice kalupa izrađene su od pleksiglasa kako bi se dobio detaljniji uvid u unutrašnjost samog modela. Materijal koji se ugrađivao u peti izrađen model je mješavina dravskog pijeska i 10% kaolina čije su značajke dane u prethodnim poglavljima. Materijal se ugrađivao pod kutom koji iznosi 35° s početnom vlažnosti koja iznosi ukupno $w=5\%$. Prije ugradnje materijala potrebno je zamiješati materijal korištenjem recepture unutar koje su izračunate količine vode. Također, za svaki segment umanjenog fizikalnog modela potrebno je pripremiti određenu masu materijala. Mješavina pijeska i kaolina ugrađena je u model u pet slojeva, debljine 6 cm do njegove ukupne visine koja iznosi 30 cm. Svaki sloj materijala zbija se ručnim nabijačem do srednje gustih uvjeta relativne gustoće $D=50\%$.

Cjelokupni model podijeljen je na tri segmenta odnosno na gornji i najviši dio padine (H), srednji dio padine (M) te donji i najniži dio padine (L) što je prikazano Slikom 54. Također na Slici 55, prikazane su osnovne dimenzije pleksiglasa od kojeg je izrađen model. [18]



Slika 54. Prikaz oznake segmenata umanjenog statičkog modela klizišta [18]



Slika 55. Dimenzije pleksiglas stijenki modela i otvori za drenažne elemente

Nakon cjelokupne pripreme platforme za ispitivanje umanjenog modela klizišta u statičkim uvjetima kreće se s ugradnjom prethodno zamiješanog materijala na određeni postotak vlažnosti. Kako bi se osigurao željeni stupanj zbijenosti, materijal se u model ugrađivao u više slojeva te se nabijao raznim drvenim nabijačima. Ugradnja mjernih uređaja odvija se paralelno s ugradnjom materijala, pritom pazeći na njegovu prethodno određenu dubinu. Mjerni uređaji unutar modela raspoređeni su na način da se minimizira utjecaj na konačne rezultate mjerenja s ciljem dobivanja promjene svih varijabli relevantnih za mehanizam klizanja. Važno je napomenuti kako ugrađena mjerna oprema ne utječe na sam mehanizam nestabilnosti i formiranje klizne plohe (Slika 56). [18]



Slika 56. Prikaz umanjenog fizikalnog modela prilikom ugradnje senzora

U svaki segment modela ugrađena je određena vrsta senzora kojima se bilježila vlažnost, sukcija, pritisak, električni konduktivitet, temperatura, pomak i drugi faktori kojih je moguće izmjeriti. Također, pri provedbi pokusa koristila su se ukupno 3 data loggera kojih se, kao i senzore, međusobno razlikuje prema serijskom broju. Senzori su raspoređeni u svaki data logger ovisno o segmentu u koji su instalirani. U nastavku dan je raspored senzora prema segmentima u koji su ugrađeni gledano od površine tla u modelu prema njegovom dnu:

Segment H:

- Teros 10 – ugrađen na dubini od 18 cm
- Teros 31 – ugrađen na dubini od 18 cm
- Teros 21 – ugrađen na dubini od 18 cm
- Teros 10 – ugrađen na dubini od 6 cm
- Teros 31 – ugrađen na dubini od 6 cm
- Teros 21 – ugrađen na dubini od 6 cm

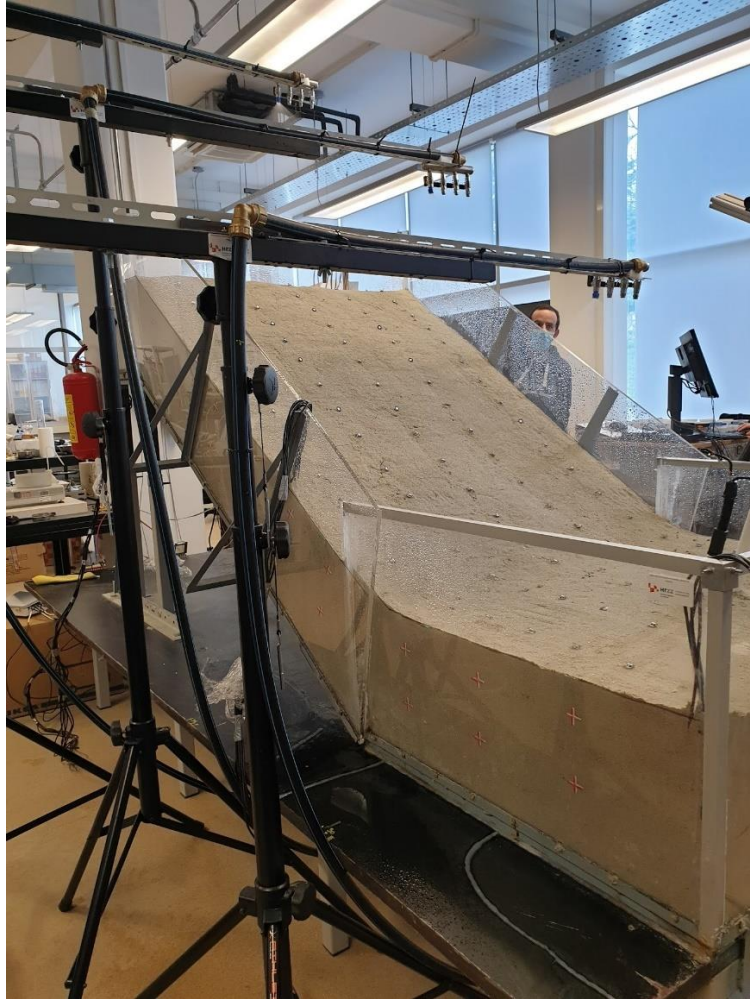
Segment M:

- Teros 10 – ugrađen na dubini od 24 cm
- Teros 10 – ugrađen na dubini 12 cm
- Teros 31 – ugrađen na dubini od 18 cm
- Teros 10 – ugrađen na dubini od 12 cm
- Teros 10 - ugrađen na dubini od 10 cm
- Teros 31

Segment L:

- Teros 10 – ugrađen na dubini od 24 cm
- Teros 32 – ugrađen na dubini od 12 cm
- Teros 12 – ugrađen na dubini od 18 cm
- Teros 10 – ugrađen na dubini od 12 cm
- Teros 32 – ugrađen na dubini od 24 cm
- Teros 12 – ugrađen na dubini od 6 cm

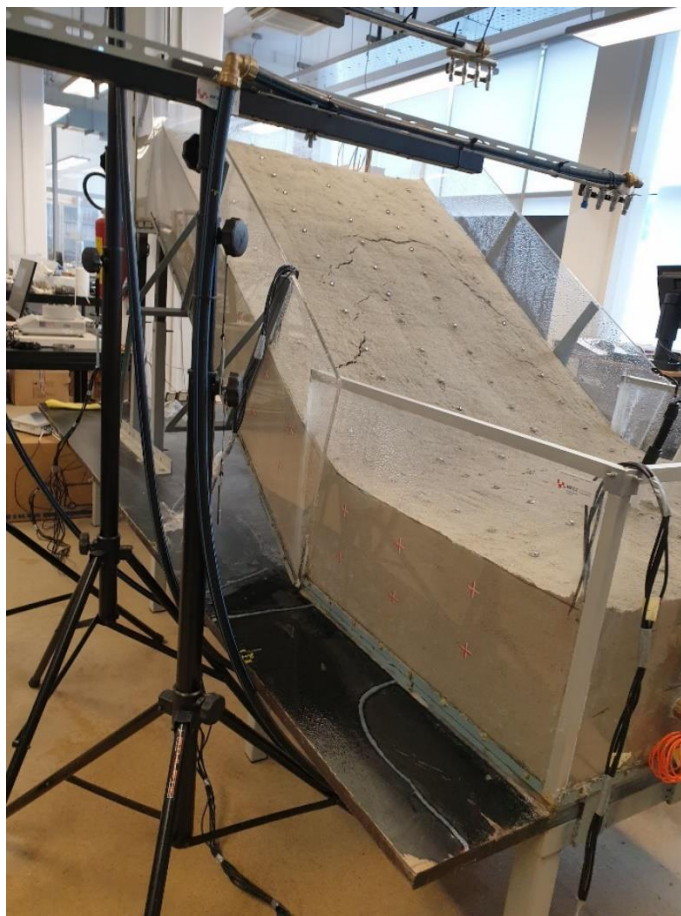
Karakteristike, uloge i značajnosti navedenih senzora uglavnom su poznate iz prethodnih poglavlja. Nakon ugradnje senzora i njihovih spajanja na data loggere pokreće se snimanje. Netom prije početka provedbe ispitivanja (Slika 57) potrebno je pozicionirati simulator oborina na način da se ostvari ujednačena pokrivenost modela oborinom. Različiti tipovi mlaznica, reguliranjem tlaka u sustavu osigurati će se ciljani protok vode na mlaznicama koji je prethodno određen te u ovom slučaju iznosi $q=0,8$ l/min.



Slika 57. Umanjeni fizički model prije ispitivanja

5.1.1. Tijek pokusa i razvoj nestabilnosti

Površina pripremljenog uzorka na dan 01.04.2021. u 16:16 sati dodatno se vlažila te je kao takva prekrivena najlonom i ostavljena preko noći. Sljedeći dan 02.04.2021. u 10:16 započinje ispitivanje modela na način da mlaznice raspršuju oborinu jednoliko po cijeloj površini modela. Protok kojim se ispušta oborina iznosi $q=0,8$ l/min. U 10:41 pojavljuju se prve pukotine u modelu (Slika 58) na srednjem (M) segmentu fizičkog modela te posljedično dolazi do stvaranja i razvitka klizišta.



Slika 58. Pojava prvih pukotina na izrađenom fizičkom modelu

Pukotine unutar modela dalje se razvijaju u plohu sloma prikazanom Slikom 59.



Slika 59. Prikaz plohe sloma u pokusu 5

Nakon 1 sata i 19 minuta, odnosno nakon 79 minute pokusa dolazi do formiranja malog rotacijskog klizišta (Slika 60) u nožici modela, nakon čega veća količina vode izbija na površinu i tako potapa nožicu modela. U 12:34 sati gasi se donja mlaznica, te se sukladno tome mijenja intenzitet oborine. Ispitivanje i simuliranje oborine završava u 12:50 sati nakon čega dolazi do ispiranja materijala s površine modela (Slika 61).

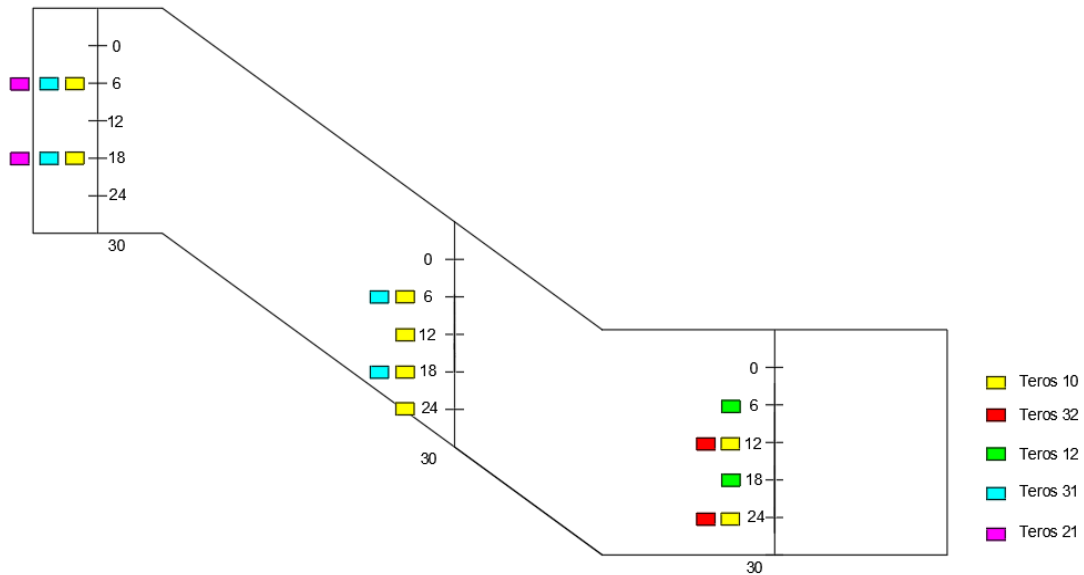


Slika 60. Prikaz rezultata ispitivanja - pojava rotacijskog klizišta u nožici modela



Slika 61. Prikaz kliznog tijela i potopljene nožice modela u pokusu 5

5.1.2. Grafički prikaz rezultata ispitivanja umanjenog fizikalnog modela klizišta

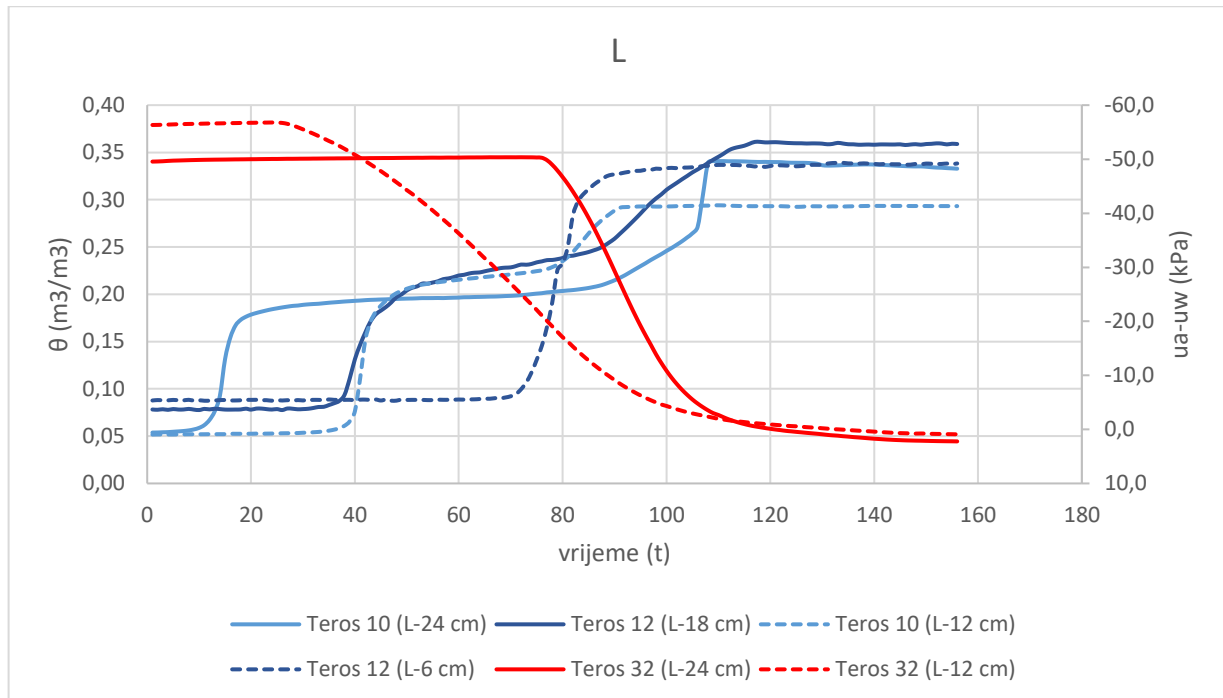


Slika 62. Shema instaliranih senzora u umanjenom fizikalnom modelu

Slika 62 prikazuje shemu ugrađenih senzora unutar modela, model je podijeljen na 3 segmenta odnosno H, M i L mjerni profil. H mjerni profil smješten je na vrhu modela, u duljini od 300 cm koji obuhvaća cjelokupni horizontalni dio. Mjerni model na kosini modela, odnosno M profil, nalazi se trećini duljine kosine mjereno od unutarnjeg ruba L mjernog profila. L segment predstavlja nožicu modela i ukupne je duljine 800 cm.

Ugrađeni senzori mjere vlažnost. Sadržaj vode i porni pritisak na L vertikali prikazan je na Slici 63. Saturirani uvjeti odnosno podizanje razine podzemne vode na ovim sensorima očituje se u obliku „S“ krivulje. U tom trenutku vlažnost dostiže konačnu odnosno maksimalnu vrijednost koja odgovara porozitetu. U takvim uvjetima, može se reći kako je tlo potpuno saturirano te se voda podiže od dna prema razini ugrađenog senzora. S obzirom na infiltraciju vode te njenim gravitacijskim tečenjem razina vode u nižim dijelovima

modela s vremenom raste sporije, no u jednom trenutku dolazi do naglog porasta vode zbog njenog nakupljanja u nožici modela.

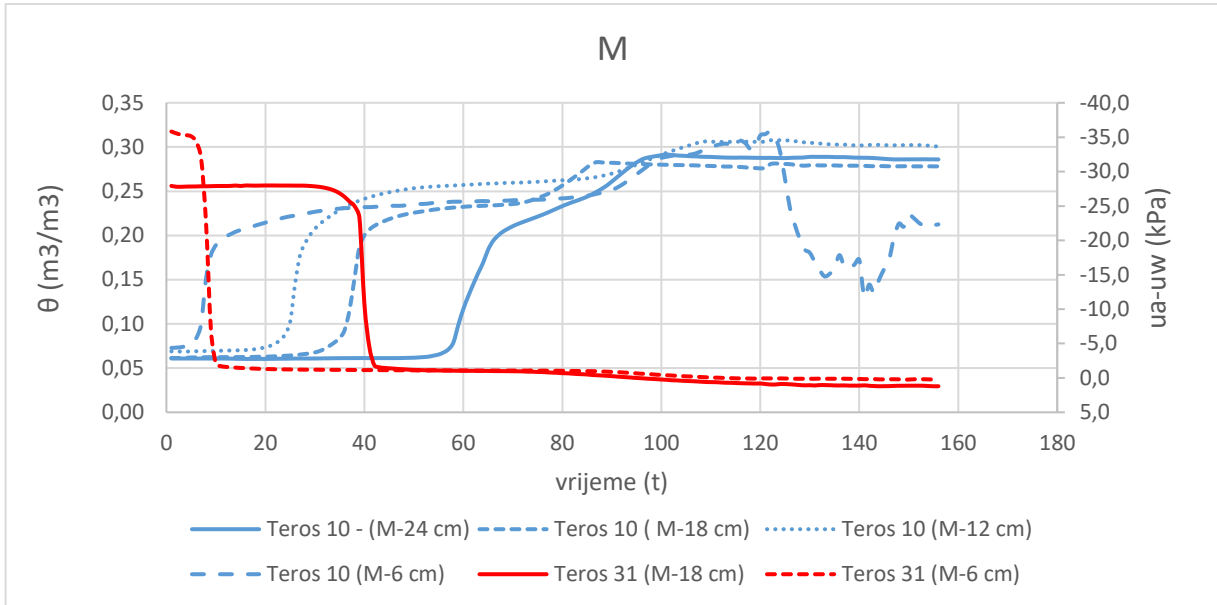


Slika 63. Prikaz rezultata sadržaja vode i pritiska na L segmentu umanjenog fizikalnog modela klizišta

Na slici 63. vidljivo je kako vlažnost u volumetrijskim uvjetima na visini od 24 cm i 6 cm u periodu od 110-te do 158 minute jednaka što se može poistovjetiti skupljanju vode na toj poziciji, najveća zabilježena količina vode je na visini od 18 cm gdje se voda najviše infiltrirala. U trenutku kada razina vode dođe iznad senzora, isto se može očitati s tenziometara kao pozitivan pritisak $p = \gamma x h$.

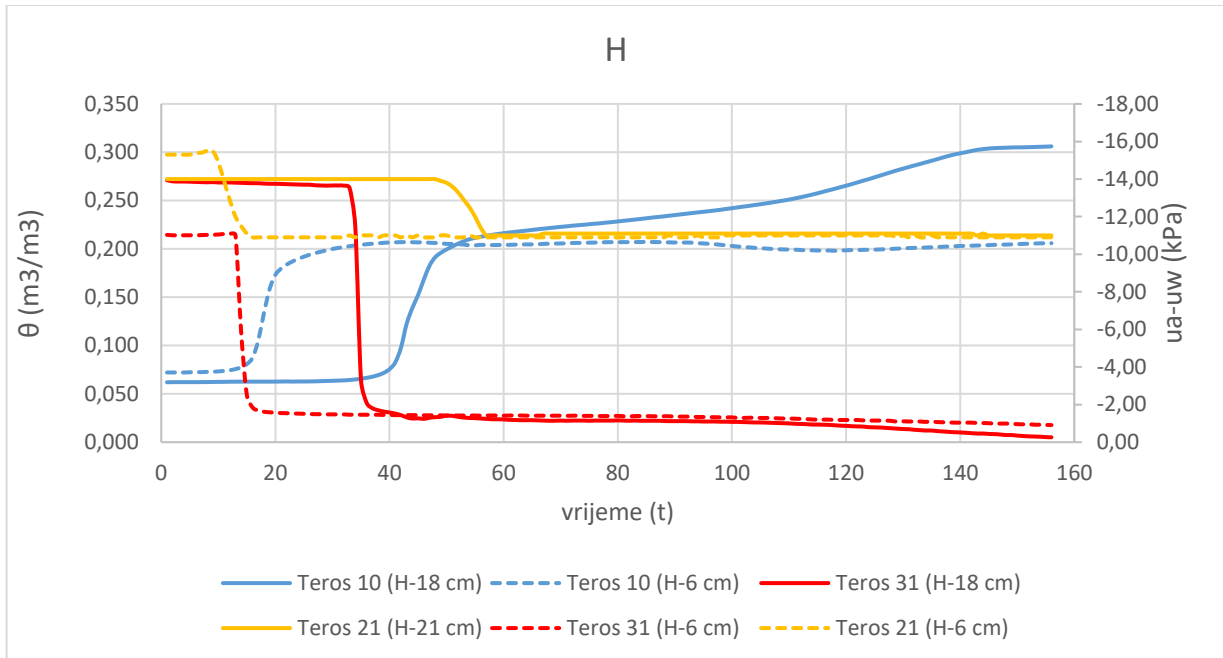
Slika 64 prikazani su podaci o promjenama vlažnosti i pornim pritiscima na M segmentu. Može se uvidjeti kako su rezultati poprilično ujednačeni. Voda se tijekom modela u glavnini infiltrira već u H segmentu te djelomično u M segmentu, gravitacijskim tečenjem ona dolazi i nakuplja se u L segmentu. Naime do 80-te minute voda se infiltrira kroz segment te je njena količina od 100-te do 159 minute gotovo jednolika na svim visinama s malim vremenskim odmacima čime se može obrazložiti pojava površinskog tečenja unutar

segmenta M. Općenito, povećanje vlažnosti se prvo registrira na sensorima koji su bliže površini tla, a tek kasnije na onima koji su bliže dnu modela. Ovakva pojava prikupljanja podataka se izravno može povezati s infiltracijom simulirane oborine.



Slika 64. Prikaz rezultata sadržaja vode i pritiska na M segmentu umanjenog fizikalnog modela klizišta

Slikom 65 prikazani su pritisci te sadržaj vode u najvišem dijelu umanjenog modela klizišta, segmentu H. Pomi pritisci su uglavnom ujednačeni od 40-te do 159-te minute.



Slika 65. Prikaz rezultata sadržaja vode i pritiska na H segmentu umanjenog fizikalnog modela klizišta

Vlažnost prvotno raste u točki H-6 (slika 65) u 15-toj minuti pokusa te se porast vlažnosti bilježi do 35 minute pokusa kada ona iznosi 0,202. Nakon 20-te minute pa sve do kraja pokusa vlažnost je uglavnom ujednačena, dok na visini od 18 cm vlažnost naglo raste u periodu od 40-te do 50-te minute i nakon tog perioda, vlažnost se linearno povećava do 145-te minute tijekom trajanja pokusa.

5.1.3. Diskusija i rekonstruiranje uvjeta razine vode u modelu

Općenito, voda se u nožici modela podiže zbog djelovanja dvaju efekata. Jedan od njih je dotjecanje vode iz gornjih dijelova modela te njena infiltracija unutar modela. U jednom trenutku voda doseže nepropusnu podlogu te teče po kontaktu plohe i odlazi u donji dio modela, dok je drugi razlog direktna infiltracija vode kroz tlo. Zbog dotjecanja vode u nožicu modela moguća je pojava slobodne vode, odnosno njeno podizanje iznad površine tla, u segmentu L što se događa iz razloga što materijal u tom trenutku ne može progutati toliku količinu vode, no isto ne znači da je materijal u potpunosti saturiran, odnosno stupac

tla nije saturiran na čitavoj visini od površine do dna modela. Vlažnost u tom trenutku može biti ispod saturirane vrijednosti te je potrebno vrijeme kako bi voda otekla do dna modela. U istom trenutku na M mjernom profilu događa se površinsko otjecanje.

Na segmentu L prikazan na Slici 63 može se vidjeti razvitak vlažnosti unutar ugrađenog materijala. Naime, gornja odnosno najviša horizontala senzora Teros 10 govori kako se u određenom trenutku (90 minuta) voda nalazi točno u ravnini senzora. Na segmentu M (slika 64) voda se u ravnini senzora Teros 10 – ugrađen na visini od 18 cm, nalazi već u 40 minuti trajanja pokusa. Navedenim sensorima moguće je odrediti vrijeme kada voda dolazi u ravninu s ugrađenim sensorima – najviša horizontala dijagrama, nadalje, vrijednosti odnosno pritisci dobiveni mjerenjima senzora Teros 31 u segmentu M i Teros 32 u segmentu L te njihovom promjenom moguće je odrediti stupac vode, odnosno visinu vode koja se u određenom trenutku nalazi iznad senzora. Ukoliko tlo nije u potpunosti saturirano, u tlu vlaga ima negativan porni pritisak. Nakon što se razina podzemne vode podigne iznad promatrane točke, odnosno kada mjerači pornih pritisaka očitaju pozitivnu vrijednost, tlo je u potpunosti saturirano, a mjerači vlažnosti očitavaju saturiranu maksimalnu volumetrijsku vlažnost

U 119 minuti trajanja pokusa, iz mjerenih podataka, vidljivo je kako se voda u tom trenutku nalazi gotovo u ravnini senzora Teros 10 ugrađen na visini L-24 cm, u tom trenutku vrijednost pornog pritiska iznosi -0,252 kPa. S obzirom na porni pritisak voda da u tom trenutku nalazi na 2,6 cm ispod ugrađenog senzora. U nastavku, određena je visina stupca vode na svakih 10 minuta mjerenja unutar pokusa u segmentu L.

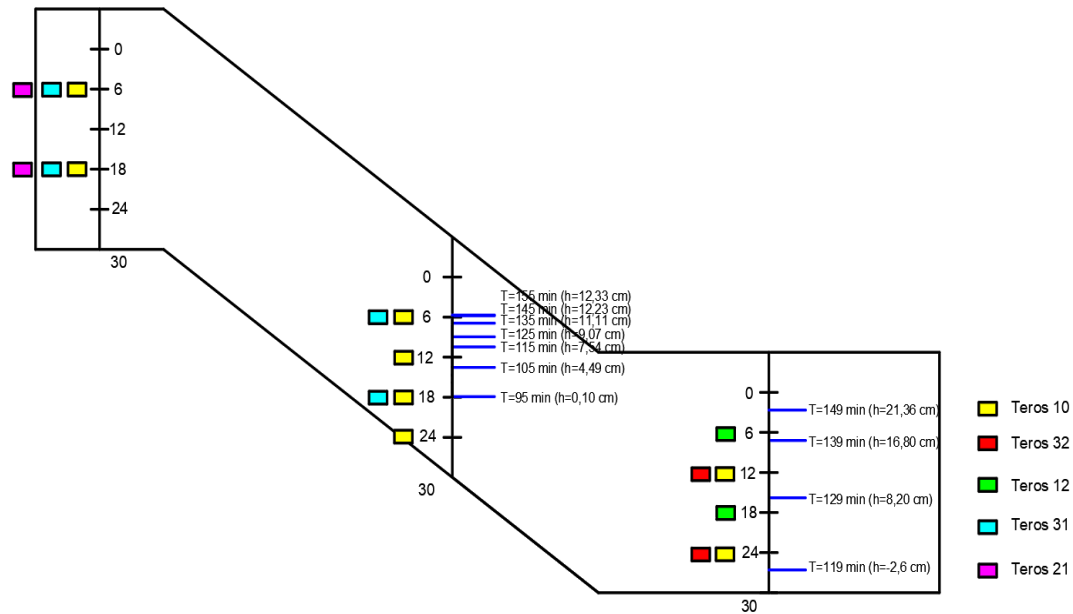
95-a minuta pokusa ključna je za segment M kada se voda nalazi na 0,10 cm iznad senzora Teros 10. Na dijagramu prikazanom na slici 25. vidljiva je pojava najviše horizontale mjerenja na temelju čega se odredila visina vode u navedenom trenutku. Porni pritisak u 95 minuti pokusa iznosi 0,01 kPa iz čega je dobiven visinski potencijal vode. Nadalje, visina stupca vode određuje se na svakih 10 minuta mjerenja unutar pokusa. Rezultati i promjene visine stupca vode tijekom simulacije oborine prikazani su slikom 66.

Visina stupca vode (h_w) dobivena je prema sljedećem izrazu:

$$h_w = \frac{p_w}{\gamma_w}$$

gdje je,

- h_w – visina stupca vode
- p_w – vrijednost pornog pritiska
- γ_w – specifična težina vode



Slika 66. Promjena visina stupca vode unutar modela tijekom izvedbe pokusa

U konačnici, svrha provedbe pokusa je simulacija oborina te praćenje vlažnosti materijala i pritiska porne vode unutar modela. Pojava pukotina koje u ovom slučaju završavaju pojavom rotacijskog klizišta u nožici modela događa se zbog infiltracije simulirane kiše. Kiša uzrokuje porast vlažnosti i s time dolazi do redistribucije težine materijala, osim toga događa se i pojava porasta pornih pritiska koji smanjuju efektivno naprezanje, reducira čvrstoću i time uzrokuje pojavu klizanja.

6. ZAKLJUČAK

Cjelokupna obrada diplomskog rada ukazuje na promatranje materijala s obzirom na početni stupanj saturacije ili postotak vlažnosti te količini dodane vode prilikom prikupljanja mjerenja na način da je posuda s ugrađenim materijalom u potpunosti zatvorena ili pak puštena na proces prirodnog sušenja. Također, kroz obradu podataka i njihovom usporedbom s izrađenim umanjnim fizikalnim modelima klizišta simuliranih kišom ukazuje se na problematiku stabilnosti kosina.

U području geotehničkog inženjerstva, važan utjecaj na cjelokupnu stabilnost kosine ima voda. Njezina infiltracija, promjena režima podzemne vode te karakteristike materijala tla (propusnost i mogućnost infiltracije) najveći su uzrok pojava nestabilnosti. Pojava klizišta zbog navedenih utjecaja jedan je od najkompleksnijih tema. Pojava klizanja predstavlja ozbiljan problem za stanovništvo i okoliš iako se radi o malim pomacima u tlu.

Obradom prikupljenih podataka osim što se ukazuje da rad i princip rada pojedinih senzora može se zaključiti da saturiranost materijala utječe na slijeganje materijala, odnosno veći stupanj saturacije unutar mješavine materijala – dravski pijesak i 10% kaolina uzrokuje i veću te intenzivniju pojavu slijeganja. Prikupljeni podaci mjerenja izrađenog modela ukazuju da je saturacija tla uglavnom primarni uzrok pojave klizanja koje se u stvarnosti događa zbog promjene režima podzemne vode te nemogućnosti brzog otjecanja procjedne vode kroz kosinu što za posljedicu ima porast pornih pritisaka u tlu. Glavni razlog pojave klizanja je destabilizacija nožice kosine te visoka razina procjedne vode unutar nje. Postoje razni načini stabilizacije kosine. Neki od značajnijih je izvedba bolje površinske odvodnje, izvedba drenova kojim se može utjecati na snižavanje razine podzemne vode.

Osim simulacije oborina unutar modela, može se zaključiti kako povećanje vlažnosti i pornih pritisaka utječu na rast hidrostatskog tlaka što globalno smanjuje stabilnost kosine na način da smanjuje efektivno naprezanje unutar modela. Smanjenje efektivnog naprezanja dovodi do reduciranja čvrstoće unutar modela te se na posljjetku javljaju

pukotine i proces klizanja zbog cjelokupne infiltracije vode te redistribucije težine materijala.

Obrađeni podaci dobiveni mjerenjima i izradom umanjenih fizikalnih modela mogu se primijeniti na eksperimentalno proučavanje pojave pomaka unutar tla, odnosno na bilo koji sličan problem koji se pojavljuje u stvarnosti. Uz pomoć umanjenih modela moguće je predvidjeti ponašanje određenih fizikalnih procesa. Uzme li se u obzir veličina izrađenih modela dobiva se vrlo jeftin i ekonomično prihvatljiv način prikupljanja podataka u odnosu na kompleksniju pojavu istog procesa u prirodi. Izrađeni modeli nalaze se u kontroliranim laboratorijskim uvjetima te ih je moguće ponavljati uz različite ulazne podatke.

Podaci prikupljeni mjerenjem – vlažnost, temperatura, porni pritisci i tlakovi služe da bi se dobio bolji uvid u cjelokupnu problematiku promatranog modela čime se također može dobiti bolji i detaljniji uvid u rad samog senzora s obzirom na karakteristike navedene u priručniku.

Iz promatranih pokusa s obzirom na vlažnost i stupanj saturacije može se zaključiti da povećanje vode unutar posuda utječe na slijeganje materijala te usporenu infiltraciju vode od vrha posude pa do njenog dna. Podaci dobiveni iz modela klizišta ukazuju na to kako povećana količina oborina utječe na nakupljanje procjedne vode u nožici modela i time ubrzanim postupkom dolazi do smanjenja kohezije unutar kliznog tijela dolazi do pojave pukotina i samim time do pojave nestabilnosti odnosno u ovom slučaju do pojave rotacijskog klizišta.

7. LITERATURA

- Knjige:

[1] Varnes D. 1978 Slope Movement Types and Processes Transp. Res. Board Spec. Rep. (pristupljeno: 14.06.2022.)

[2] Cruden , D . M . , Varnes D . J . 1996 Landslides: Investigation and Mitigation Environ. Eng. Geosci. IV 277 8 (pristupljeno:16.06.2022.)

[3] Highland L M and Bobrowsky P 2008 The landslide Handbook - A guide to understanding landslides US Geol. Surv. Circ. 1 147 (pristupljeno: 01.07.2022.)

[5] Nonveiller, E., Mehanika tla i temeljenje građevina, Školska knjiga, Zagreb, 1979. (pristupljeno: 15.07.2022.)

[9] Ilstad 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 (pristupljeno: 19.07.2022.)

[10] Željko Arbanas, 2022: Prezentacija: Stabilnost kosina, Građevinski fakultet Rijeka, Rijeka (pristupljeno: 21.07.2022.)

[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 (pristupljeno: 21.07.2022.)

[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 62 4th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Lulea

University of Technology, pp 115–122 (pristupljeno:25.07.2022.)

[13] METER Group, Inc. USA, TEROS 21 Manual web, 18405-00 (pristupljeno: 05.08.2022.)

[14] METER Group, Inc. USA, TEROS 10 Manual web, 18241-03 (pristupljeno: 06.08.2022.)

[15] METER Group, Inc. USA, TEROS 31 Manual web, 18385-00 (pristupljeno: 06.08.2022.)

[16] METER Group, Inc. USA, TEROS 11/12 Manual web, 18225-04 (pristupljeno: 10.08.2022.)

[17] METER Group, Inc. USA, TEROS 32 Manual web, 18312-01 (pristupljeno:19.08.2022.)

[18] 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: 20.08.2022.)

- Internet:

[4] <https://www.geotech.hr/vrste-i-elementi-klizista/> (pristupljeno: 20.08.2022.)

[6] <https://www.geotech.hr/zastita-od-odrona-u-omisu/> (pristupljeno: 14.06.2022.)

[7] <https://www.geotech.hr/prevrtanje-blokova/> (pristupljeno: 14.06.2022.)

[8] <https://www.geotech.hr/likvefakcija-tla/> (pristupljeno: 14.06.2022.)