

# Utjecaj varijabilne gustoće, poroznog medija i rubnih uvjeta na svojstva intruzije morske vode u obalne vodonosnike

---

Trgo, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:*

**University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:731649>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-01**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**  
**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

# **DIPLOMSKI RAD**

**Josip Trgo**

**Split, 2021. godina**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**Josip Trgo**

**Utjecaj varijabilne gustoće, poroznog medija i rubnih  
uvjeta na svojstva intruzije morske vode u obalne  
vodonosnike**

**Diplomski rad**

**Split, 2021.godina**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

**STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

**KANDIDAT: Josip Trgo**

**MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083227617**

**KATEDRA: Katedra za privrednu hidrotehniku**

**PREDMET: Obalno inženjerstvo**

### **ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

**Tema: Utjecaj varijabilne gustoće, poroznog medija i rubnih uvjeta na svojstva intruzije morske vode u obalne vodonosnike**

Opis zadatka: U sklopu diplomskog rada očekuje se:

- Pripremiti eksperimentalne postavke i provesti relevantne eksperimente;
- Pregledati literaturu i izraditi „state of the art“ u području analitičkih rješenja klina slane vode u obalnim vodonosnim sustavima;
- Verificirati valjanost analitičkih rješenja u laboratorijskim uvjetima;
- Ispitati utjecaj varijabilne gustoće medija, hidrauličkog konduktiviteta poroznog medija i hidrauličkog gradijenta na svojstva klina slane vode

U Splitu, 16.04.2021.

Voditelj Diplomskog rada:

doc.dr.sc. Veljko Srzić

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:  
Doc. dr. sc. Ivo Andrić

# **Utjecaj varijabilne gustoće, poroznog medija i rubnih uvjeta na svojstva intruzije morske vode u obalne vodonosnike**

## ***Sažetak:***

U ovom diplomskom radu bilo je potrebno pripremiti eksperimentalne postavke i provesti relevantne eksperimente kako bi se odredila duljina intruzije morske vode u vodonosnicima slatke vode. Postavljena su analitička rješenja koja su verificirana laboratorijskim ispitivanjima. Ispitan je utjecaj varijabilne gustoće medija, hidrauličkog konduktiviteta poroznog medija i hidrauličkog gradijenta na svojstva klina slane vode.

## ***Ključne riječi:***

obalni vodonosnik, analitička rješenja, laboratorijska ispitivanja, varijabilna gustoća medija, hidraulički konduktivitet, hidraulički gradijent, duljina klina slane vode

# **Influence of variable density, porous medium and boundary conditions on the properties of seawater intrusion into coastal aquifers**

## ***Abstract:***

In this graduate thesis it was necessary to prepare experimental settings and conduct relevant experiments to determine the length of seawater intrusion in freshwater aquifers. Analytical solutions were set up and verified by laboratory tests. The influence of variable medium density, hydraulic conductivity of the porous medium and hydraulic gradient on the properties of the saltwater toe length was investigated.

## ***Keywords:***

coastal aquifer, analytical solutions, laboratory tests, variable medium density, hydraulic conductivity, hydraulic gradient, saltwater toe length

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	1
1.1. Općenito .....	1
1.2. Zaslanjenje slatke vode pod utjecajem morske vode .....	1
1.3. Metodološki pristupi .....	2
1.4. Mikrolokalitet ušća Neretve .....	3
1.5. Način rješavanja problema .....	3
<b>2. PREGLED ANALITIČKIH RJEŠENJA</b> .....	5
<b>3. LABORATORIJSKO MODELIRANJE PROCESA U UVJETIMA DVOSTRUKE GUSTOĆE</b> .....	10
3.1. Eksperimentalni sustav.....	10
3.1.1. Kanal .....	10
3.1.2. Porozni medij (pijesak) .....	11
3.1.3. Ostali laboratorijski elementi .....	12
3.2. Provedba eksperimenta.....	13
3.2.1. Tečenje .....	13
3.2.2. Transport .....	16
3.2.3. Eksperiment 1 .....	18
3.2.4. Eksperiment 2.....	19
<b>4. VERIFIKACIJA DULJINE SLANOG KLINA <math>x_t</math></b> .....	20
4.1. Korištenje analitičkih izraza .....	20
4.2. Rezultati eksperimentalnih istraživanja.....	22
4.2.1. Rezultati Eksperimenta 1 .....	22
4.2.2. Rezultati Eksperimenta 2 .....	38
4.3. Verifikacija analitičkih izraza .....	53
4.3.1. Verifikacija analitičkog rješenja duljine slanog klina Eksperimentom 1 .....	54
4.3.2. Verifikacija analitičkog rješenja duljine slanog klina Eksperimentom 2 .....	57

<b>5. UTJECAJ PARAMETARA NA SVOJSTVA KLINA .....</b>	<b>60</b>
5.1. Utjecaj promjene parametra hidrauličkog gradijenta $\Delta h/L$ na svojstva klina .....	60
5.2. Utjecaj parametra gustoće slane vode ( $\rho_s$ ) na svojstva slanog klina .....	61
5.3. Utjecaj parametra gustoće slatke vode ( $\rho_f$ ) na svojstva slanog klina.....	63
5.4. Utjecaj parametra hidrauličkog konduktiviteta ( $k$ ) na svojstva slanog klina .....	65
<b>6. RASPRAVA I ZAKLJUČAK .....</b>	<b>67</b>
<b>7. LITERATURA .....</b>	<b>68</b>

## 1. UVOD

### 1.1. Općenito

Ovim radom obrađuje se utjecaj varijabilne gustoće, poroznog medija i rubnih uvjeta na svojstva intruzije morske vode u obalne vodonosnike. Težište obrade odnosi se na duljinu intruzije morske vode u vodonosnike slatke vode, dok je poseban naglasak dan analitičkim rješenjima koja su verificirana laboratorijskim ispitivanjima. Fokus pregleda mogućih analitičkih rješenja dan je dvama pristupima unatoč činjenici postojanja raznovrsnih analitičkih pristupa pomoću kojih se može doći do izračuna duljine prodiranja slanog klina u obalne vodonosnike. Provodeći ispitivanja unutar laboratorija i to pomoću providnog pravokutnog kanala, a sve u svrhu usporedbe eksperimentalnog rezultata s onim analitičkim, dolazi se do neznčajnih odstupanja. Prodiranje slane vode u vodonosnike slatke vode predstavlja problem s kojim se suočavaju inženjeri i planeri vodnih resursa širom svijeta.

### 1.2. Zaslanjenje slatke vode pod utjecajem morske vode

Intruzija morske vode u obalne vodonosnike predstavlja prodor slane vode u slatkovodne vodonosnike te može dovesti do smanjenja kvalitete pitke vode. Kao najčešći zagađivač pitke vode smatra se sol koja kada iz morske vode prodre u vodonosnike slatke vode uzrokuje zagađenje.

Sva voda, slatka i slana, sadrži otopljene kemijske tvari takozvane "soli", a razliku čini koncentracija otopljene tvari u vodi. Različite metode razvrstavanja služe razlikovanju slatkovodne od slane vode. Voda se može definirati kao "slatka" kada ima ukupnu koncentraciju otopljenih tvari manju od 1000 (mg / l) vode, a kada ukupna koncentracija otopljenih tvari iznosi više od 1000 (mg / l) ona se smatra slanom. Ova proizvoljna gornja granica slatke vode temelji se na prikladnosti vode za ljudsku potrošnju. Kako čak i mala koncentracija klorida pogoršava kvalitetu vode, kontaminacija slatke vode solima pogoršava kvalitetu iste čineći ju neprikladnom za ljudsku potrošnju. Tako zagađena voda utječe i na razvoj poljoprivrede zbog neprikladnosti za navodnjavanje, a dovodi i do zaslanjivanja podzemnih voda, isušivanja obalnih područja, kao i do potencijalnog prekida opskrbe akvaduktima. Zbog većeg udjela minerala u slanoj vodi u odnosu na slatku, slana voda ima



veću gustoću, a radi koje u vodonosnom sloju slana voda istiskuje slatku ili se sa njom miješa. Miješanjem slatke i slane vode nastaje takozvana boćata voda. Prodiranje slane vode u slatku uzrokuje miješanje disperzijom. Miješanje disperzijom uzrokovano je prostornim varijacijama (heterogenostima) u geološkim strukturama, hidrauličkim svojstvima vodonosnika i dinamičkim silama koje djeluju u rasponu vremenskih razmjera, uključujući dnevne fluktuacije u fazama plime i oseke, sezonske i godišnje razlike u stopama obnavljanja podzemne vode i dugoročne promjene položaja morske vode. Dinamičke sile uzrokuju da se zone slatkovodnih i slanah voda povremeno pomiču prema moru, a povremeno prema kopnu, ovisno o kombinaciji dinamičkih i hidrauličkih svojstava. Na dinamičke sile utječu mnogi mehanizmi koji se mogu podijeliti u više kategorija.

Kao primarni uzrok upada slane vode u slatku navodi se crpljenje podzemne vode. U osnovnim uvjetima unutarnja razina slane vode ograničena je višim tlakom koji vrši stupac slatke vode zahvaljujući višoj nadmorskoj visini. Tako crpljenje podzemne vode može smanjiti razinu slatke vode, smanjujući pritisak koji vrši slatkovodni stupac i na taj način omogućujući gušćoj slanoj vodi istiskivanje slatke. Ova se situacija često događa u priobalnim vodonosnicima. Druga kategorija odnosi se na izmjenu prirodnih barijera koje razdvajaju svježe i slane vode. Primjer bi mogla biti izgradnja plovidbenih kanala ili poljoprivrednih kanala, kao i odvodni kanali koji se pružaju u područja slane vode. Treći se mehanizam bavi podzemnim odlaganjem otpadne slane vode kao što je primjerice odlaganje u bunare za odlaganje i druga odlagališta otpada. Prodor slane vode može se pogoršati i zbog ekstremnih meteoroloških događaja poput velike suše u ljetnim periodima.

### **1.3. Metodološki pristupi**

Razumijevanje dinamike miješanja slane vode sa slatkom vodom važan je istraživački problem. Brojni su istraživači proučavali proces prodora slane vode, istraživali problematiku prodiranja slane vode u vodonosnike slatke vode te pokušavali riješiti ovaj problem koristeći različite metode. Jedna od metoda za istraživanje prodiranja slanog klina jest takozvana analitička metoda rješavanja problematike zagađenja slanom vodom. Analitička metoda rješavanja problema prodiranja soli u vodonosnike zasniva se na poznavanju hidrauličkih i fizikalnih parametara pomoću kojih se dolazi do rješenja problema, točnije do rezultata parametra koji se nameće kao nepoznanica, u ovom slučaju prodiranje slanog klina. Na

temelju dobivenih rezultata parametra duljine prodiranja slane vode može se pristupiti metodama sanacije, te istiskivanja slane vode. Osim analitičkih rješenja kojima se pristupa pri rješavanju problema zaslanjivanja, problem zaslanjivanja moguće je riješiti i laboratorijskim modelima, te numeričkim modelima. Laboratorijskim modelima problem se rješava puštanjem eksperimenata pomoću kojih se dolazi do rezultata prodiranja slane vode te rješavanja problema slane vode. Numeričkim modelima problem prodiranja slane vode rješava se računalnim modelima. Sva ova rješenja i modeli nameću se kao mogućnost izračuna duljine prodiranja slanog klina u vodonosnike slatke vode, te se na temelju rezultata dobivenih ovim modelima može pristupiti metodama sanacije te istiskivanja slane vode. Zaslanjivanje podzemnih voda te prodiranje slane vode u vodonosnike slatke moglo bi se riješiti i desalinizacijom. Postupak desalinizacije iziskuje visoke troškove slijedom čega nije ekonomičan način rješavanja problema. Uklanjanje soli postupkom desalinizacije primjenjuje se u slučajevima kada jeftiniji, konvencionalni načini rješavanja problema nisu dovoljni za zadovoljavanje potreba, bilo ljudskih, bilo drugih.

#### **1.4. Mikrolokalitet ušća Neretve**

U Republici Hrvatskoj postupak onečišćenja najčešće je rezultat velike potražnje za vodnim resursima tijekom ljetnih mjeseci. Primjer prodiranja slane vode u vodonosne slojeve prisutan je na ušću Neretve. Na ušću Neretve slani klin prodire duboko u vodonosne slojeve i narušava kvalitetu slatke vode te na taj način uzrokuje zagađenje pitke vode te samim time narušava agrokulturu.

#### **1.5. Način rješavanja problema**

U ovome radu analitička rješenja koristit će se u analizi utjecaja određenih parametara na svojstva slanog klina, a rješenja dobivena analitičkim izrazima bit će provjerena laboratorijskim ispitivanjem. Dapače, uz neznatna odstupanja rješenja dobivena analitičkom metodom verificirana su eksperimentima u laboratoriju. Na ovaj način istražiti će se ponašanje slane vode u vodonosnicima slatke vode, posebice duljina prodiranja slanog klina ( $x_t$ ) koja se nameće kao najbitniji parametar za razmatranje. Osim duljine prodiranja slanog klina pratit će

se utjecaj ostalih hidrauličkih i fizikalnih parametara slatke i slane vode na svojstva slanog klina.

## 2. PREGLED ANALITIČKIH RJEŠENJA

Glavni zadatak ovoga rada prikaz je analitičkih rješenja koja će za rezultat dati duljinu prodiranja slanog klina u obalnim vodonosnicima pod tlakom. Za izračun duljine prodiranja slanog klina postoje mnoga analitička rješenja koja koriste različite parametre. U ovome radu analizirat će se slijedeći znanstveni radovi:

- a) *Seawater intrusion in response to sea-level rise in a coastal aquifer with a general-head inland boundary*
- b) *Analytical analysis of the temporal asymmetry between seawater intrusion and retreat*

U studiji *“Seawater intrusion in response to sea-level rise in a coastal aquifer with a general-head inland boundary”* vrši se usporedba rezultata analitičkih rješenja prilikom odabira različitih graničnih postavki te uzimanja konstantnog rubnog uvjeta. Parametri su postavljeni na način da je slatka voda uvijek iznad slane. Odnos razina slatke i slane vode generalizirao je Ghyben-Herzberg u svojim radovima te se u obradi koristi Ghyben-Herzberg relacija kao najvažniji analitički model koji opisuje problem prodiranja slane vode u obalne vodonosnike.

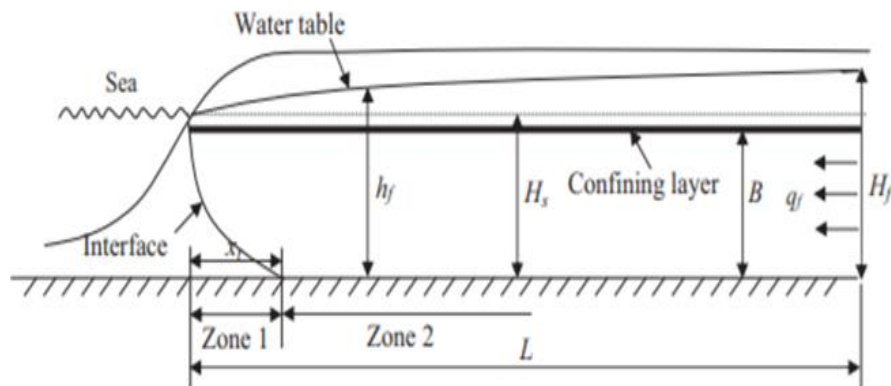
Rezultat za neuravnotežene uvjete ima oblik:

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \cdot h_f - \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} \cdot h_s ,$$

gdje je  $h_f$  (m) nadmorska visina vodostaja u bunaru ispunjenim slatkom vodom gustoće  $\rho_f$  ( $\text{kg/m}^3$ ) na dubini  $z$  (m), a  $h_s$  nadmorska visina vodostaja u bunaru fiksiranom fiziološkom otopinom voda gustoće  $\rho_s$  ( $\text{kg/m}^3$ ) na dubini  $z$  (m).

Važno je istaknuti da rješenje Ghyben-Herzberg pretpostavlja da slana voda ostaje statična, a njen tlak ostaje hidrostatičan po vertikali. To vrijedi ako se slana vodane miješa sa slatkom vodom. Isto se postiže na način da su dvije tekućine odvojene ostrim razmakom slatkovodne i morske vode, a protok je u ustaljenom stanju. Pretpostavka oštrog sučelja zanemaruje miješanje slatke i slane vode te prikazuje granicu između slatke i slane vode što je jedno od najizrazitijih obilježja morske vode, njenog prodiranja i dinamike.

Uvjeti koji su karakteristični za ograničene obalne vodonosnike prikazani su na slici 1:



Slika 1 Konceptualni model vodonosnika pod tlakom (“Seawater intrusion in response to sea-level rise in a coastal aquifer with a general-head inland boundary“ )

Vodonosni slojevi podloženi su vodoravnom nepropusnom bazom. Smjer strujanja slatke vode je vodoravan, a okomit na obalu. Miješanje između slatke i morske vode je zanemareno te se pretpostavlja oštro sučelje kako bi se dvije tekućine odvojile. Uz tako postavljene uvjete možemo identificirati dvije zone: zona slatkovodne i slane vode (zona 1) i zona samo slatke vode (zona 2). Na obalnoj granici plima i valovi su zanemareni za pretpostavku ustaljenog sustava podzemnih voda, dakle, uzima se konstantna vrijednost razine morske vode.

Parametri koji su prikazani na slici ograničenog obalnog vodonosnika pod tlakom karakteristični su za obalne vodonosnike.  $H_s$  (m) je srednja razina mora iznad dna vodonosnog sloja. Debljina između ograničavajućeg sloja i dna vodonosnika je  $B$  (m), a  $h_f$  (m) je debljina slatkovodne leće (tj. debljina između vodostaja i baze vodonosnika ili slatke vode–sučelje morske vode). Duljina slanog klina sučelja  $x_t$  (m) nalazi se u unutrašnjosti obalne linije. Da bi se olakšalo analizu označena je odgovarajuća duljina slanog klina sučelja u obalnim sustavima te su pretpostavljena tri različita granična uvjeta, i to: uvjet konstantnog tlaka vode (head boundar- $x_t$  (CHB)), uvjet konstantnog protoka (flux boundary  $x_t$  (CFB)) i općenitog tlaka na unutrašnjoj granici  $x_t$  (GHB). Rješenja korištena za izračun duljina prodora slanog klina u vodonosnike slatke vode pod tlakom (confined) dana su sljedećim izrazima ovisno o graničnim uvjetima konstantnog tlaka vode (CHB) i konstantnog protoka (CFB).

(CHB) granični uvjet konstantnog tlaka vode:

$$x_t = \frac{B \cdot L}{2 \cdot \alpha \cdot \left( H_f - \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right) \cdot H_s + \frac{B}{2 \cdot \alpha} \right)}$$

(CFB) granični uvjet konstantnog protoka:

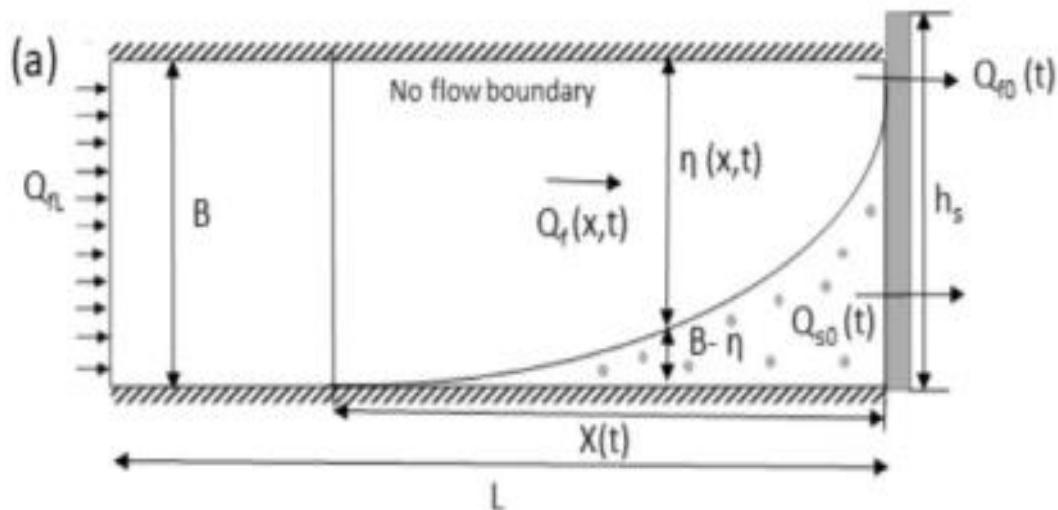
$$x_t = \frac{k \cdot B^2}{2 \cdot \alpha \cdot q_f}$$

$$q_f = \frac{k \cdot B}{L} \cdot \left( H_f - \frac{(1 + \alpha)}{\alpha} \cdot H_s + \frac{B}{2 \cdot \alpha} \right)$$

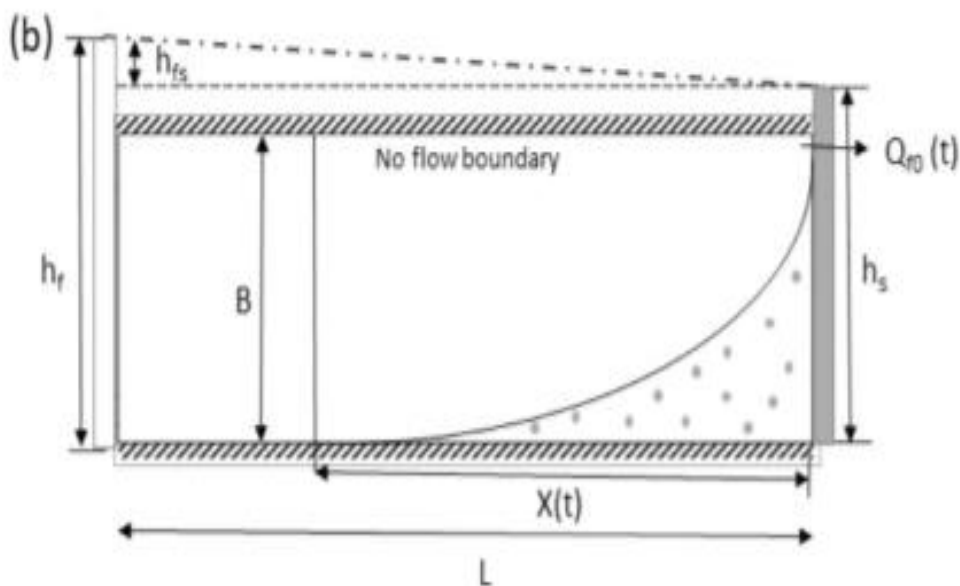
gdje je  $\alpha$  omjer gustoće slatke vode  $\rho_f$  (kg/m<sup>3</sup>) i razlike gustoće slane  $\rho_s$  (kg/m<sup>3</sup>) i slatke vode  $\rho_f$  (kg/m<sup>3</sup>):

$$\alpha = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}$$

U studiji “Analytical analysis of the temporal asymmetry between seawater intrusion and retreat“ također se izvodi analitičko rješenje temeljeno na pretpostavci oštrog sučelja i uvjeta konstantnog tlaka vode (head boundary -  $x_t$  (CHB)), konstantnog protoka (flux boundary  $x_t$  (CFB) i općenitog tlaka na unutrašnjoj granici  $x_t$  (GHB). Unatoč pretpostavkama za razvoj analitičkih modela, parametri koje nude rješenja o dinamici sučelja u obalnim vodonosnicima mogu se proširiti i predočiti na razne načine uz različite granice kao što su konstantni tlak vode (head boundary) i konstantni protok (flux boundary) (slika 2 i 3).



Slika 2 Vodonosnik pod tlakom (flux boundary) (“Analytical analysis of the temporal asymmetry between seawater intrusion and retreat”)



Slika 3 Vodonosnik pod tlakom (head boundary) (“Analytical analysis of the temporal asymmetry between seawater intrusion and retreat”)

Duljina prodiranja slanog klina  $x_t$  (m) dana je izrazom:

$$x_t = \frac{k \cdot \varepsilon \cdot B^2}{2 \cdot Q_0}$$

gdje je  $k$  (m/s) konduktivitet, a  $\varepsilon$  je omjer gustoće slane vode  $\rho_s$  (kg/m<sup>3</sup>) i slatke vode  $\rho_f$  (kg/m<sup>3</sup>) dan izrazom:

$$\varepsilon = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$$

$Q_0$  (m<sup>3</sup>/s) predstavlja protok slatke vode na izlazu iz vodonosnika pod tlakom, koji je u slučaju zanemarivanja vremenske skale jednak protoku na ulazu u vodonosnik:

$$Q_0 = Q_{fL}$$

Protok se dobije izrazom:

$$Q_{fL} = k \cdot B \cdot \left( \frac{h_f - h_s^*}{L} \right)$$

gdje  $h_s^*$  (m) predstavlja reguliranu visinu slane vode, a dan je izrazom:

$$h_s^* = (1 + \varepsilon) \cdot h_s - \frac{\varepsilon}{2} \cdot B$$

U ovim studijama primijenjena su tri analitička rješenja za dobivanje rezultata duljine slanog klina ( $x_t$ ) ovisno o graničnim uvjetima.

Sva analitička rješenja i izrazi koji su korišteni i još uvijek se koriste u raznim znanstvenim, inženjerskim i istraživačkim radovima temeljena su na rubnim uvjetima konstantnog tlaka vode te konstantnog protoka. Ovaj rad također koristi isti pristup kako bi se vjerodostojno prikazao glavni parametar a to je duljina prodiranja slanog klina  $x_t$ .



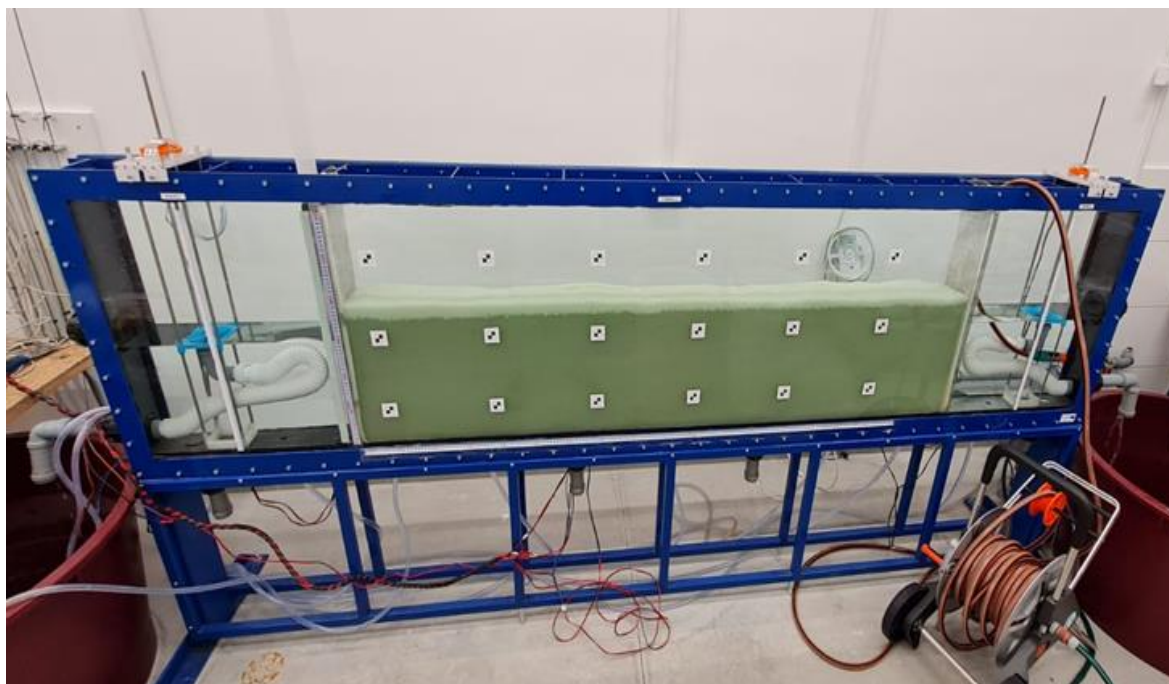
### 3. LABORATORIJSKO MODELIRANJE PROCESA U UVJETIMA DVOSTRUKE GUSTOĆE

#### 3.1. Eksperimentalni sustav

Eksperimentalni sustav koji je omogućio laboratorijska ispitivanja sastoji se od kanala, poroznog medija različitih frakcija zrna, dviju sondi za mjerenje parametara vode, umjetnog bojila za slanu vodu te drugih popratnih sadržaja poput epruvete, posude, tlačne pumpe i slično.

##### 3.1.1. Kanal

Laboratorijska ispitivanja su se vršila na pravokutnom kanalu koji je prikazan na slici 4.



*Slika 4 Kanal za provođenje eksperimenta*

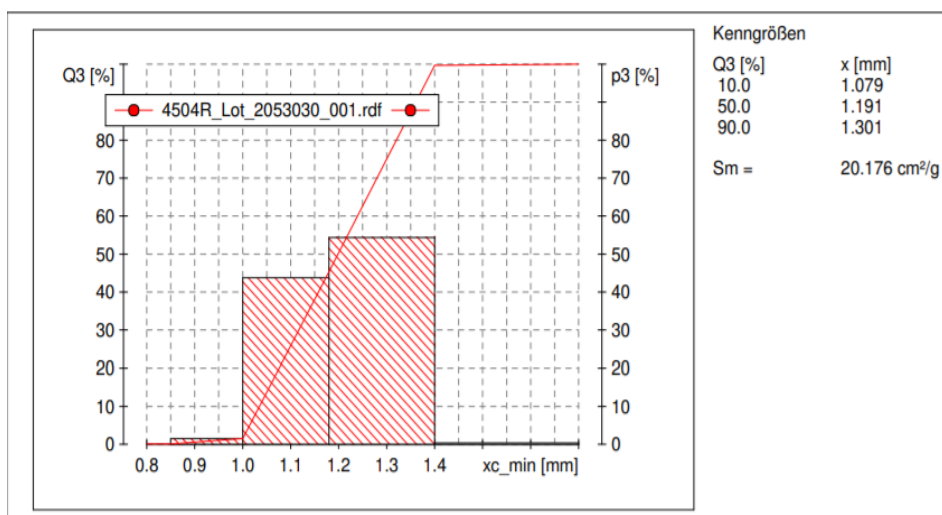
Kanal predstavlja kruta čelična konstrukcija koja je prethodno projektirana na način da podnese opterećenja koja će se javljati prilikom izvođenja eksperimenata. Čelična

konstrukcija sastoji se od rešetkastog dijela koji preuzima opterećenja i prenosi ih na tlo te od čeličnih ojačanja na samim obrubima kanala. Za čelični okvir zalijepljena su i zašarafljena dva perforirana stakla, jedan sa prednje strane kanala i jedan sa stražnje. Staklo je posebno obrađeno tako da može podnijeti opterećenja od dinamičkih sila i vlastite težine te je u cjelini od početka do kraja kanala. Debljina stakla je 5,0 (mm) i u cijelosti je providno kako bi se jasno mogli vidjeti i očitavati rezultati eksperimenta unutar kanala. Dužina dijela kanala koji služi za samu provedbu eksperimenata je 300,0 (cm), visina 75,0 (cm) te širina 13,0 (cm). Unutar samog kanala nalaze se tri komore: lijeva komora, središnja i desna komora. Središnja komora je odvojena od lijeve i desne komore. Pregrađena je metalnim pločicama koje na sebi imaju rupice kako bi se omogućio nesmetan protok vode između komora. Na metalne pločice su zalijepljeni geotekstili koji onemogućavaju rasipanje pijeska između komora. S lijeve strane između lijeve i središnje komore nalazi se i zapornica koja se može podizati i spuštati, ovisno o potrebama eksperimenta. Središnja komora je uvijek ispunjena poroznim medijem. Dužina središnje komore iznosi 188,0 (cm), visina 75,0 (cm) te širina 12,5 cm. Rezultati eksperimenata vidljivi su u središnjoj komori. Lijeva i desna komora služe za postavljanje rubnih uvjeta. Sastoje se od same komore koja je ispunjena vodom te po jedan preljev u svakoj komori pomoću kojega se održava visina vode u komorama. Preljevi se mogu podizati i spuštati na odgovarajuće visine, a kapacitet preljeva je veći od konstantnog dotoka vode. Lijeva i desna komora su istih dimenzija i zajedno sa središnjom komorom čine kanal za provođenje eksperimenata. Dužina lijeve i desne komore je 55,0 (cm), visina je 75,0 (cm) a širina 12,5 (cm).

### **3.1.2. Porozni medij (pijesak)**

Ranije opisani eksperiment na prirodnom poroznom mediju, u ovom slučaju pijesku s ušća rijeke Neretve, nije se mogao provesti jer prirodni medij apsorbira boju koja se koristi za eksperimente. U laboratorijskim ispitivanjima prirodni materijal zamijenjen je silikatnim kuglicama koje su korištene za simulaciju poroznog medija. Korištene su silikatne kuglice proizvođača Sigmund Lindner GmbH, veličine zrna 1,0-1,3 (mm), tip materijala Glass Beads Type S.

Prikazana je granulometrijska krivulja za navedeni materijal.



Slika 5 Granulometrijska krivulja - zrno 1,0 - 1,3 mm

### 3.1.3. Ostali laboratorijski elementi

Prilikom provođenja laboratorijskih eksperimenata korištene su i sonde za mjerenje parametara vode. Multi - parametarska sonda zasnovana na mikroprocesoru omogućava mjerenje ključnih parametara uključujući pH, ORP, vodljivost, otopljeni kisik i temperaturu. Sonda digitalno prenosi očitavanja na brojilo, gdje se mogu prikazati i zabilježiti podatkovne točke.

Sonda je prikazana na slici 6.



Slika 6 Multi - senzorska sonda za mjerenje parametara vode

Provođenje eksperimenata zahtijevalo je i korištenje boje u svrhu razlikovanja slatke i slane vode. Tako je slana voda bila obojana crveno kako bi bila uočljiva prilikom provođenja eksperimenata i bilježenja rezultata. Potrebne su bile i epruvete koje su služile za mjerenje protoka, dvije tlačne pumpe, guma za dotok vode te GoPro kamera koja je bilježila rezultate eksperimenata.

Opisani elementi koji su korišteni tvorili su eksperimentalni sustav potreban za provođenje laboratorijskih ispitivanja.

### **3.2. Provedba eksperimenata**

Prije samog početka provedbe eksperimenata potrebno je pripremiti i očistiti kanal te provjeriti ispravnost svih ostalih elemenata. Eksperimenti su provedeni u uvjetima vodonosnika pod tlakom. Provedena su dva eksperimenata: Eksperiment 1 i Eksperiment 2.

Prilikom provođenja eksperimenata potrebno je ispitati brzine tečenja i pripadajuće konduktivitete, a nakon toga slijedi ispitivanje duljine prodiranja slanog klina u vodonosnike pod tlakom. Za provedbu oba eksperimenata korišteni su jednaki hidraulički, hidrogeološki te fizikalni parametri, a jedina razlika bila je u rasporedu postavljanja gradijenta u vremenu. Razlog prikaza dvaju eksperimenata jednakih parametara, a različitog redoslijeda postavljanja gradijenta je prikaz razlike u duljini slanog klina te dokaza pretpostavke da duljina klina ovisi o tome je li klin u procesu uzastopne propagacije, napredovanja ili se pak radi o povlačenju slanog klina iz vodonosnih slojeva.

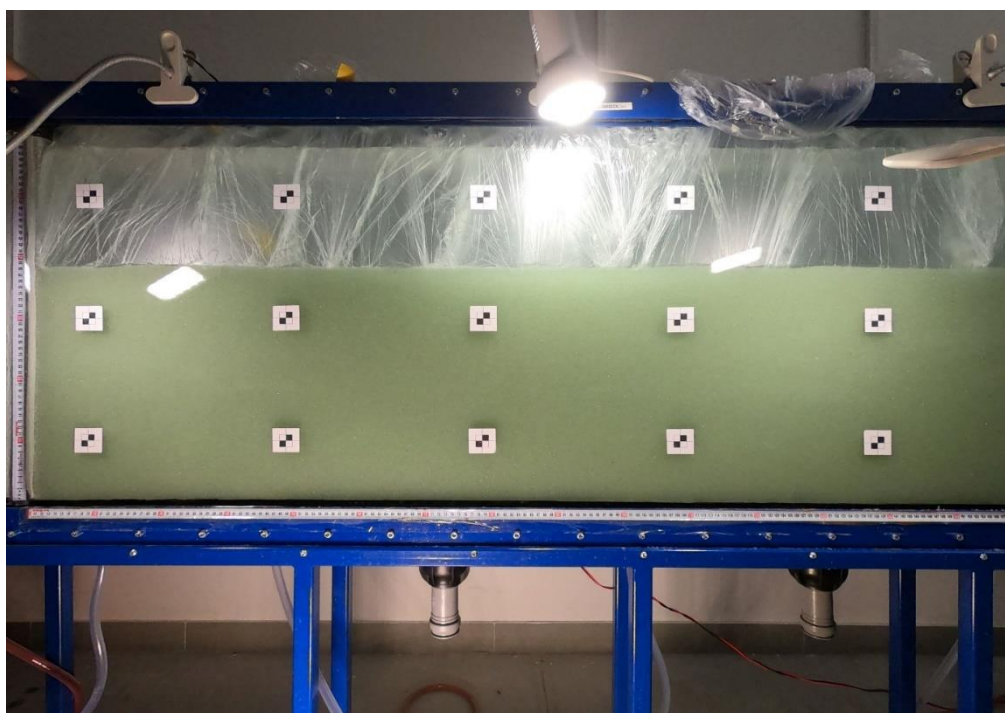
#### **3.2.1. Tečenje**

Kao primarni cilj nameće se ispitati tečenje u kanalu za odabrani medij. Za provedbu je potrebno pripremiti porozni medij odgovarajućeg granulometrijskog sastava te ispuniti središnju komoru odgovarajućim medijem.

Kanal se puni poroznim medijem u slojevima debljine otprilike 5,0 (cm) kako bi se ravnomjerno razvrstao te ispravno zbijao. Prilikom provođenja eksperimenata tečenja glavni zadatak je koncentrirati se na tečenje te odrediti brzine tečenja kroz porozni medij.

Eksperimenti su provedeni u kanalu opisanom pod 3.1.1. za medij promjera zrna od 1,0 - 1,3 (mm).

Poroznim medijem je kanal ispunjen do visine od 38,0 (cm) u slojevima debljine 5,0 (cm), a svaki sloj ispravno je zbijen kako ne bi ostali zarobljeni zračni jastučići unutar medija. Ispravno zbijanje je neophodno kako bi bilo moguće ostvariti homogene uvjete. Kada su zadovoljeni homogeni uvjeti i poravnat porozni medij unutar kanala bilo je potrebno postići uvjete vodonosnika pod tlakom. Pristupom improvizacije postignuti su uvjeti pod tlakom na način da se na porozni medij postavila nepropusna folija i ispunila vodom (slika 7). Visina nepropusnog sloja je iznosila 20 cm.



*Slika 7 Prikaz nepropusnog sloja  $d=20,0$  cm*

Neposredno nakon pripreme medija i postavljanja nepropusnog sloja kanal se ispunio vodom. Odredila se visina vode u lijevoj i desnoj komori pomoću preljeva te su na taj način postignuti uvjeti tečenja. Tečenje se odvijalo iz smjera više pozicioniranog preljeva ka niže pozicioniranom preljevu. Porozni medij je u potpunosti trebao biti zasićen vodom što znači da je u potpunosti saturiran, a osim navedenog trebali su biti ostvareni i stacionarni uvjeti tečenja. Stacionarnost tečenja kontrolirala se na preljevnom ispustu u lijevoj komori.

Eksperimentom je bilo potrebno odrediti brzine tečenja kroz porozni medij. Konduktivitet je ispitivan za tri različita gradijenta postavljanjem fiksne visine vode u lijevoj komori koja je iznosila 40,0 (cm) te predstavljala nizvodni rubni uvjet ( $h_1$ ). Visina vode u desnoj komori je u prvom slučaju iznosila 42,2 (cm), u drugom slučaju 41,9 (cm) i u trećem 41,6 (cm) te je predstavljala uzvodne rubne uvjete ( $h_2$ ).

Nakon postavljanja gradijenta i postizanja stacionarnog stanja tečenja kroz porozni medij moguće je pristupiti mjerenju protoka vode u jedinici vremena. Postupak proračuna protoka vode se provodi na način da se na lijevom preljevu mjeri volumen vode. Reprezentativni volumen vode se dobije višekratnim mjerenjem volumena vode koji isteče prelijevanjem u lijevoj komori u vremenu od  $\Delta t=30$  (s) te se odredi aritmetička sredina izmjerenih volumena vode.

Postupak je dan izrazom:

$$V_{SR} = \frac{V_1 + V_2 + \dots + V_N}{N}$$

a rezultat reprezentativnog volumena  $V_{SR}$  je izražen u ( $m^3$ ).

Nakon određenog volumena vode iz izraza:

$$Q = \frac{V_{SR}}{\Delta t}$$

dobiju se veličine protoka. Protok  $Q$  je izražen u ( $m^3/s$ ).

Potom se izmjeri visina saturiranog dijela poroznog medija  $d$  (m), i debljina  $b$  (m) te se izračuna površina kroz koju se odvija protok vode .

Površina  $A_s$  se dobije izrazom :

$$A_s = d * b$$

Izražava se u ( $m^2$ ) . Nakon određivanja površine iz izraza za protok  $Q = V \cdot A$  izvede se izraz za konduktivitet :

$$V = \frac{Q}{A}; (m/s)$$

$$k = \frac{V}{I}; (m/s)$$

Konduktivitet se dobije omjerom brzine  $v$  (m/s) i gradijenta  $I$  koji predstavlja razliku uzvodnog  $h_2$  (m) i nizvodnog rubnog uvjeta  $h_1$  (m) podijeljenu s duljinom kroz koju se odvija tečenje  $L$  (m).

$$I = \frac{h_2 - h_1}{L};$$

Eksperiment završava dobivanjem rezultata konduktiviteta za svaki od gradijenata, u ovom slučaju za četiri različita gradijenta. Postupak se provodio za oba medija, a došlo se do zaključka da konduktivitet ponajviše ovisi o samom mediju i veličini zrna.

### 3.2.2. Transport

Nakon odrađenih eksperimentalnih ispitivanja poroznog medija na tečenje i dobivenih rezultata hidrauličke provodljivosti i ostalih hidrauličkih parametara pristupilo se eksperimentalnim rješenjima opisa polja slanosti u poroznom mediju. U ovom slučaju zagađenje predstavlja morska voda. Eksperimentalnim rješenjima opisa polja slanosti pristupilo se na način da su se primarno odredili rubni uvjeti. Postavio se desni rubni uvjet  $h_2$  na određenu visinu i lijevi rubni uvjet  $h_1$  na visinu manju od desnog rubnog uvjeta kako bi se ostvarilo tečenje s desna ka lijevo tj. iz područja sa slatkom vodom u smjeru morskog rubnog uvjeta. Eksperiment je proveden za tri različita gradijenta kako bi se dobila bolja i efikasnija analiza rezultata i podataka. Na taj način pratilo se ponašanje slanog klina u vodonosnom sloju.

Nakon postavljanja rubnih uvjeta, ostvarenog gradijenta i hidrauličke provodljivosti potrebnog stacionarnog tečenja u homogenom poroznom mediju bilo je potrebno pripremiti smjesu koja će zamijeniti morsku vodu. Proces pripreme smjese se odvijao u spremnicima koji su napunjeni slatkom vodom. Pripremanje smjese vršilo se dodavanjem soli do potrebne gustoće od 1026,0 (kg/m<sup>3</sup>). Parametri slane vode su se kontrolirali i mjerili pomoću multi-parametarske sonde zasnovane na mikroprocesoru. Koristile su se dvije sonde kako bi se mogli usporediti rezultati obe i na taj način kontrolirati. Kada su postignuti zahtijevani fizikalni parametri slane vode, istu je bilo potrebno obojiti kako bi se zorno primijetila razlika između slatke i slane vode prilikom puštanja eksperimenta.

Proces bojanja slane vode odvija se na način da se slana voda boji odgovarajućom crvenom bojom dodavajući određenu količinu bojila u spremnike i miješanjem dok se ne homogenizira.

Na slici 8 su prikazana dva spremnika sa slanom vodom u koja se dodala boja te dvije sonde pomoću kojih se mjere parametri slane vode.



*Slika 8 Sonde za mjerenje parametara i bojanje slane vode*

Kada je pripremljena slana voda i u kanalu su postignuti stacionarni uvjeti tečenja za određeni gradijent bilo je potrebno slatku vodu u lijevoj komori zamijeniti slanom vodom. Proces zamjene slatke vode sa slanom potrebno je odraditi precizno i polagano kako ne bi došlo do velikih gubitaka slane vode prilikom zamjene. Prije nego se pristupi zamjeni vode potrebno je spustiti zapornicu između lijeve i središnje komore kako bi se zaustavilo tečenje.

Zamjena slatke i slane vode se vrši pomoću dvije pumpe. Jedna pumpa je postavljena na dno lijeve komore koja je ispunjena slatkom vodom do visine lijevog rubnog uvjeta i ona crpi slatku vodu iz komore. Druga pumpa je postavljena u posudu sa slanom vodom kako bi se slana voda crpila i ulijevala u komoru. Proces se vrši sve dok se u potpunosti slatka voda ne zamjeni sa slanom.

Važno je napomenuti kako je gustoća slane vode u posudama iznosila 1026,0 (g/l) , a nakon ulijevanja u lijevu komoru prije puštanja i za vrijeme puštanja samog eksperimenta transporta gustoća slane vode u komori iznosila je 1025,0 (g/l). Prilikom zamjene slatke za slanu vodu bilo je potrebno kontrolirati fizikalne parametre vode. Proces zamjene kontroliran



je multi-parametarskom sondom te parametri u komori trebaju zadovoljavati parametar gustoće, saliniteta i električne provodljivosti.

Kada su parametri slane vode u potpunosti zadovoljeni ponovno se podiže zapornica. Nakon podizanja zapornice ponovno se uspostavilo tečenje te slani klin u trenutku  $t=0$  (s) počinje prodirati u porozni medij u suprotnom smjeru od tečenja. Eksperimentom se pratilo prodiranje slanog klina u porozni medij u vremenu. Rezultati su se pratili sve dok se nisu stacionirali odnosno dok se klin slane vode nije potpuno smirio na udaljenosti  $x_t$ . Nakon postizanja stacionarnog stanja očitala se duljina prodiranja slanog klina  $x_t$  kao rezultat eksperimenta. Samo napredovanje klina je potrebno pratiti i bilježiti rezultate prodiranja slanog klina. Rezultati se bilježe iz minute u minutu pomoću GoPro kamere. Na taj način je vidljiva precizna slika prodiranja slane vode u porozni medij u ovisnosti o hidrauličkim parametrima, granulometrijskom sastavu poroznog medija te parametrima slane vode. Bitno je naglasiti da je eksperiment proveden na način da je razina slane vode u lijevoj komori bila fiksna dok se razina vode u desnoj komori mijenjala ovisno o potrebama eksperimenta. Nakon postizanja stacionarnog stanja za jedan gradijent i očitavanja rezultata prodora slanog klina  $x_t$ , razina slane vode (lijevi rubni uvjet) ostaje ista, a razina slatke vode (desni rubni uvjet) se mijenja.

Isti pristup ponovljen je u dva eksperimenta s istim gradijentima, ali drugačijim redoslijedom postavljanja gradijenata. Odrađena su dva eksperimenta radi točnije i preciznije verifikacije napredovanja slanog klina te prikaza kako duljina slanog klina ovisi o činjenici radi li se o napredovanju ili povlačenju slanog klina. Proces napredovanja ili povlačenja ovisi o postavljanju visine desnog rubnog uvjeta.

### 3.2.3. Eksperiment 1

U Eksperimentu 1 lijevi rubni uvjet postavljen je kao konstantan, dok se desni rubni uvjet postepeno povećava. Analiziralo se napredovanje klina ovisno o visini desnog rubnog uvjeta. Klin je nakon prvog napredovanja i postizanja maksimalne duljine prodiranja konstantno bio u procesu opadanja jer se visina desnog rubnog uvjeta povećavala, a što je rezultiralo većim brzinama tečenja pa samim time i povlačenjem slanog klina.

### 3.2.4. Eksperiment 2

U Eksperimentu 2 lijevi rubni uvjet je također postavljen s fiksnom visinom, dok se desni rubni uvjet mijenjao. Desni rubni uvjet prvo je postavljen na početnu visinu, a nakon čega je postepeno smanjivan. Prilikom smanjivanja visine desnog rubnog uvjeta klin se propagirao u smjeru  $x$  osi za određenu duljinu, dok je nakon konačnog smanjenja desnog rubnog uvjeta bio u napredovanju sve do postizanja stacionarnog stanja.

Eksperimenti transporta zagađenja, konkretno transporta slane vode u vodonosnik slatke vode za rezultat su davali duljinu slanog klina  $x_t$ . Pratilo se ponašanje i propagacija slanog klina sve dok klin ne bi postigao stacionarno stanje. Dakle, Eksperimentom 1 prikazano je kako je duljina slanog klina  $x_t$  opadala prilikom povećanja desnog rubnog uvjeta i dosegala stacionarna stanja nakon određenih vremenskih perioda, dok se Eksperimentom 2 prikazalo kako je duljina slanog klina  $x_t$  napredovala prilikom smanjenja desnog rubnog uvjeta do stacionarnih stanja u određenim vremenskim periodima.

Unatoč istim hidrauličkim i fizikalnim parametrima, dobivene duljine prodiranja slanog klina približne su, ali ne i identične što ukazuje da duljina prodiranja slanog klina ovisi o činjenici radi li se o konstantnom napredovanju ili povlačenju klina, a za postizanje stacionarnih stanja potrebno je različito vrijeme propagacije slanog klina.

## 4. VERIFIKACIJA DULJINE SLANOG KLINA $x_t$

Potrebno je određenim rješenjima postići uvjete kojima će se za rezultat na temelju ostalih hidraulički i fizikalnih parametara dobiti parametar duljine prodiranja slanog klina  $x_t$ . Rezultati su dobiveni analitičkim modelima te su verificirani eksperimentalnim metodama kako bi se mogla utvrditi točnost rezultata.

### 4.1. Korištenje analitičkih izraza

Analitičkim modelima u ovisnosti o ostalim hidrauličkim i fizikalnim parametrima slatke i slane vode te poroznog medija dobiveni su određeni rezultati parametra duljine prodiranja slanog klina u vodonosnik slatke vode. Analitička rješenja i rezultati dobiveni analitičkim modelima koji su bazirani na temelju dva tipa rubnih uvjeta (rubni uvjet konstantnog tlaka vode te rubni uvjet konstantnog protoka vode) prikazani su sljedećim izrazima u tablicama:

Rješenje 1:

$$x_t = \frac{k \cdot \varepsilon \cdot B^2}{2 \cdot Q_0}$$

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	k (m/s)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\varepsilon$	$h_s^*$ (m)	$Q_{fl}$ (m <sup>3</sup> /s)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1025	1000	0,012	0,400	0,422	0,025	0,4053	0,000041	0,533134
1,88	0,38	1025	1000	0,012	0,400	0,419	0,025	0,4053	0,000033	0,649455
1,88	0,38	1025	1000	0,012	0,400	0,416	0,025	0,4053	0,000026	0,830698

Tablica 1 Analitičko rješenje 1

Rješenje 2:

$$x_t = \frac{k \cdot B^2}{2 \cdot \alpha \cdot q_f}$$

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	k (m/s)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$q_f$ (m <sup>2</sup> /s)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1025	1000	40	0,012	0,400	0,422	0,000041	0,533134
1,88	0,38	1025	1000	40	0,012	0,400	0,419	0,000033	0,649455
1,88	0,38	1025	1000	40	0,012	0,400	0,416	0,000026	0,830698

Tablica 2 Analitičko rješenje 2

Rješenje 3:

$$x_t = \frac{B \cdot L}{2 \cdot \alpha \cdot \left( h_f - \left( 1 + \frac{1}{\alpha} \right) \cdot h_s + \frac{B}{2 \cdot \alpha} \right)}$$

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1025	1000	40	0,400	0,422	0,533134
1,88	0,38	1025	1000	40	0,400	0,419	0,649455
1,88	0,38	1025	1000	40	0,400	0,416	0,830698

Tablica 3 Analitičko rješenje 3

Važno je napomenuti kako se kod izračuna analitičkih rješenja dobiju jednaki rezultati bez obzira na redoslijed postavljanja rubnih uvjeta te su prikazani rezultati adekvatni i mjerodavni. Mijenjanjem redoslijeda postavljanja desnog rubnog uvjeta ( $h_f$ ) ne postiže se promjena rezultata.

## 4.2. Rezultati eksperimentalnih istraživanja

### 4.2.1. Rezultati Eksperimenta 1

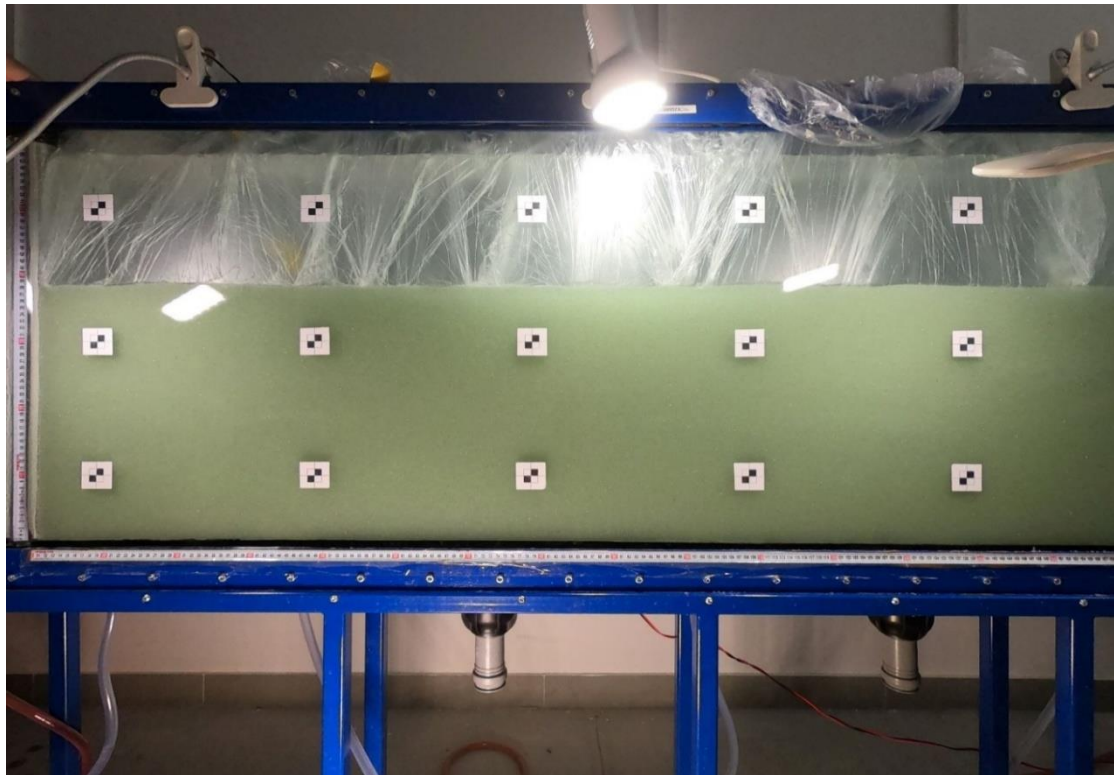
Primarno je prikazati rezultate tečenja dobivene eksperimentalnim istraživanjem. Rezultati su prikazani u tablici 4:

$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta h/\Delta l$	$\Delta t$ [sek]	V [cm <sup>3</sup> ]			$V_{avg}$ [cm <sup>3</sup> ]	Q [cm <sup>3</sup> /sek]	k [cm/sek]	v [cm/sek]
42,20	40,00	2,20	0,01170	30	205	204	204	204,33	6,81111	1,22535	0,01434
41,90	40,00	1,90	0,01011	30	173	172	173	172,67	5,75556	1,19894	0,01212
41,60	40,00	1,60	0,00851	30	144	143	144	143,67	4,78889	1,18462	0,01008

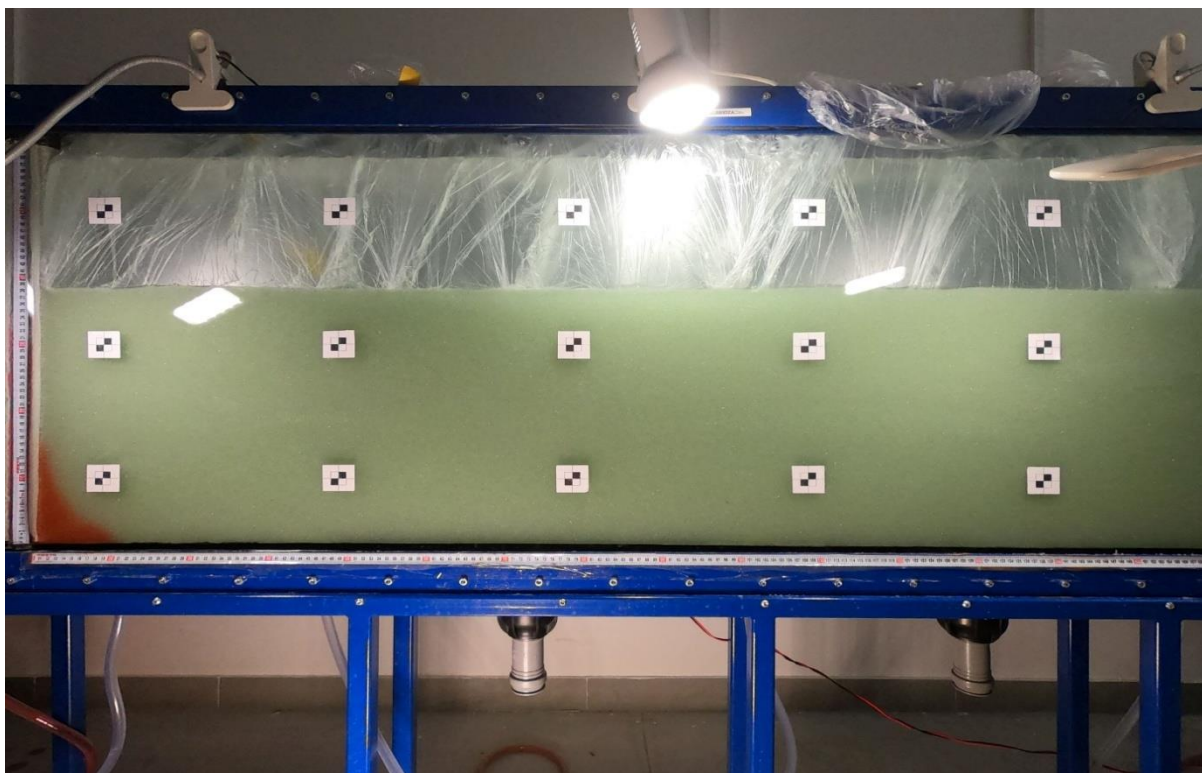
*Tablica 1 Rezultati ispitivanja konduktiviteta*

Eksperimentalnim istraživanjem tečenja dobiveni su rezultati konduktiviteta  $k$  (cm/s) koji su neophodan parametar prilikom izračuna duljine slanog klina analitičkim rješenjima. Iz dobivenih rezultata se usvoji vrijednost konduktiviteta  $k$  te se sa njom može pristupiti izračunu potrebnih parametara.

Nakon prikazanih rezultata tečenja prikazani su rezultati transporta zagađenja slanom vodom dobiveni laboratorijskim putem. Rezultati su se bilježili svaku minutu, a slikama su prikazani neki od vremenskih trenutaka te karakteristični vremenski trenuci u kojima je došlo do stacionarnog stanja ili do mijenjanja gradijenta.



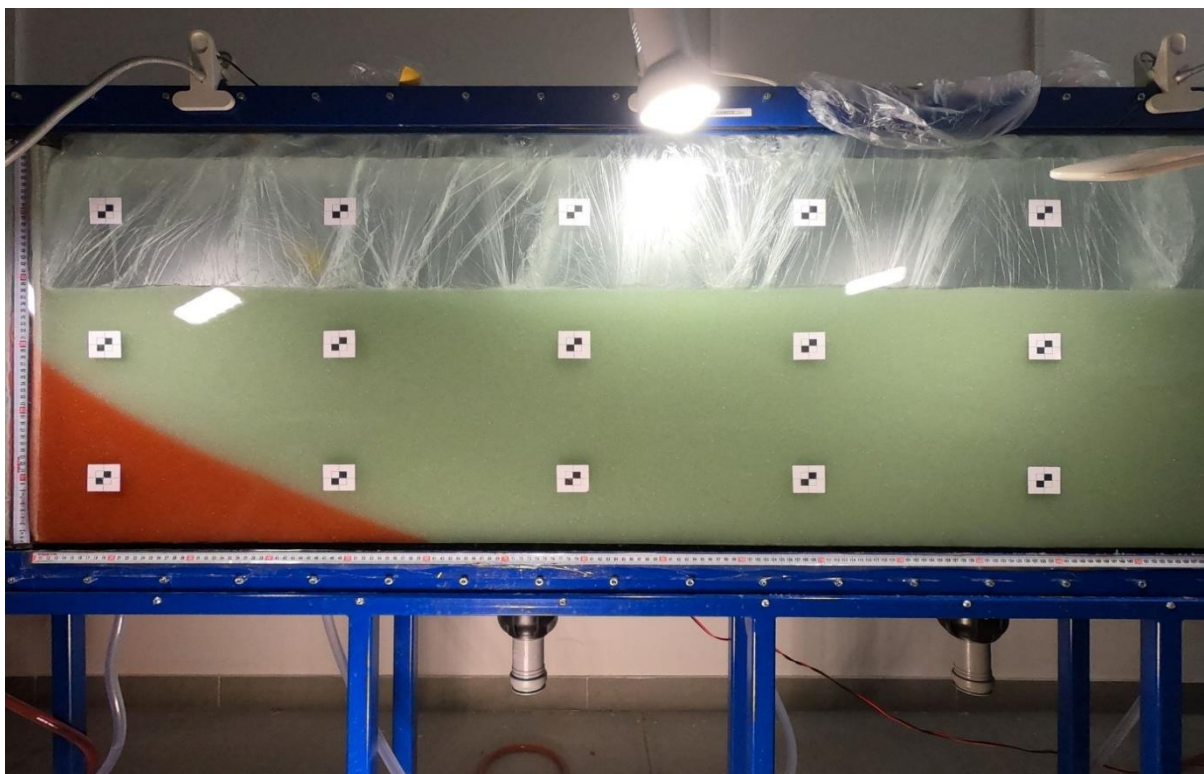
*Slika 9 Početno stanje prije puštanja eksperimenta*



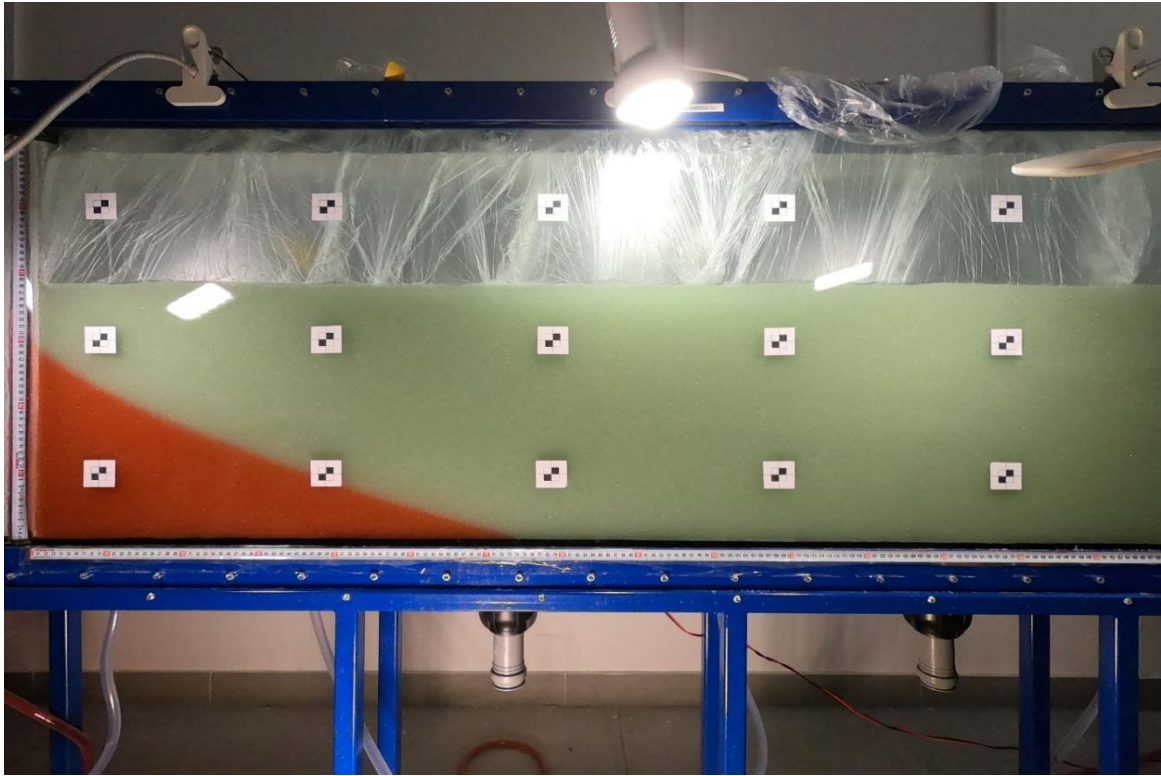
*Slika 10 Stanje u trenutku nakon jedne minute*



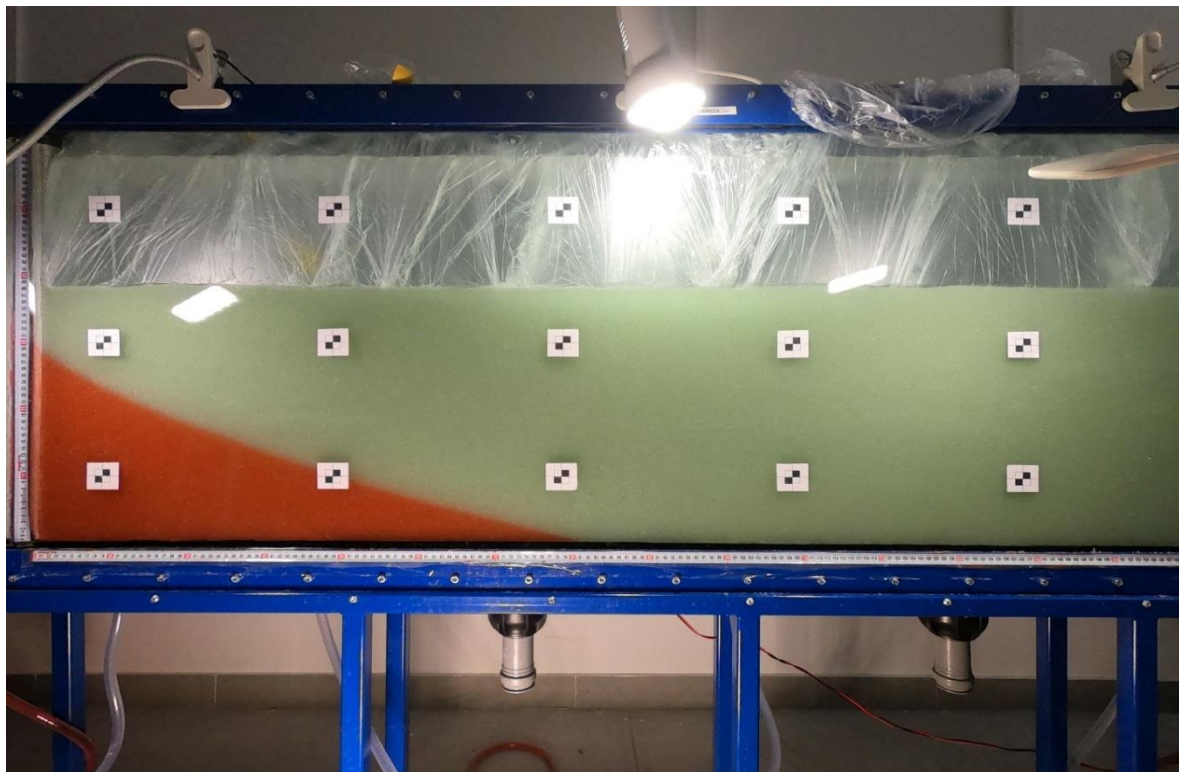
*Slika 11 Stanje u trenutku  $t=15$  min*



*Slika 12 Stanje u trenutku  $t=30$  minuta*

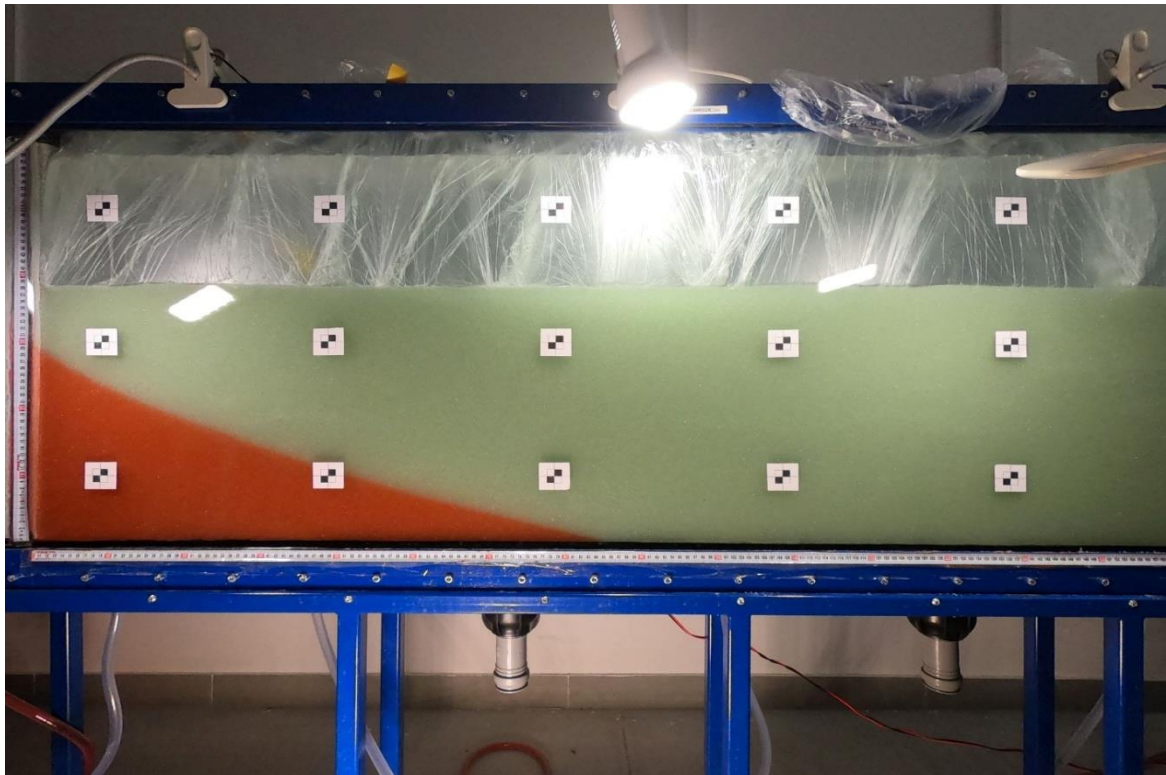


*Slika 13 Stanje u trenutku  $t=60$  minuta*

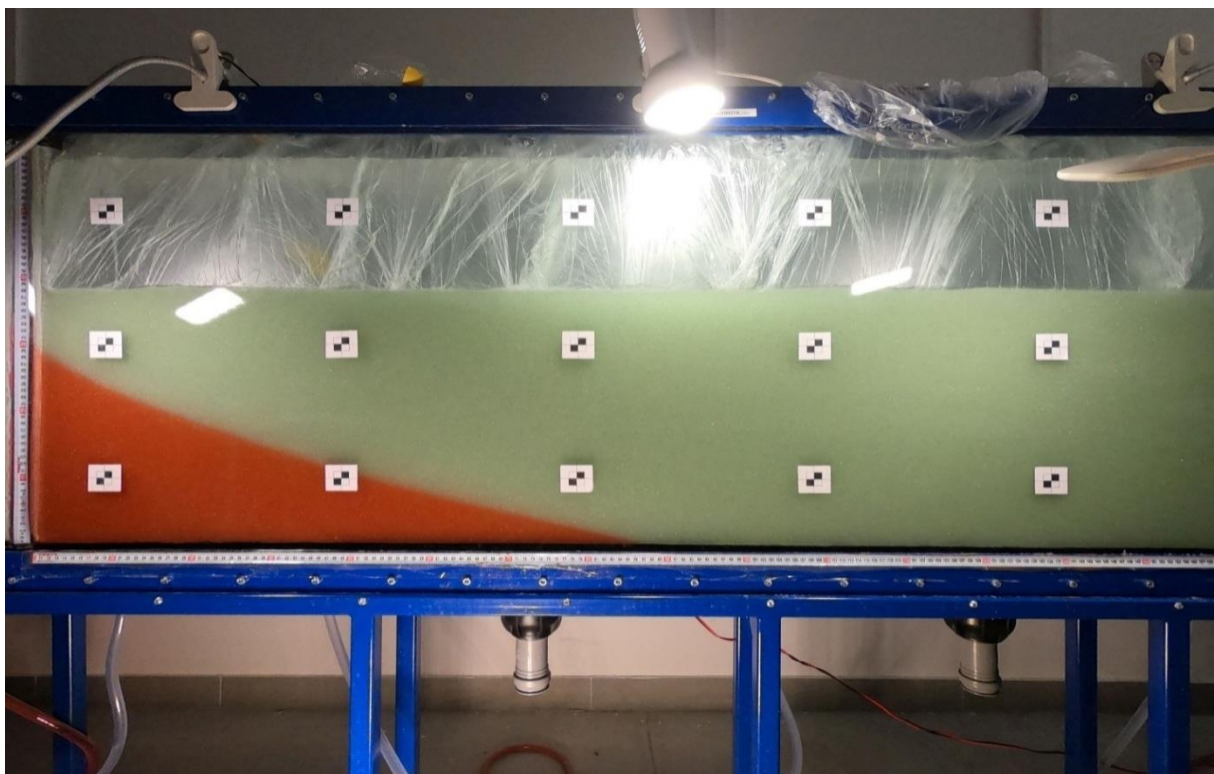


*Slika 14 Stanje u trenutku  $t=90$  minuta*

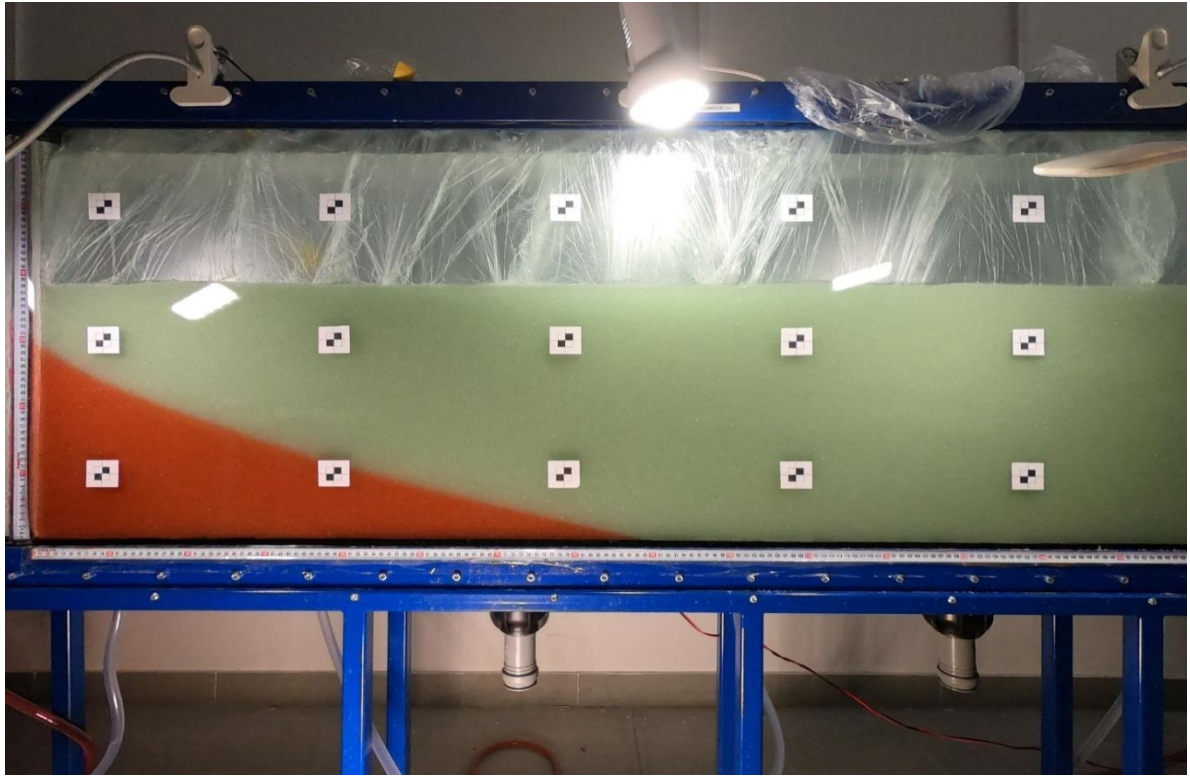




*Slika 15 Stanje u trenutku  $t=120$  minuta*



*Slika 16 Stanje u trenutku  $t=150$  minuta*



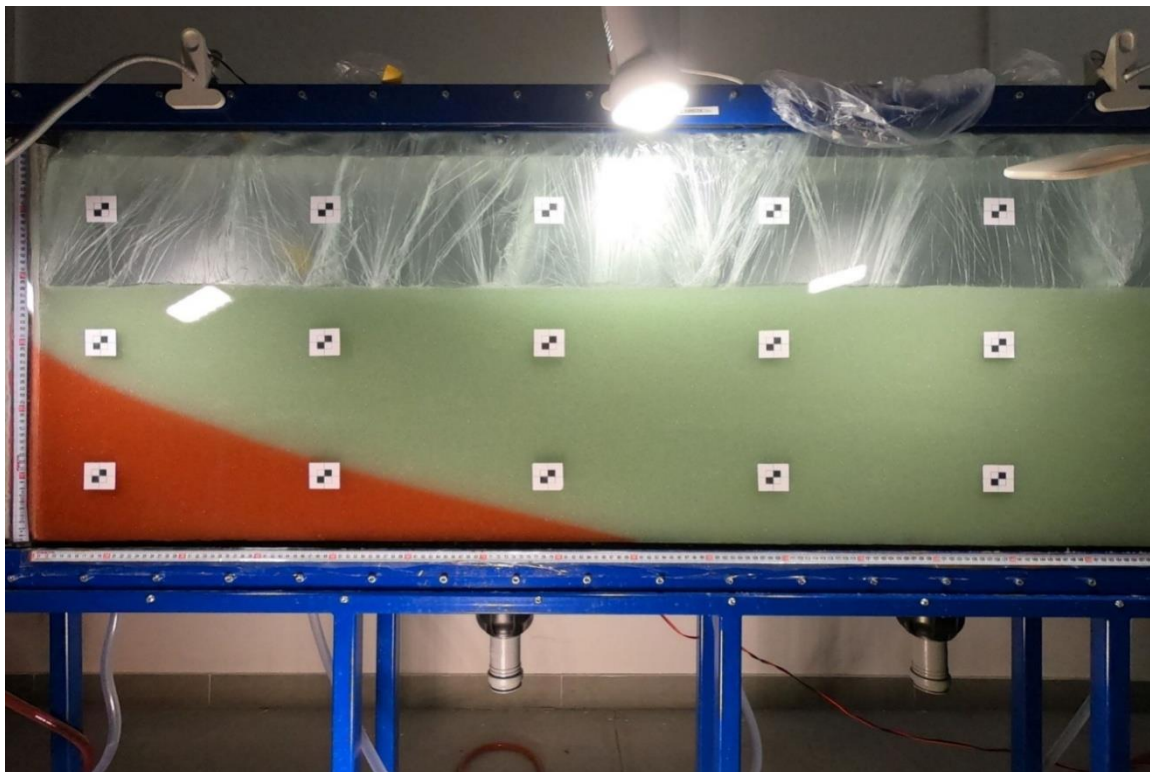
*Slika 17 Stanje u trenutku  $t=180$  minuta*



*Slika 18 Stanje u trenutku  $t=220$  minuta*



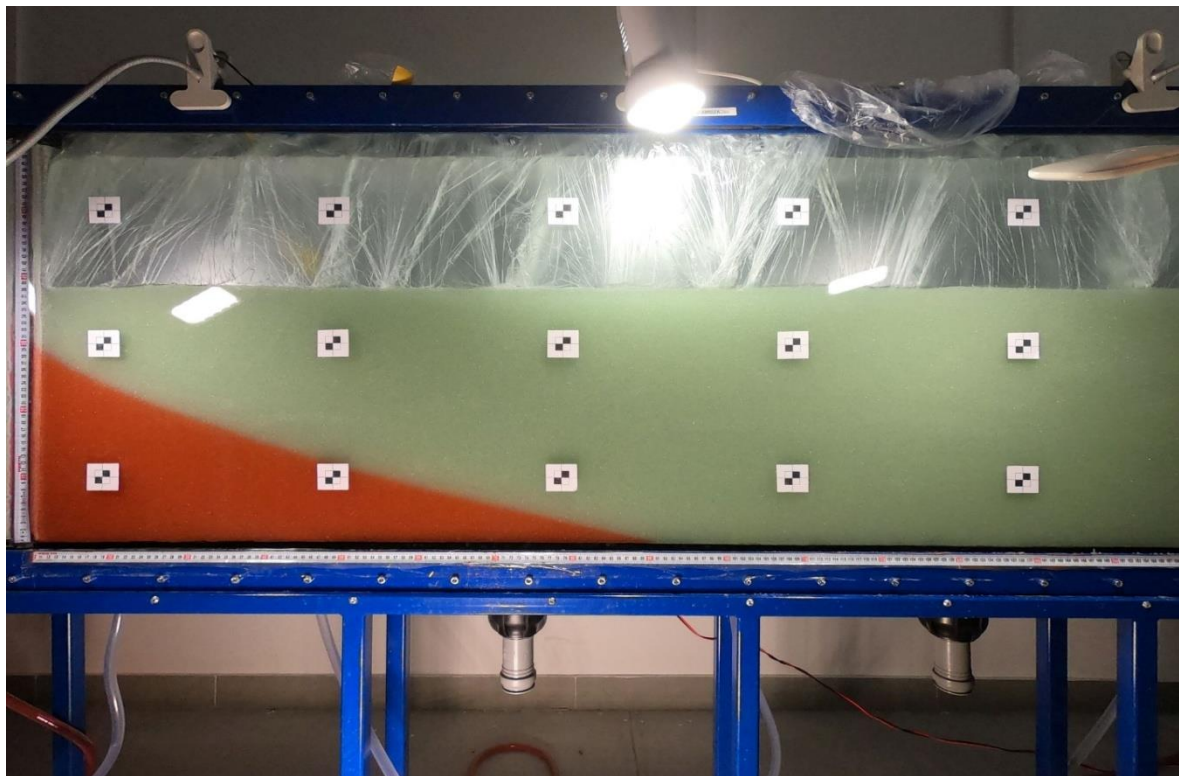
*Slika 19 Stanje u trenutku  $t=250$  minuta*



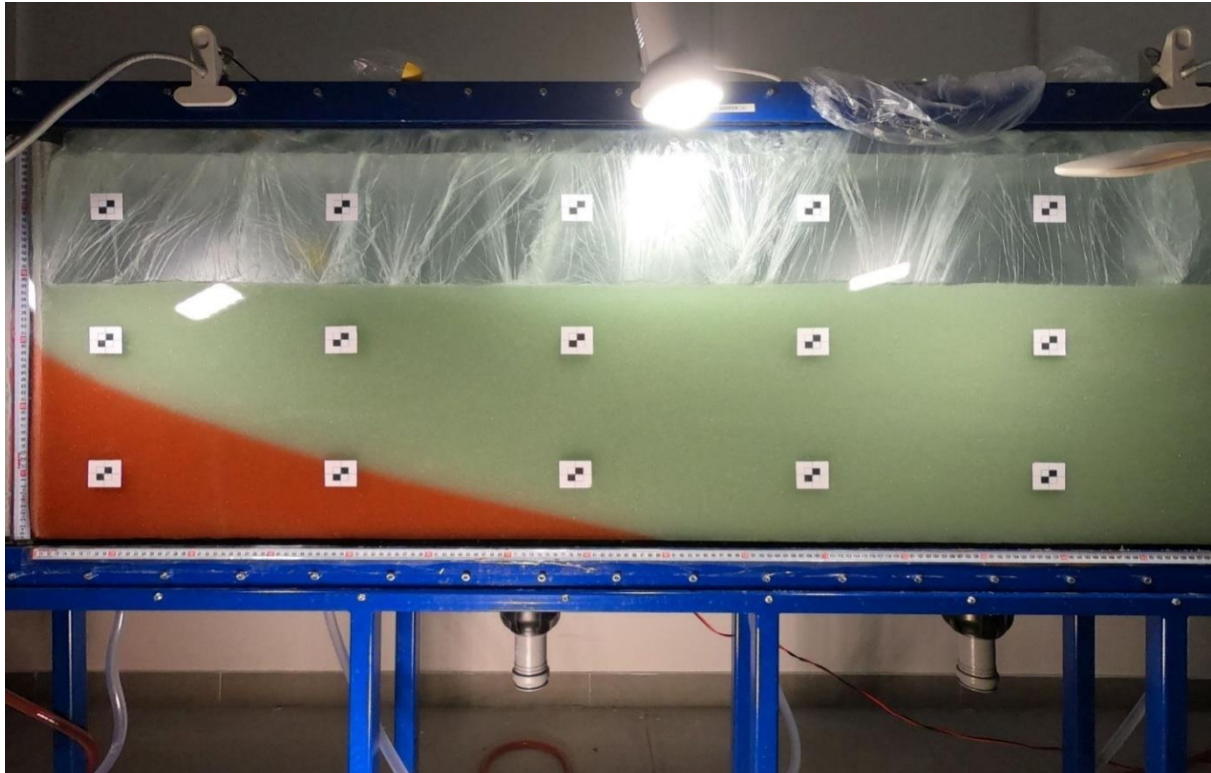
*Slika 20 Stanje u trenutku  $t=260$  minuta - STACIONARNO STANJE*

Na slici 20 vidljivo je ostvareno stacionarno stanje 260 minuta nakon puštanja eksperimenta za odabranu vrijednost desnog rubnog uvjeta koja u ovom slučaju iznosi  $h_2=41,6$  (cm). Lijevi rubni uvjet je konstantan i iznosi  $h_1=40,0$  (cm). Rezultat duljine klina je očitano sa slike u trenutku kada su postignuti stacionarni uvjeti te se duljina klina više ne mijenja. Duljina klina iznosi  $x_t=81,0$  cm.

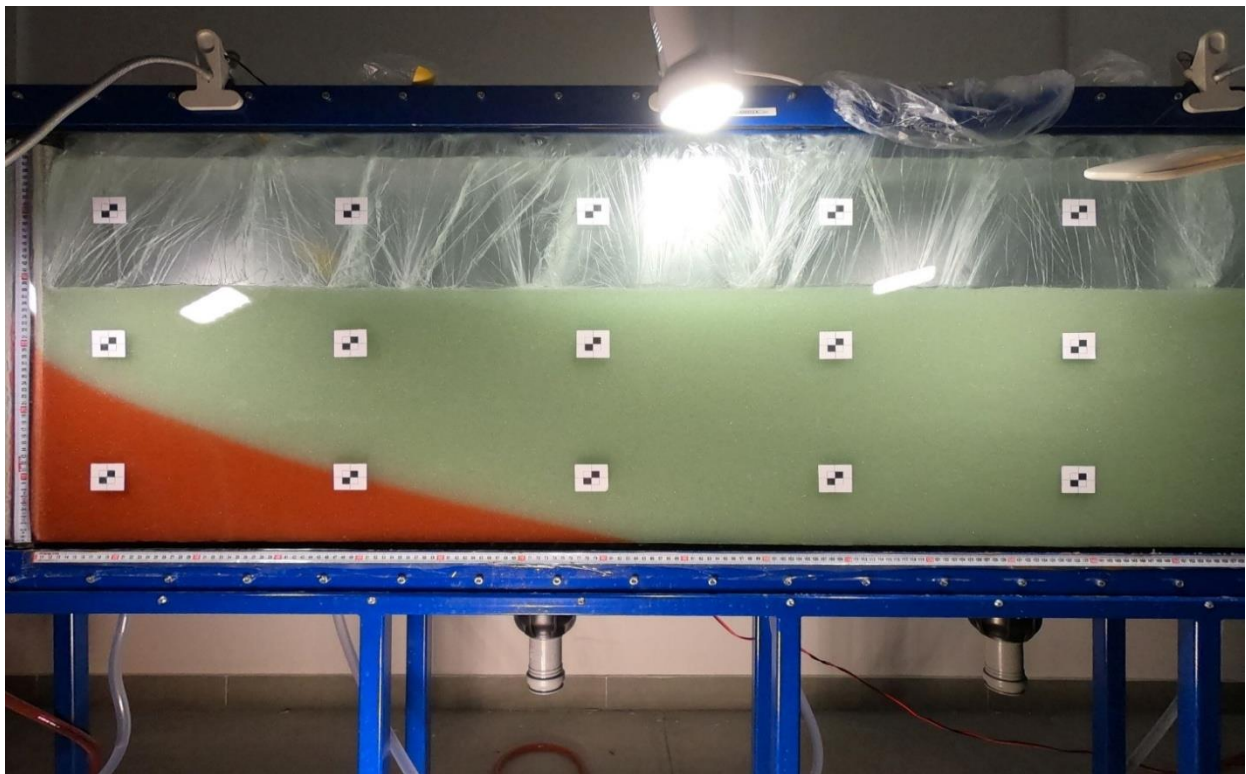
Nakon očitavanja rezultata duljine klina za prvi slučaj (gradijent), desni rubni uvjet je povećan za 0,3 (cm) s vrijednosti od 41,6 (cm) na 41,9 (cm). Ponašanje slanog klina nakon povećanja gradijenta, a sve do postizanja ponovnog stacionarnog stanja, prikazano je u narednim slikama.



*Slika 21 Stanje u trenutku promjene  $t=270$  minuta (promjena gradijenta)*



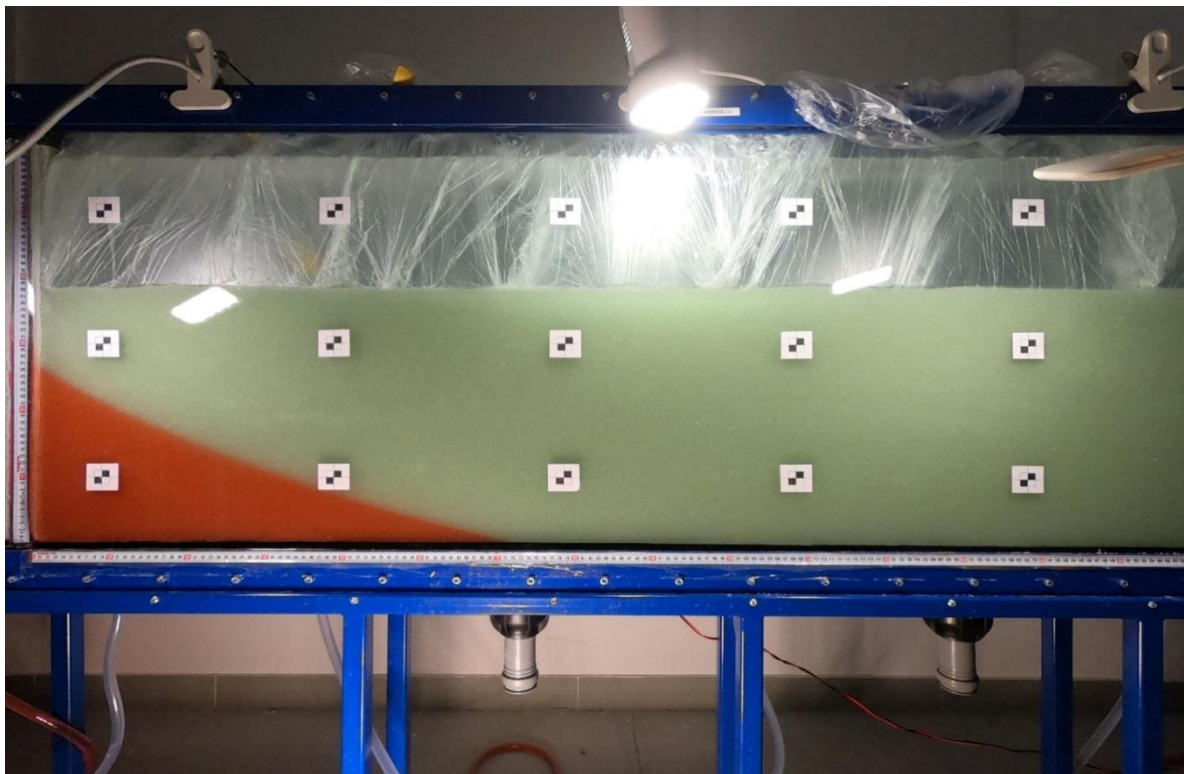
*Slika 22 Stanje u trenutku  $t=285$  minuta-povlačenje klina*



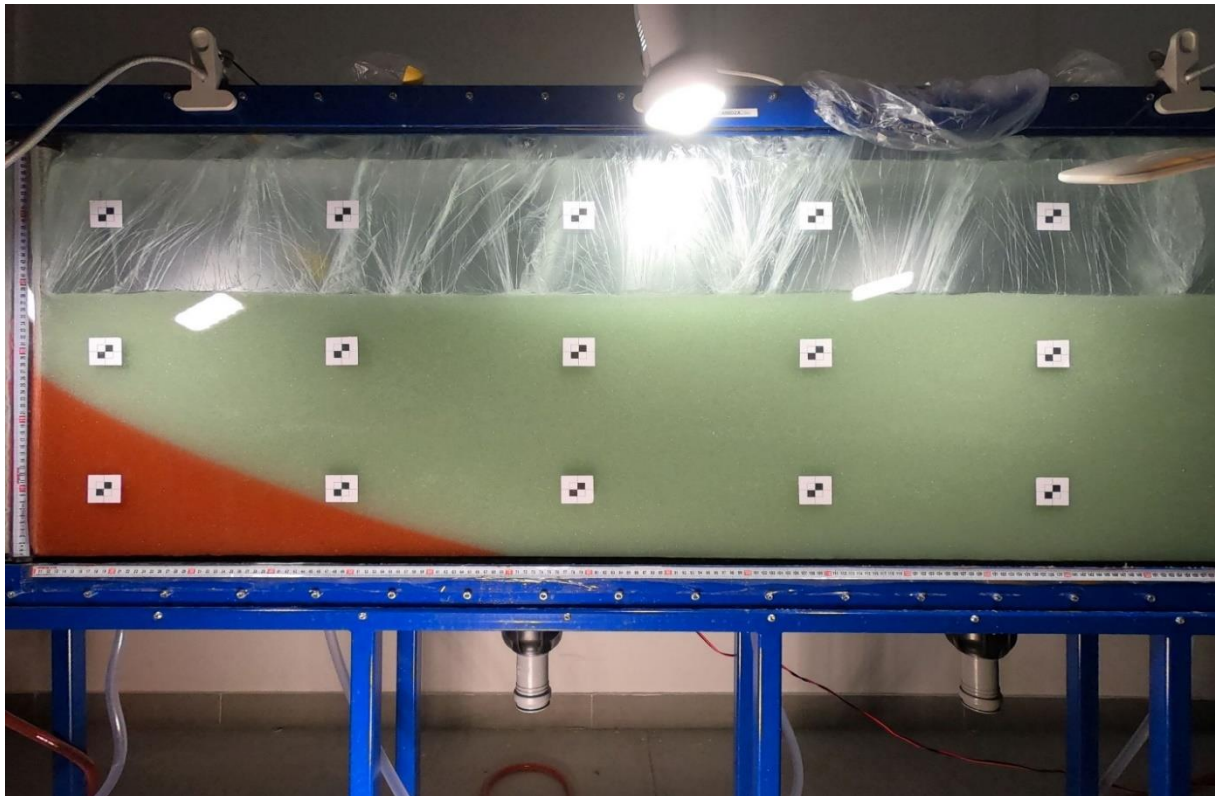
*Slika 23 Stanje u trenutku  $t=300$  minuta*



*Slika 24 Stanje u trenutku  $t=330$  minuta*



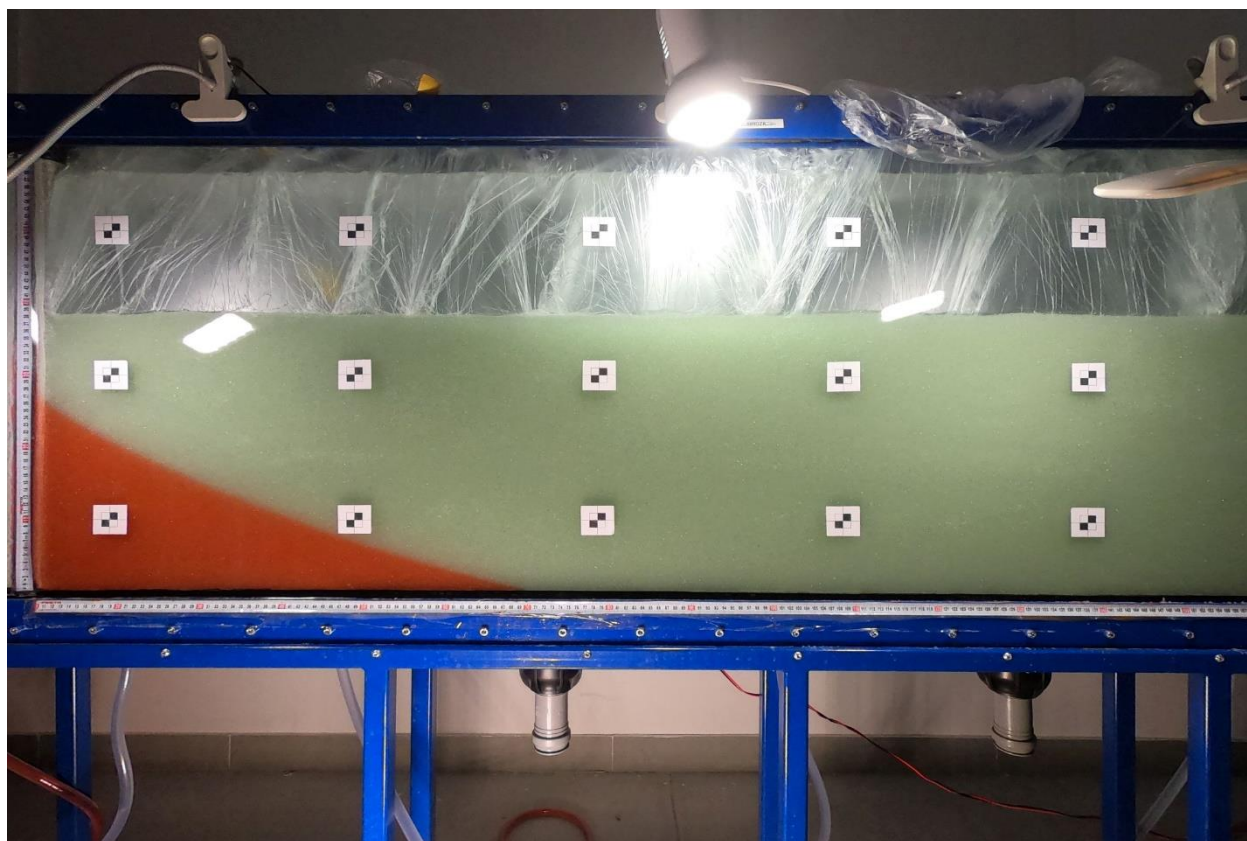
*Slika 25 Stanje u trenutku  $t=360$  minuta*



*Slika 26 Stanje u trenutku  $t=390$  minuta*



*Slika 27 Stanje u trenutku  $t=400$  minuta*



*Slika 28 Stanje u trenutku  $t=420$  minuta-STACIONARNO STANJE*

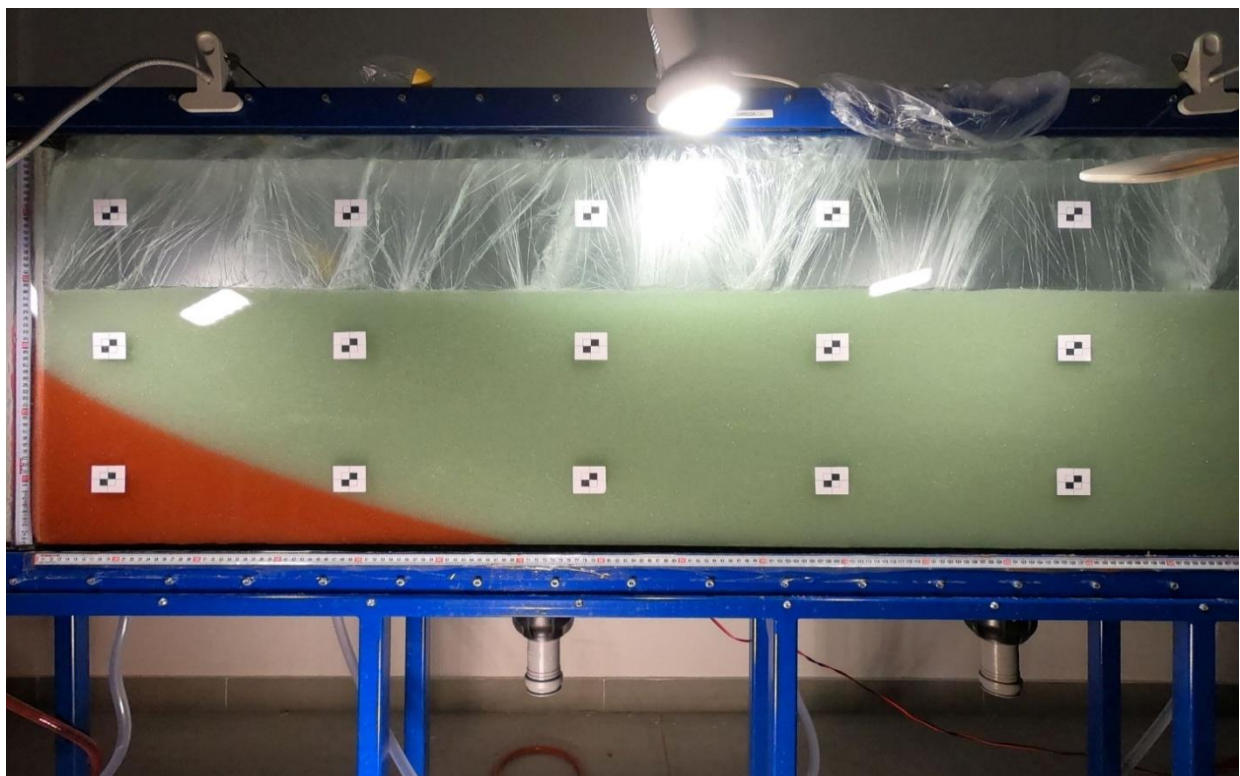
Na slici 28 vidljivo je postignuto stacionarno stanje i za drugi gradijent te je moguće očitati duljinu slanog klina. Duljina prodora slanog klina je očitana u trenutku  $t=420$  minuta i iznosi  $x_t=59,3$  (cm).

Nakon postizanja stacionarnog stanja za drugi slučaj i očitanih rezultata duljine prodiranja slanog klina za visinsku razliku rubnih uvjeta  $\Delta h=1,9$  (cm) desni rubni uvjet je ponovno povećan za 0,3 (cm) te visinska razlika iznosi  $\Delta h=2,2$  (cm) i to za rezultat daje ponovno povlačenje slanog klina sve do novog stacionarnog stanja. Ponašanje slanog klina prikazano je u narednim slikama.

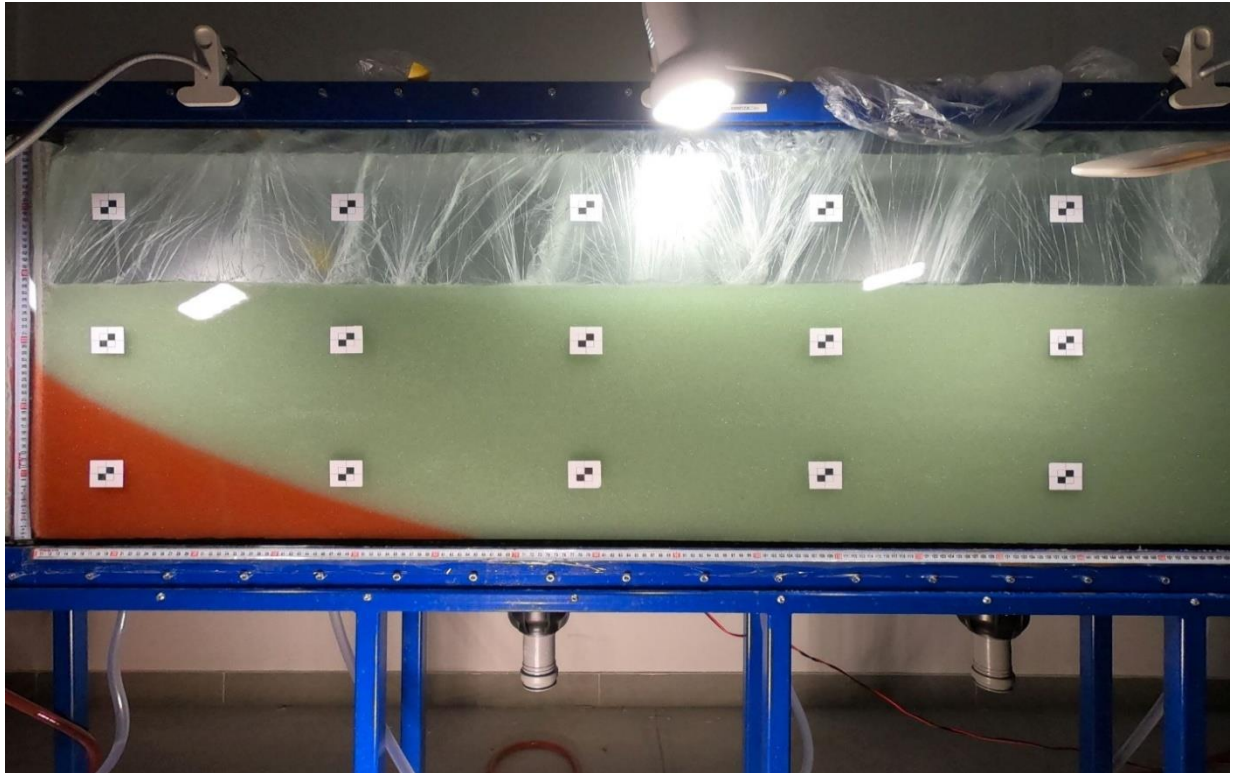




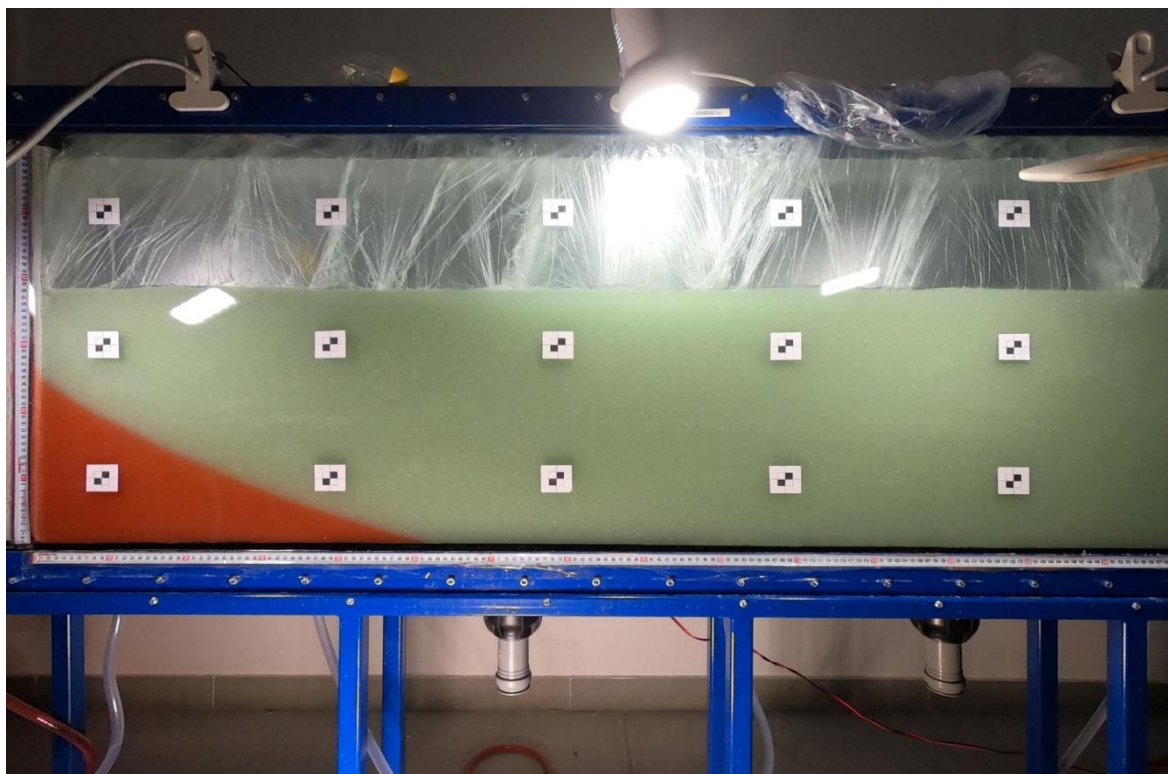
*Slika 29 Stanje u trenutku  $t=421$  minuta (promjena gradijenta)*



*Slika 30 Stanje u trenutku  $t= 430$  minuta*



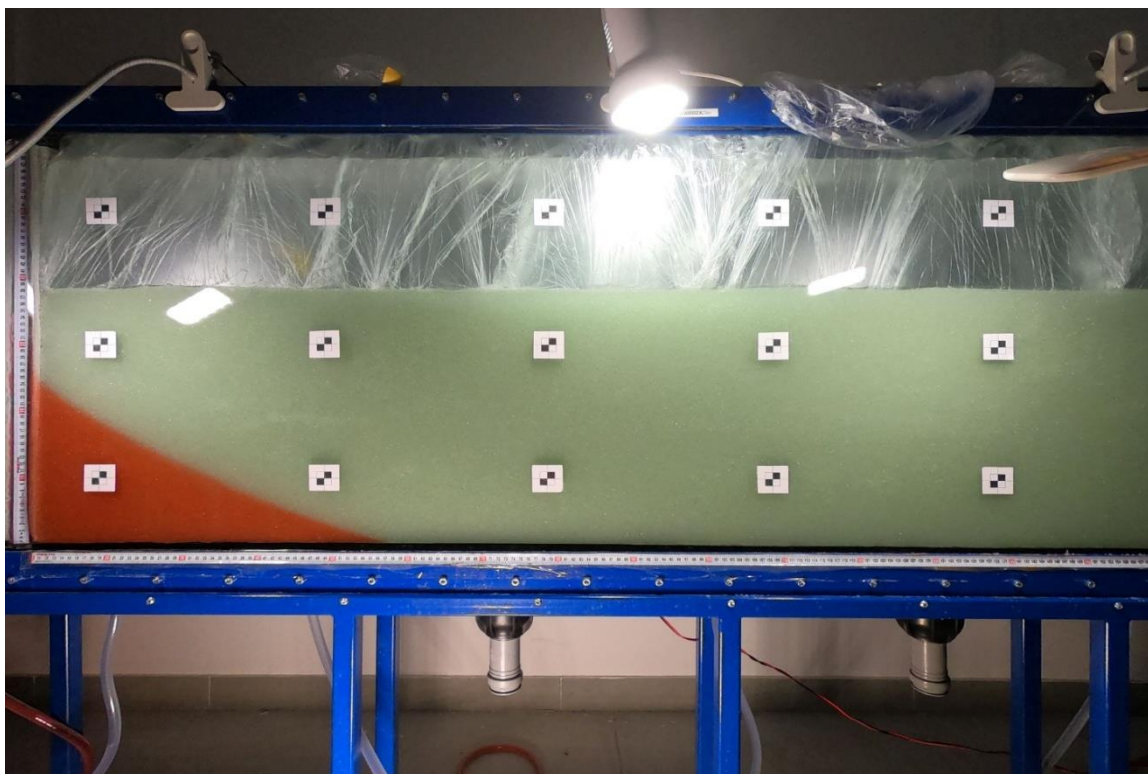
*Slika 31 Stanje u trenutku  $t=445$  minuta*



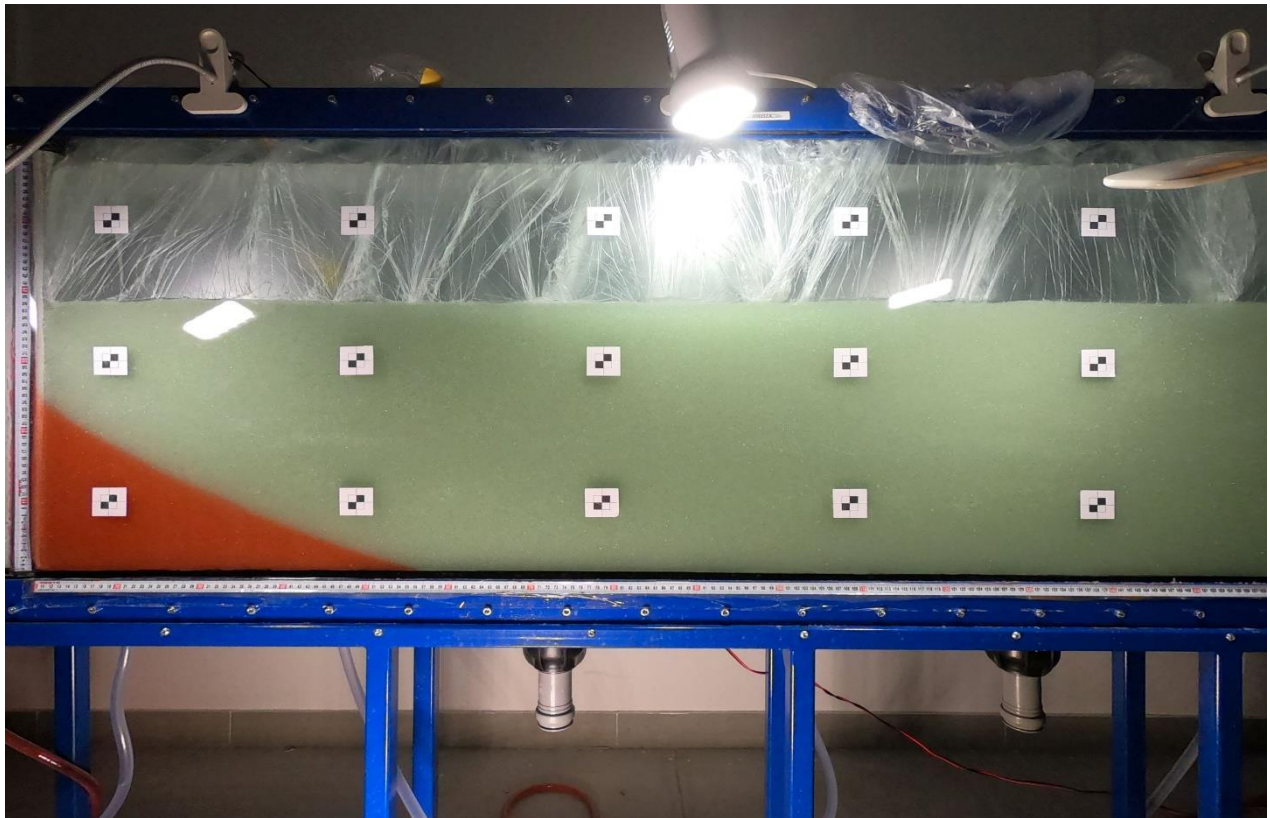
*Slika 32 Stanje u trenutku  $t=460$  minuta*



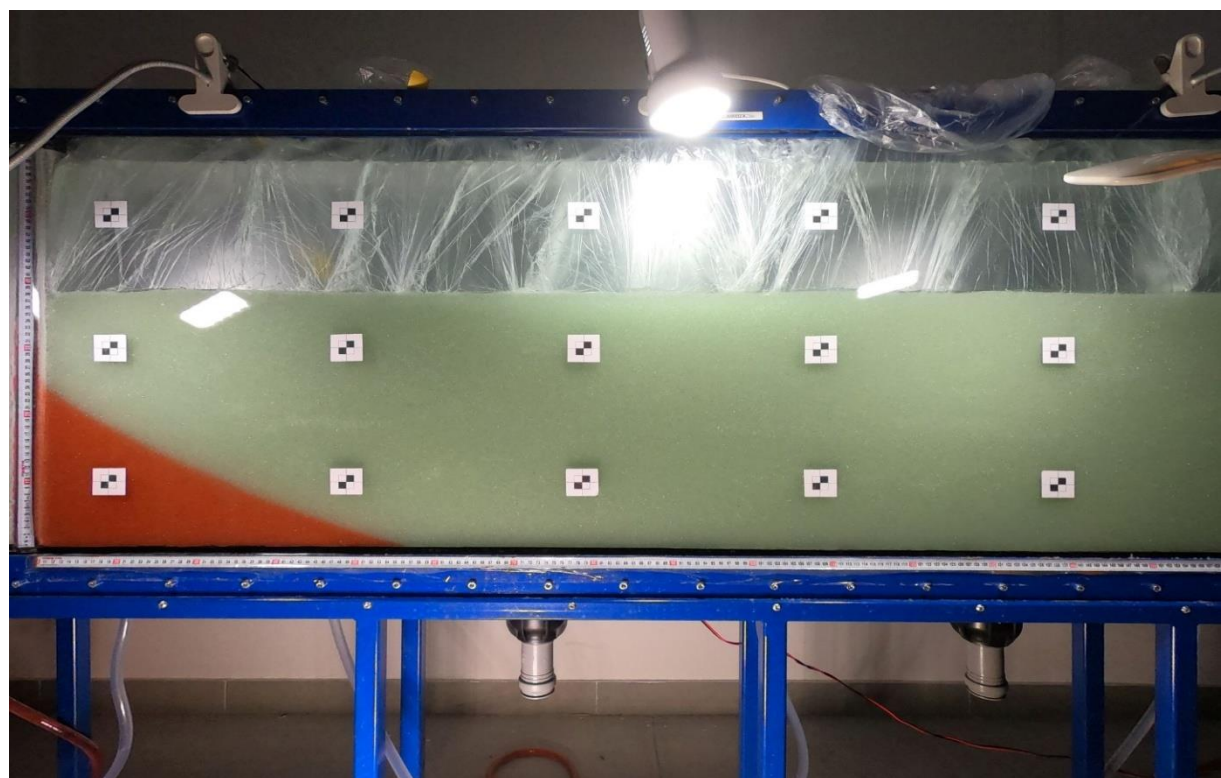
*Slika 33 Stanje u trenutku  $t=490$  minuta*



*Slika 34 Stanje u trenutku  $t=520$  minuta*



*Slika 35 Stanje u trenutku  $t=550$  minuta*



*Slika 36 Stanje u trenutku  $t=560$  minuta-STACIONARNO STANJE*

Postignuto je stacionarno stanje slanog klina i za treći slučaj gradijenta te je na slici 36 vidljivo da je postignuto 560 minuta nakon puštanja eksperimenta. Očitani rezultat prodiranja slanog klina iznosi  $x_t=45,9$  (cm).

#### 4.2.2. Rezultati Eksperimenta 2

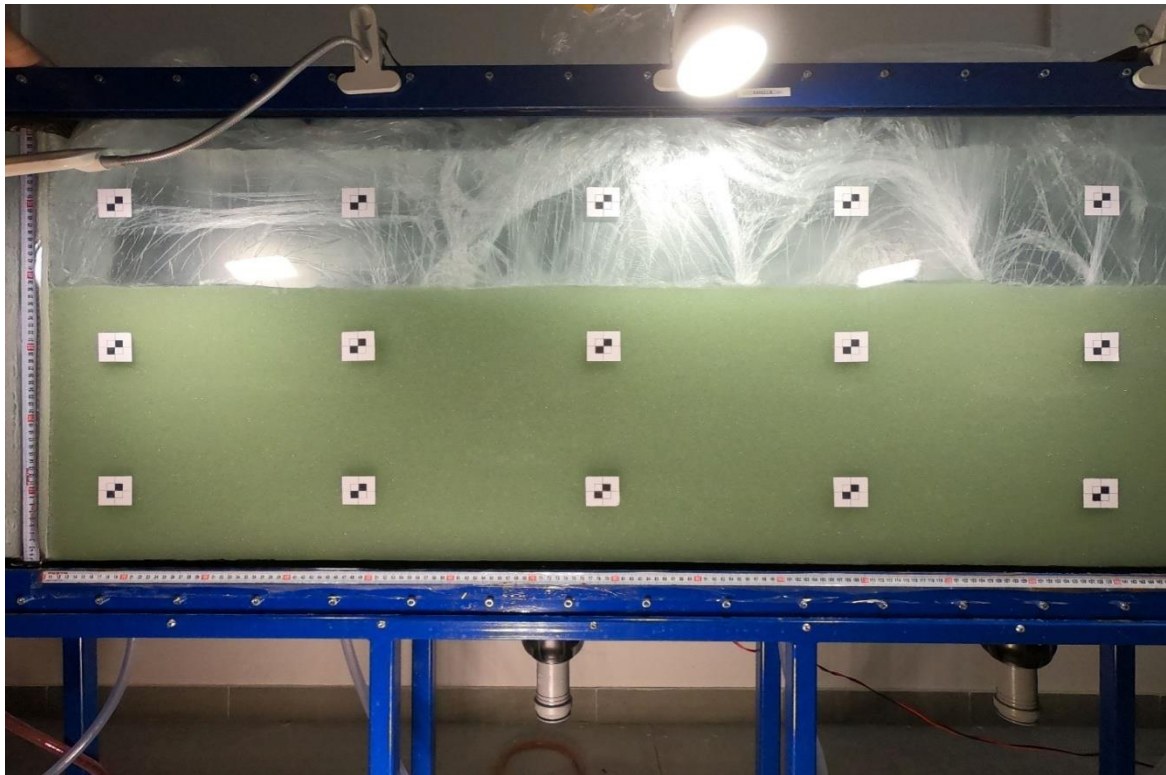
Prikaz rezultata tečenja za Eksperiment 2 dobivenih laboratorijskim ispitivanjima nalazi se u tablici 5:

$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$\Delta h$ [cm]	$\Delta h/\Delta l$	$\Delta t$ [sek]	V [cm <sup>3</sup> ]			$V_{avg}$ [cm <sup>3</sup> ]	Q [cm <sup>3</sup> /sek]	k [cm/sek]	v [cm/sek]
42,20	40,00	2,20	0,01170	30	194	194	195	194,33	6,47778	1,16538	0,01364
41,90	40,00	1,90	0,01011	30	170	169	169	169,33	5,64444	1,17580	0,01188
41,60	40,00	1,60	0,00851	30	145	146	146	145,67	4,85556	1,20111	0,01022

Tablica 5 Rezultati ispitivanja konduktiviteta

Kao za Eksperiment 1 tako i za Eksperiment 2 iz dobivenih rezultata tečenja usvojena je odgovarajuća vrijednost konduktiviteta  $k$ . Kako konduktivitet isključivo ovisi o vrsti materijala, dobiveni su slični rezultati konduktiviteta te je usvojena ista vrijednost kao i u Eksperimentu 1.

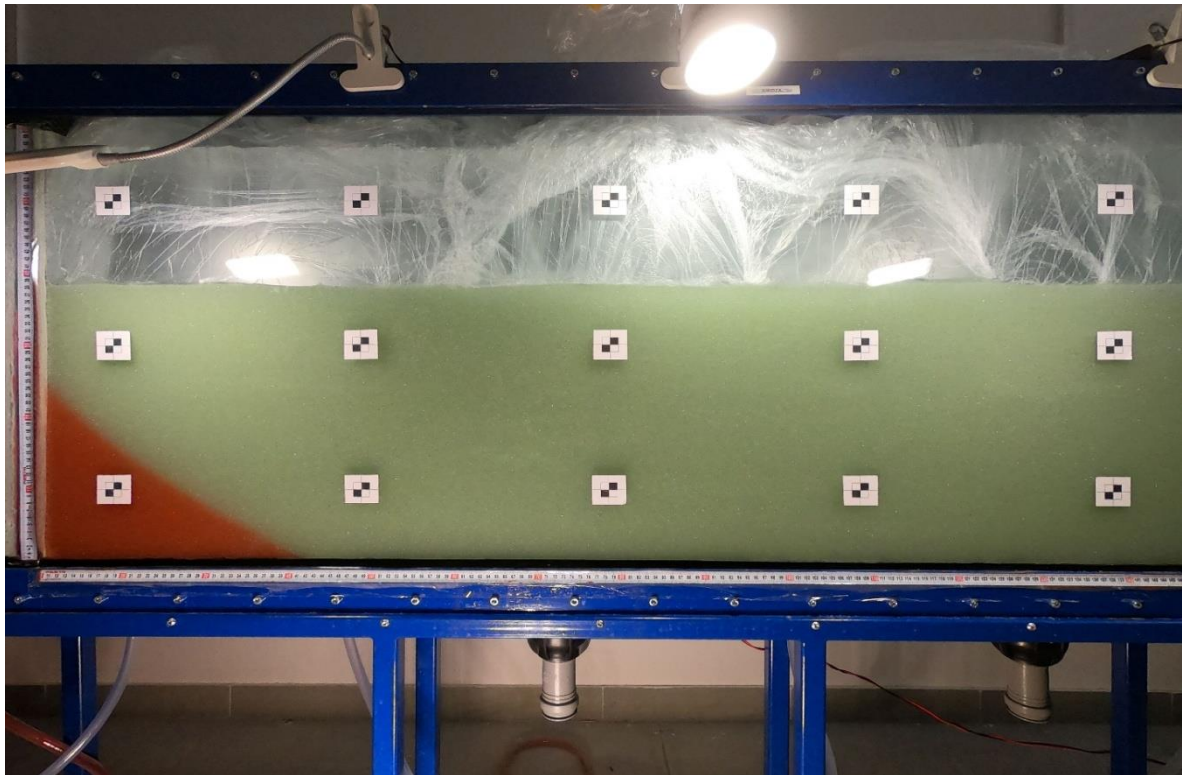
Nakon prikazanih rezultata tečenja prikazani su i rezultati transporta zagađenja slanom vodom koji su dobiveni laboratorijskim putem. Rezultati su bilježeni svaku minutu, a slikama su prikazani neki od vremenskih trenutaka te karakteristični vremenski trenuci u kojima je došlo do stacionarnog stanja ili do mijenjanja gradijenta. Ponovljen je isti postupak kao i u Eksperimentu 1.



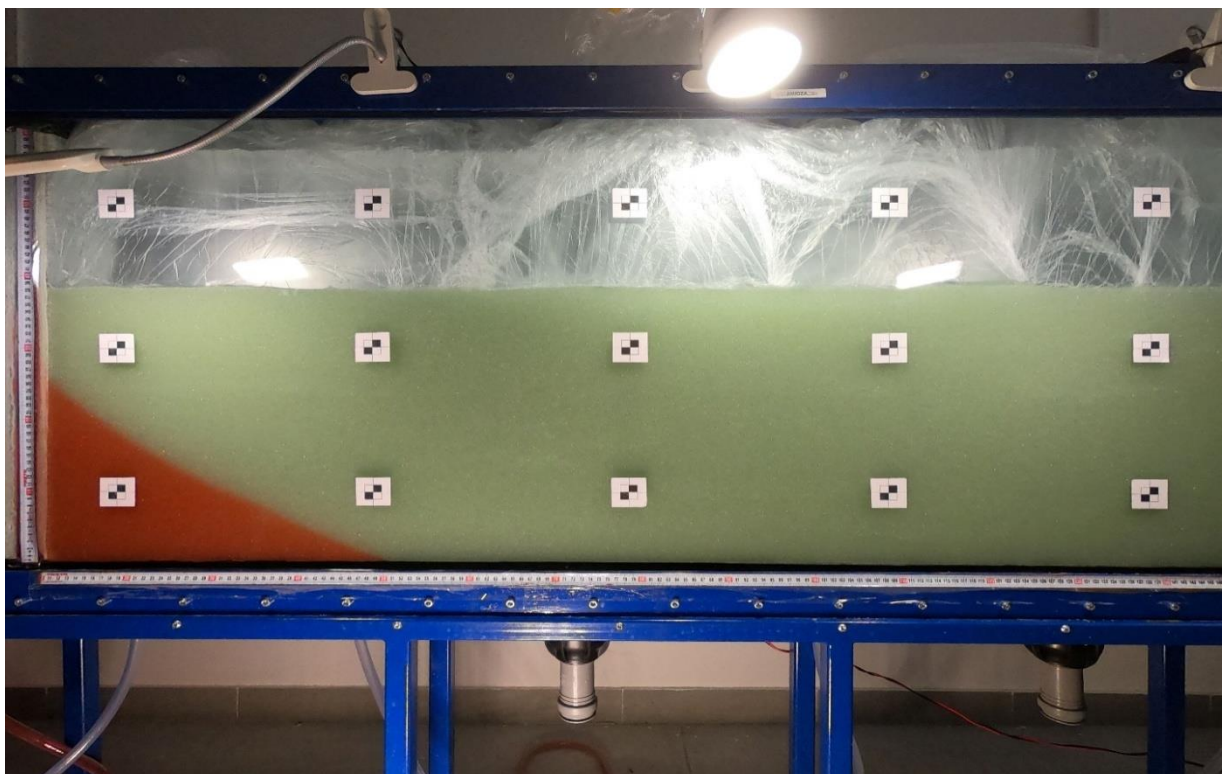
*Slika 37 Početno stanje prije puštanja eksperimenta*



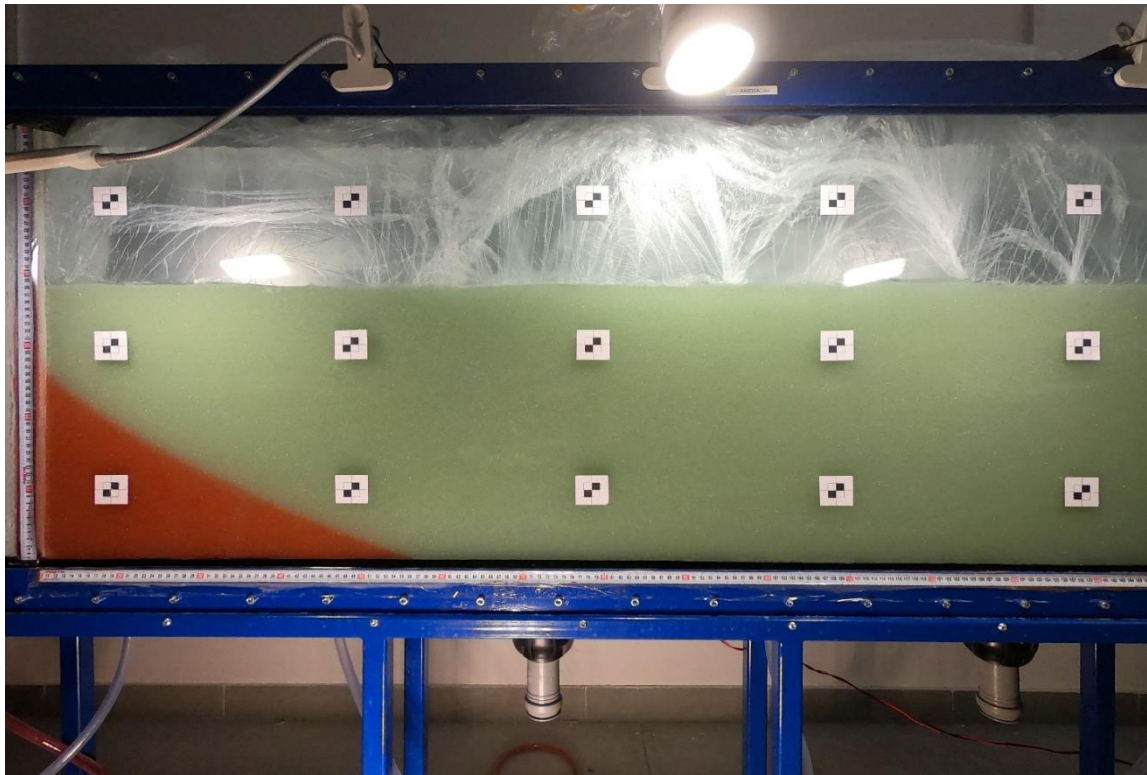
*Slika 38 Stanje u trenutku  $t=1$  minuta*



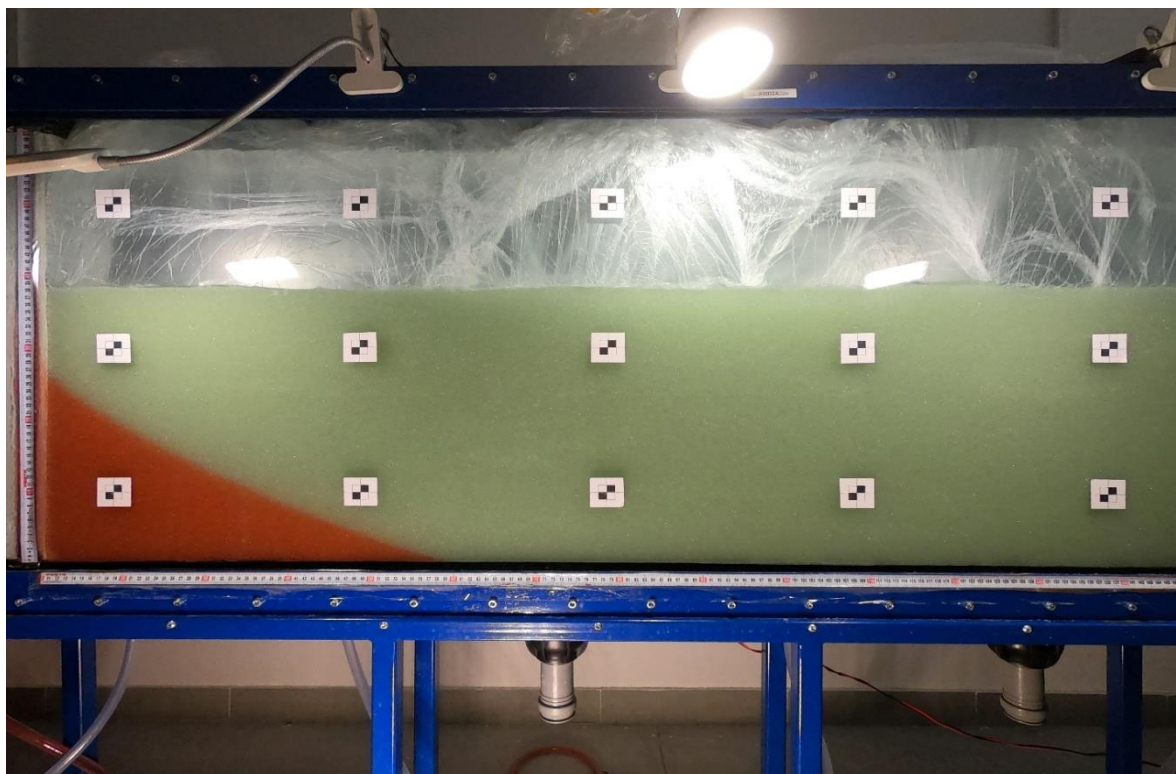
*Slika 39 Stanje u trenutku  $t=15$  minuta*



*Slika 40 Stanje u trenutku  $t=30$  minuta*

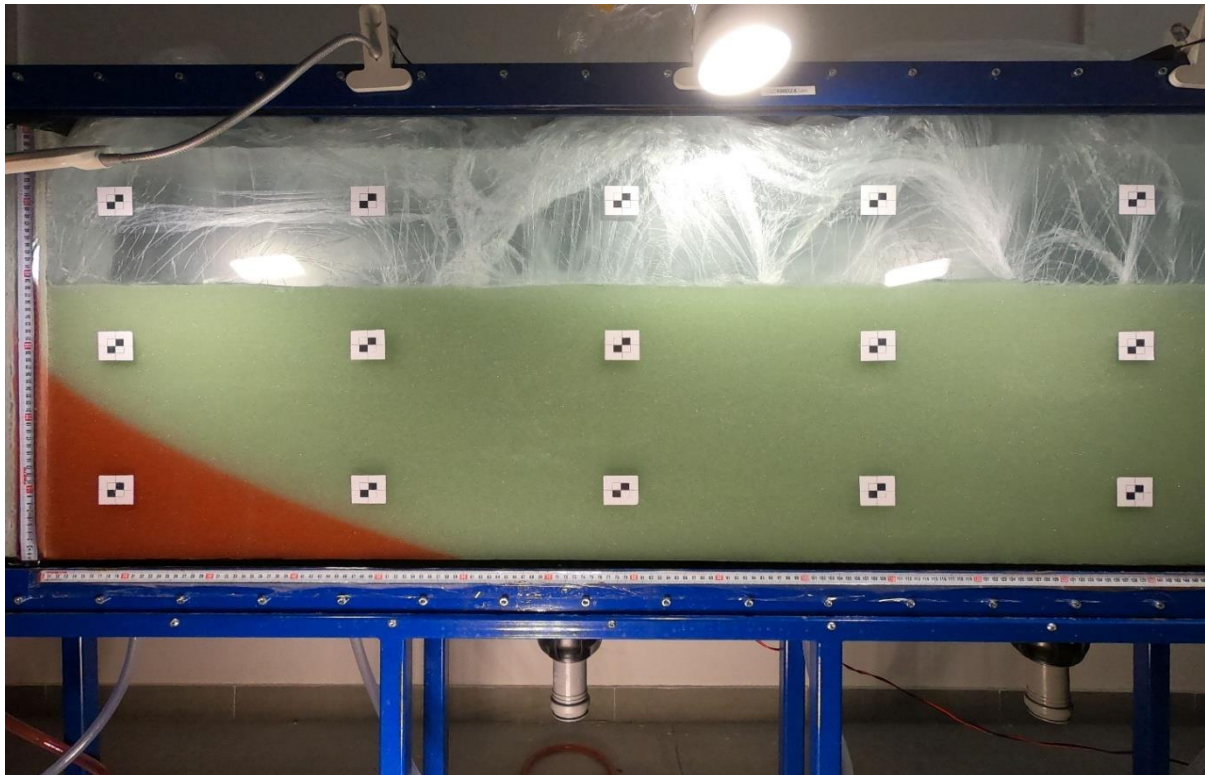


*Slika 41 Stanje u trenutku  $t=60$  minuta*

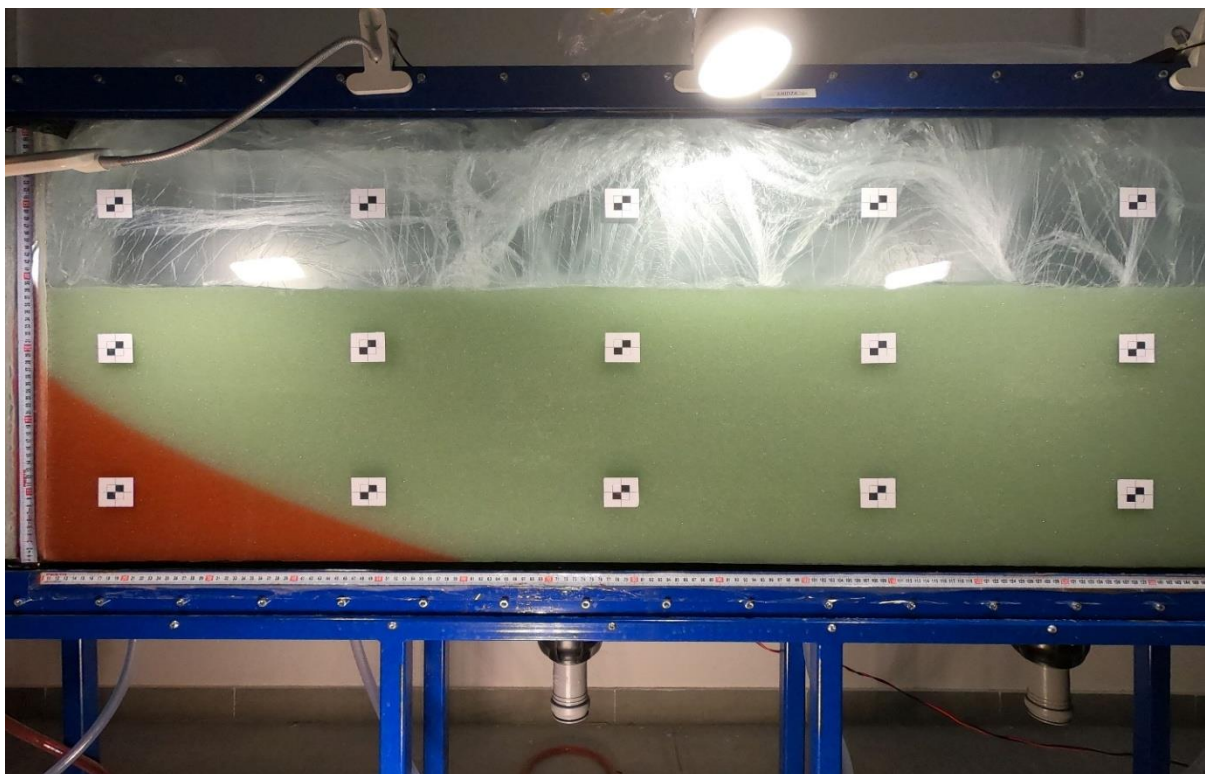


*Slika 42 Stanje u trenutku  $t=90$  minuta*





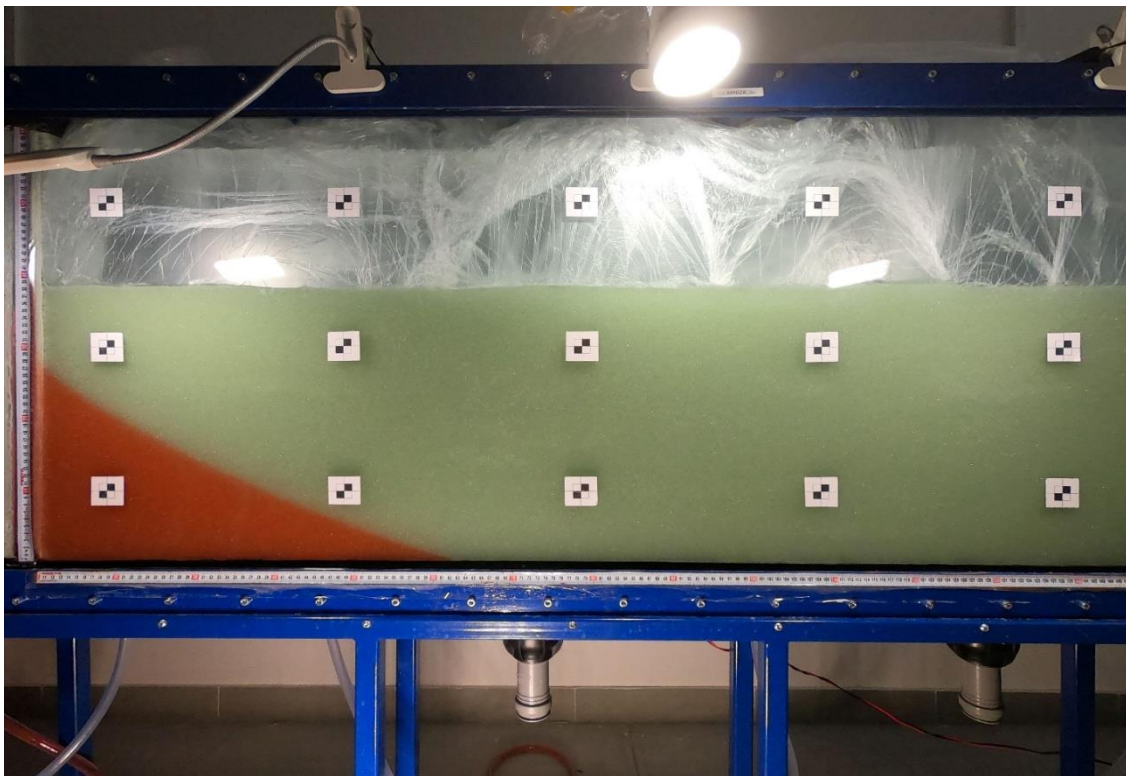
*Slika 43 Stanje u trenutku  $t=120$  minuta*



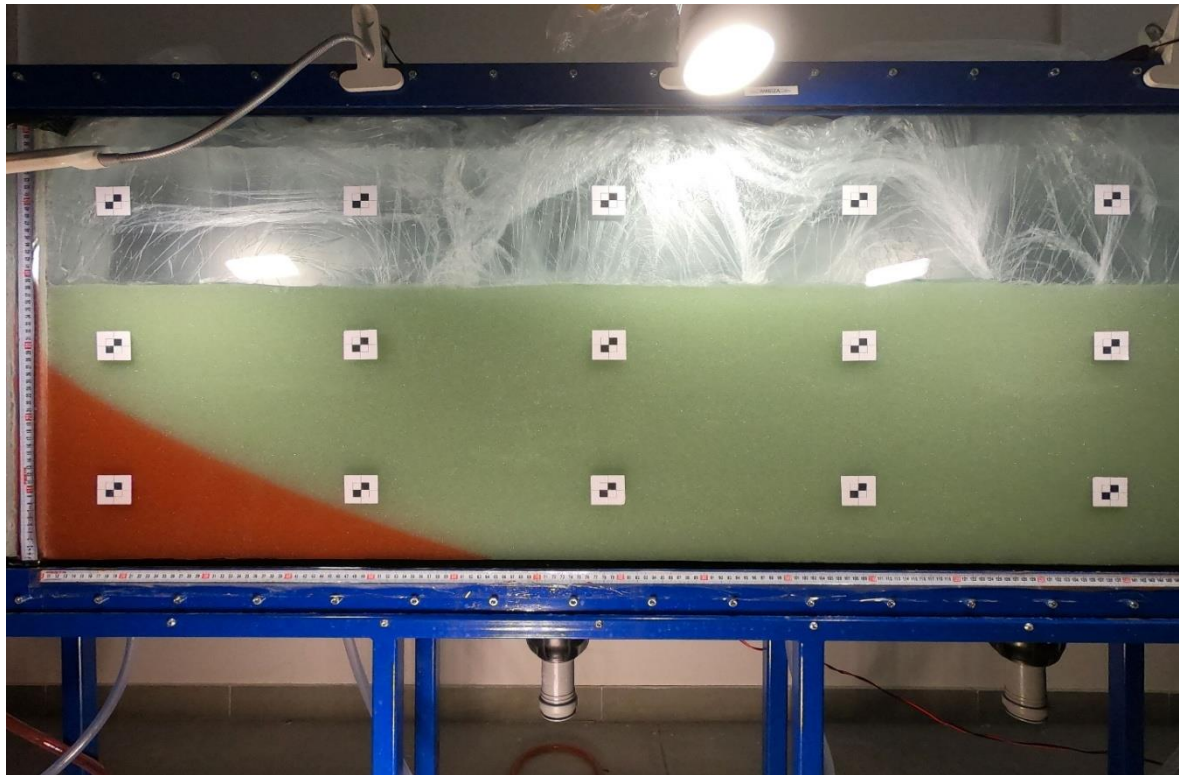
*Slika 44 Stanje u trenutku  $t=150$  minuta-STACIONARNO STANJE*

Na slici 44 vidljivo je ostvareno stacionarno stanje 150 minuta nakon puštanja eksperimenta za odabranu vrijednost desnog rubnog uvjeta koja u ovom slučaju iznosi  $h_2=42,2$  (cm). Lijevi rubni uvjet je konstantan i iznosi  $h_1=40,0$  (cm). Duljina klina je očitana u trenutku kada su postignuti stacionarni uvjeti te se duljina klina više ne mijenja. Duljina klina iznosi  $x_t=49,4$  (cm).

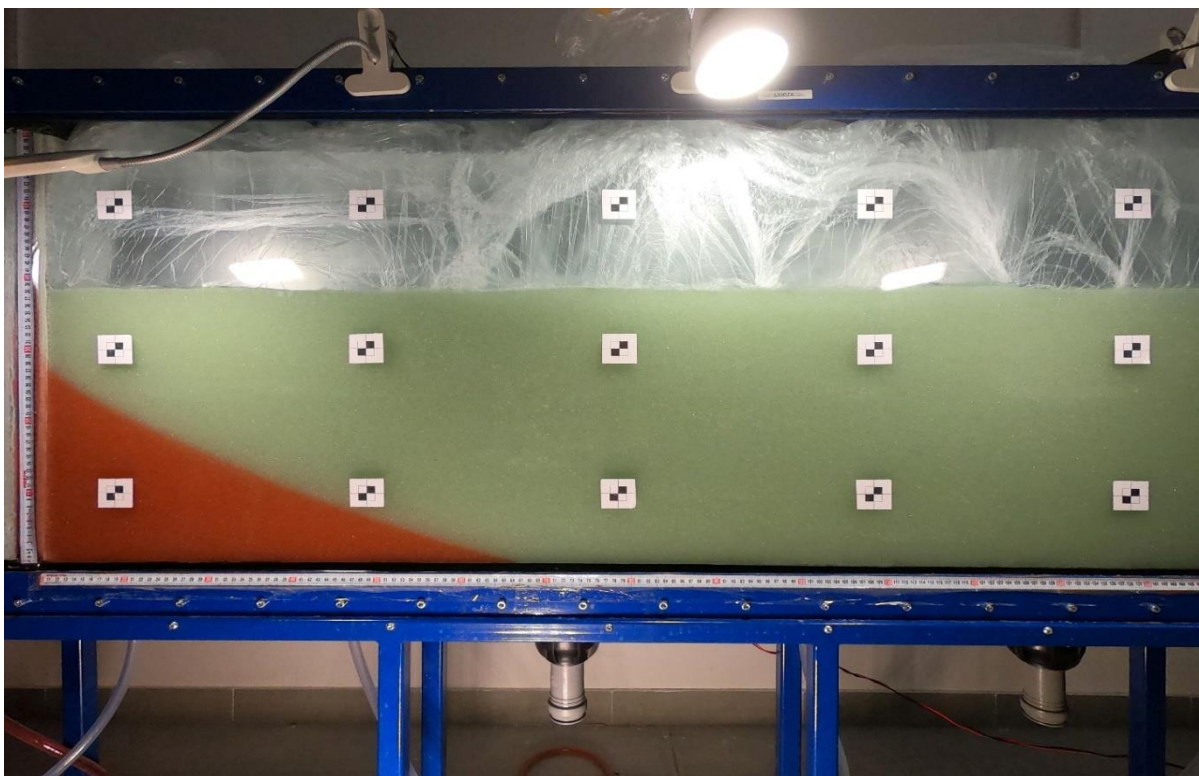
Nakon očitavanja rezultata duljine klina za prvi slučaj (gradijent), desni rubni uvjet je smanjen s vrijednosti od 42,2 (cm) na 41,9 (cm) te  $\Delta h$  iznosi 1,9 (cm). Ponašanje slanog klina nakon smanjenja gradijenta prikazano je u narednim slikama sve do postizanja ponovnog stacionarnog stanja duljine slanog klina  $x_t$ .



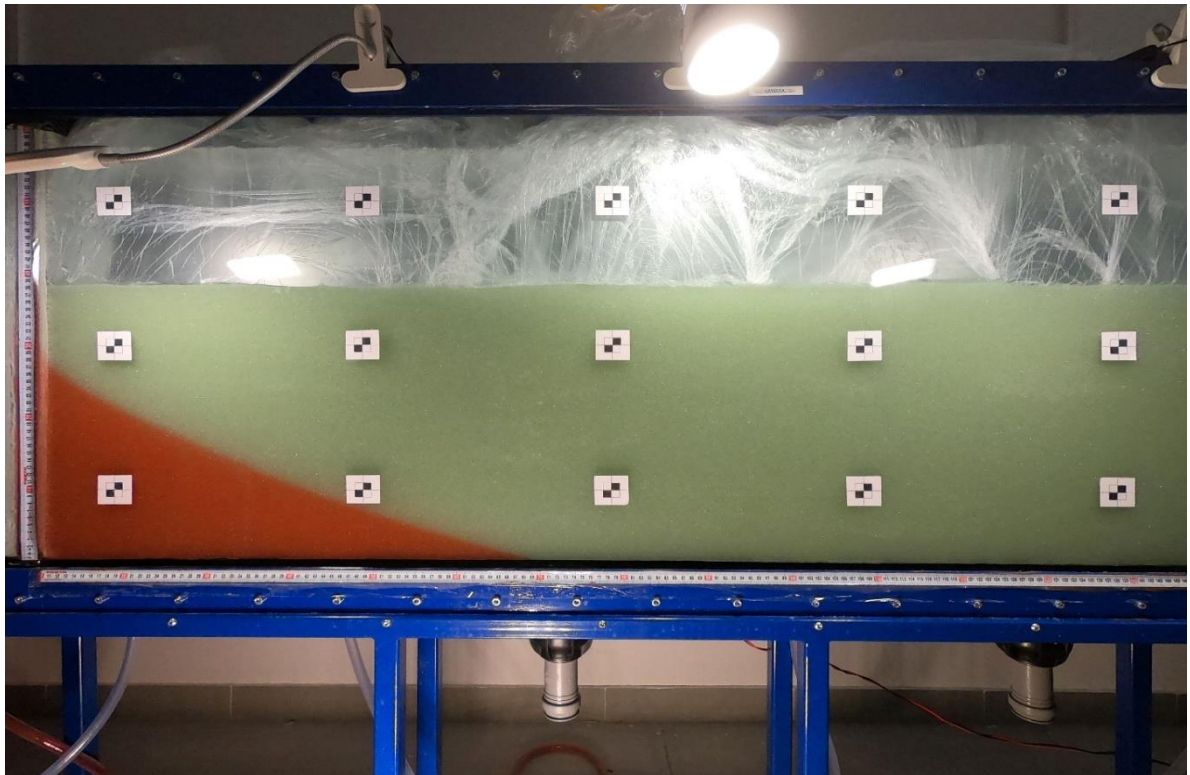
*Slika 45 Stanje u trenutku promjene  $t=160$  minuta (promjena gradijenta)*



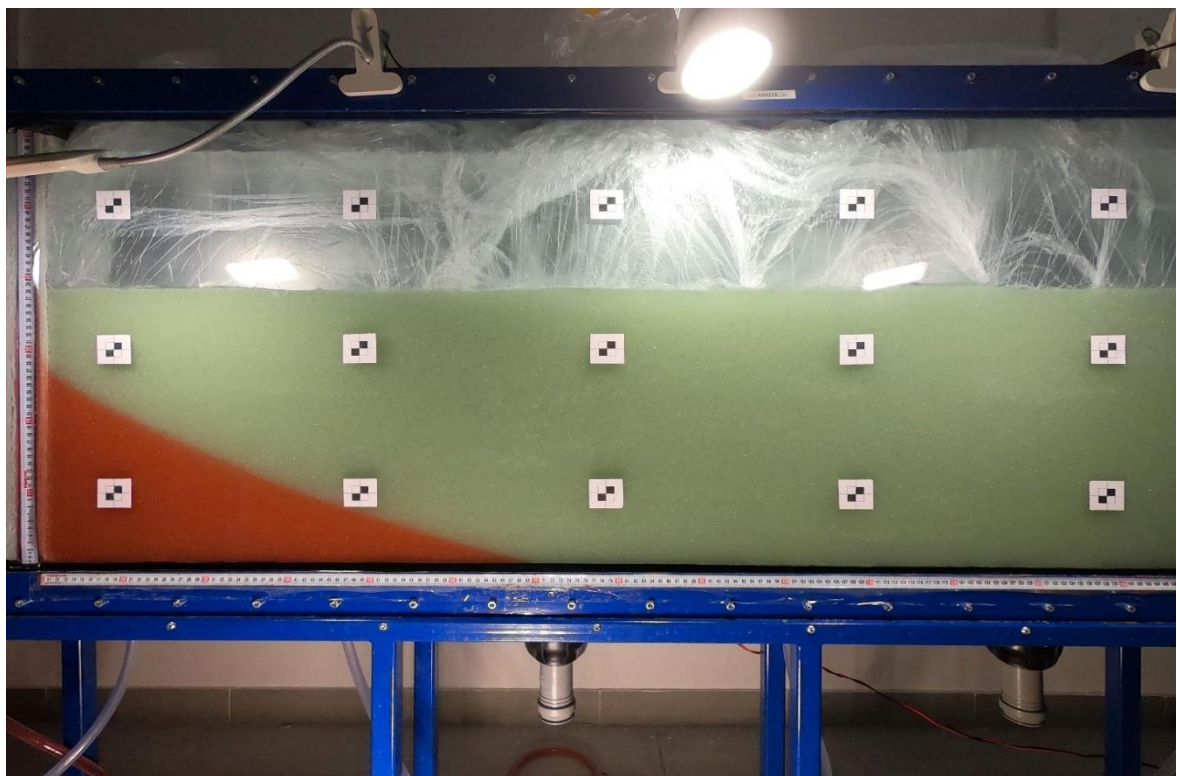
*Slika 46 Stanje u trenutku  $t=170$  minuta*



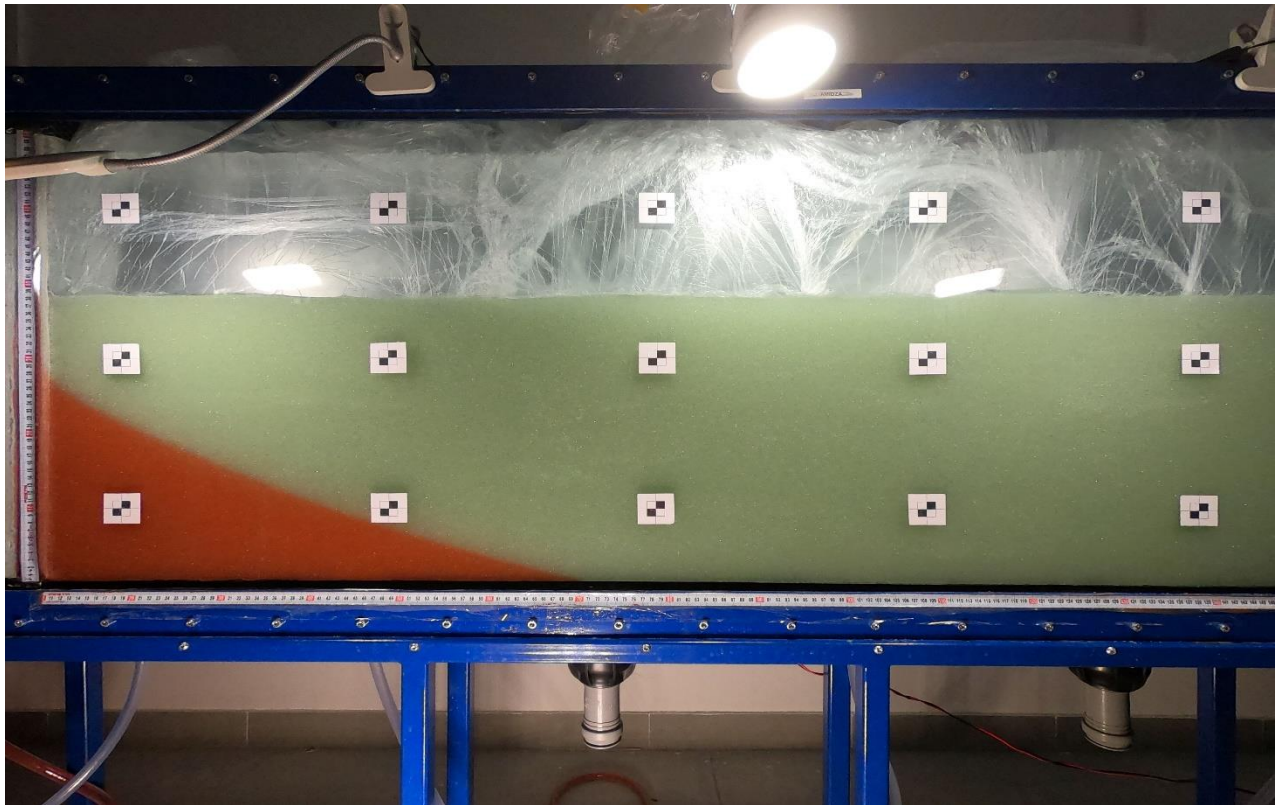
*Slika 47 Stanje u trenutku  $t=185$  minuta*



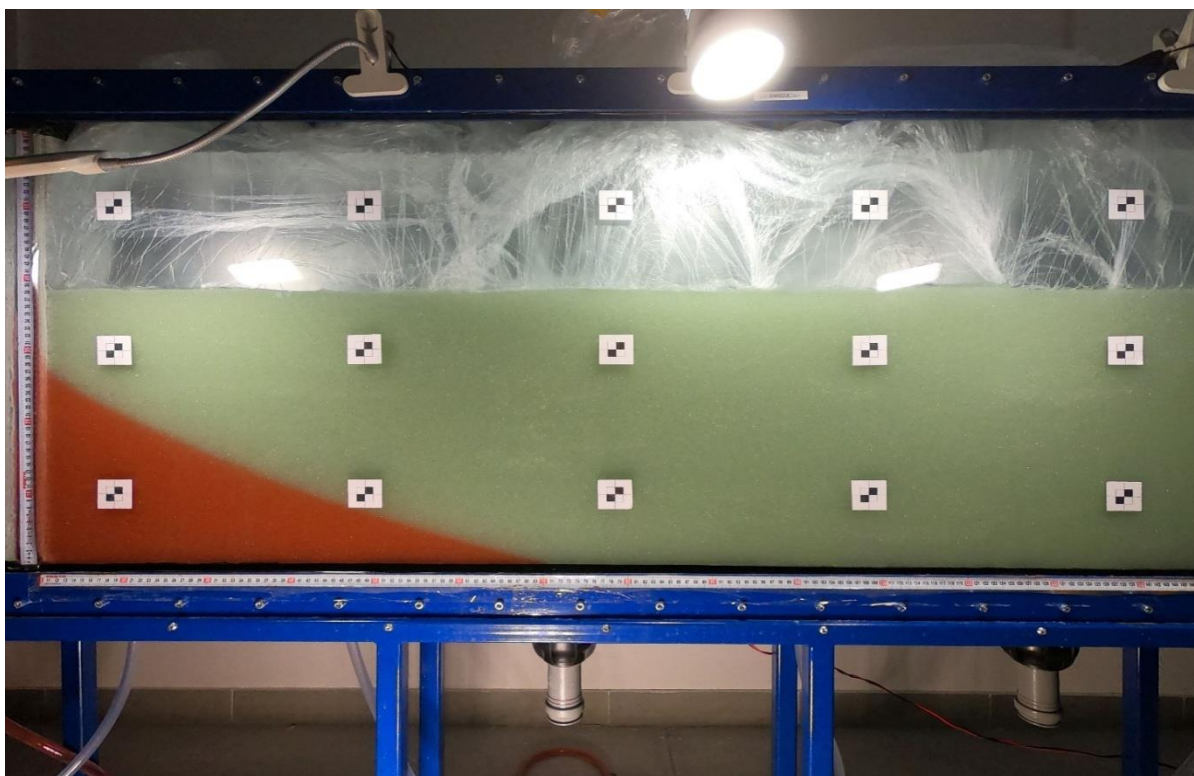
*Slika 48 Stanje u trenutku  $t=215$  minuta*



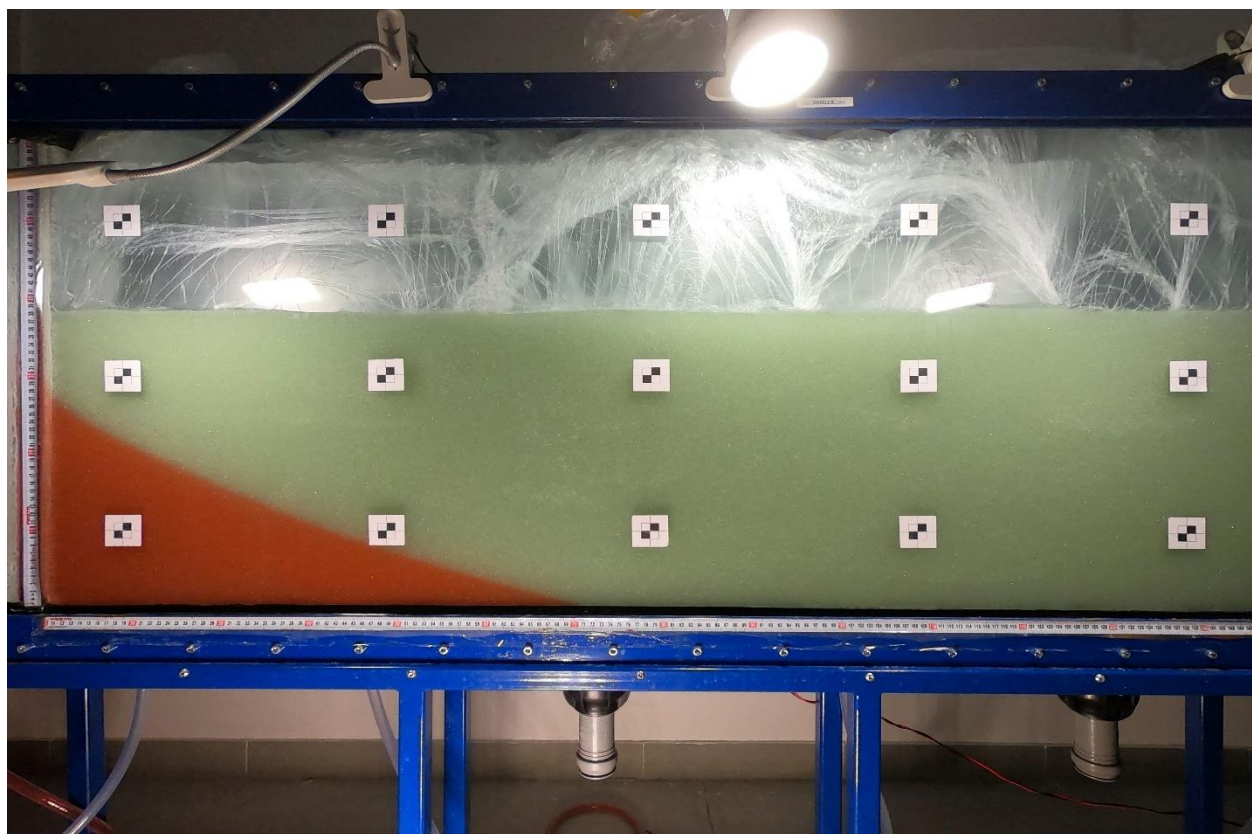
*Slika 49 Stanje u trenutku  $t=245$  minuta*



*Slika 50 Stanje u trenutku  $t=275$  minuta*



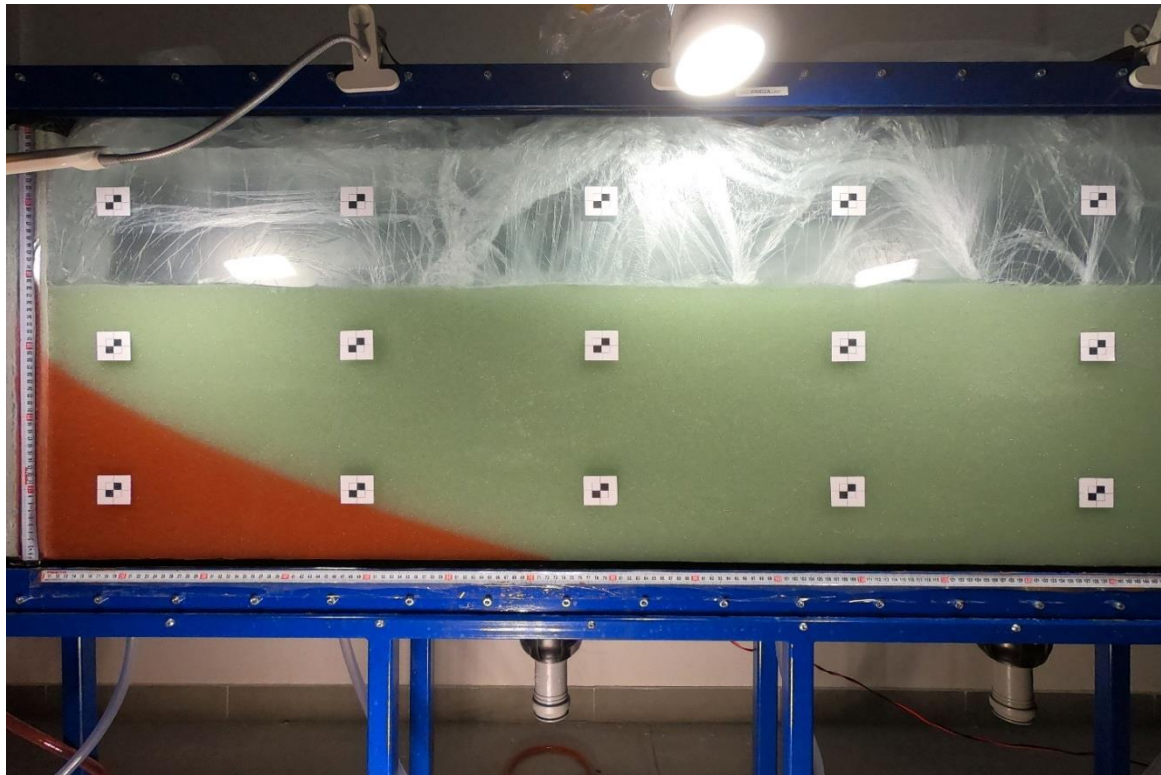
*Slika 51 Stanje u trenutku  $t=305$  minuta*



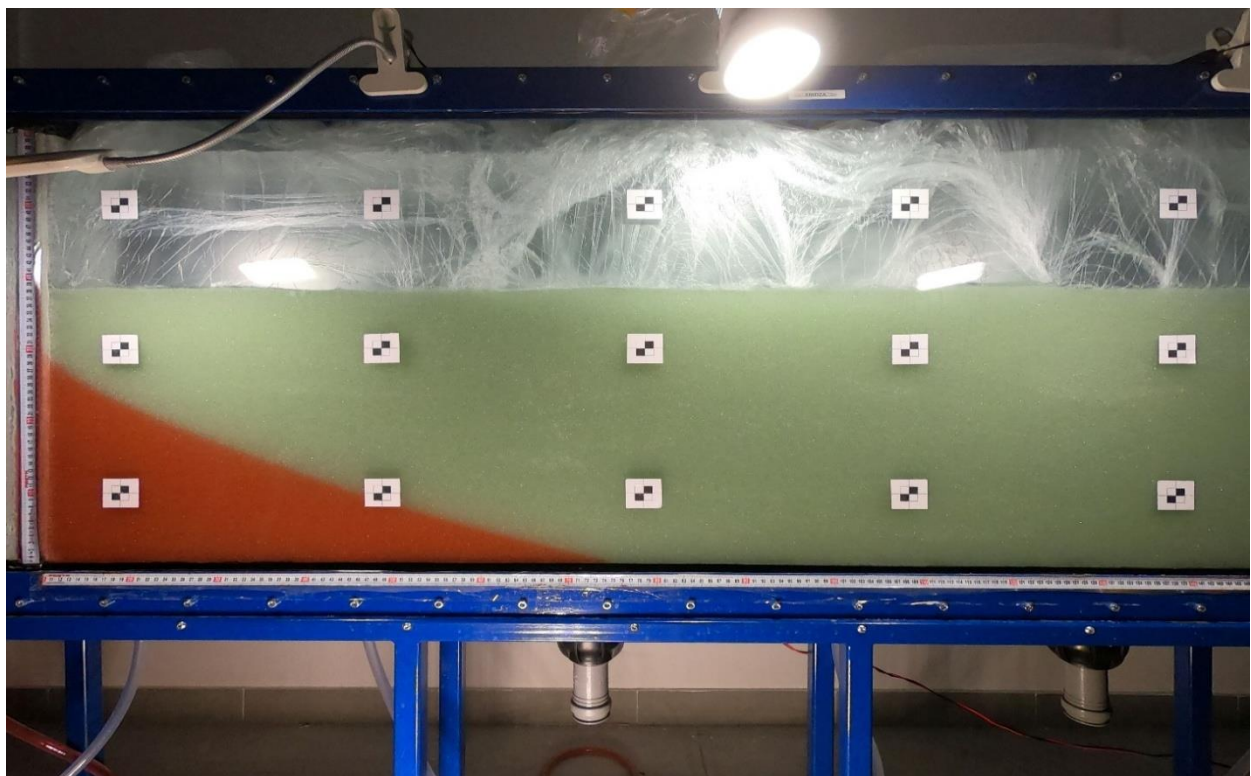
*Slika 52 Stanje u trenutku  $t=340$  minuta-STACIONARNO STANJE*

Na slici 52 vidljivo je ostvareno stacionarno stanje u ovom slučaju 340 minuta nakon puštanja eksperimenta. Očitana je vrijednost duljine slanog klina za visinsku razliku rubnih uvjeta  $\Delta h=1,9$  (cm) i iznosi  $x_t=60,05$  (cm)

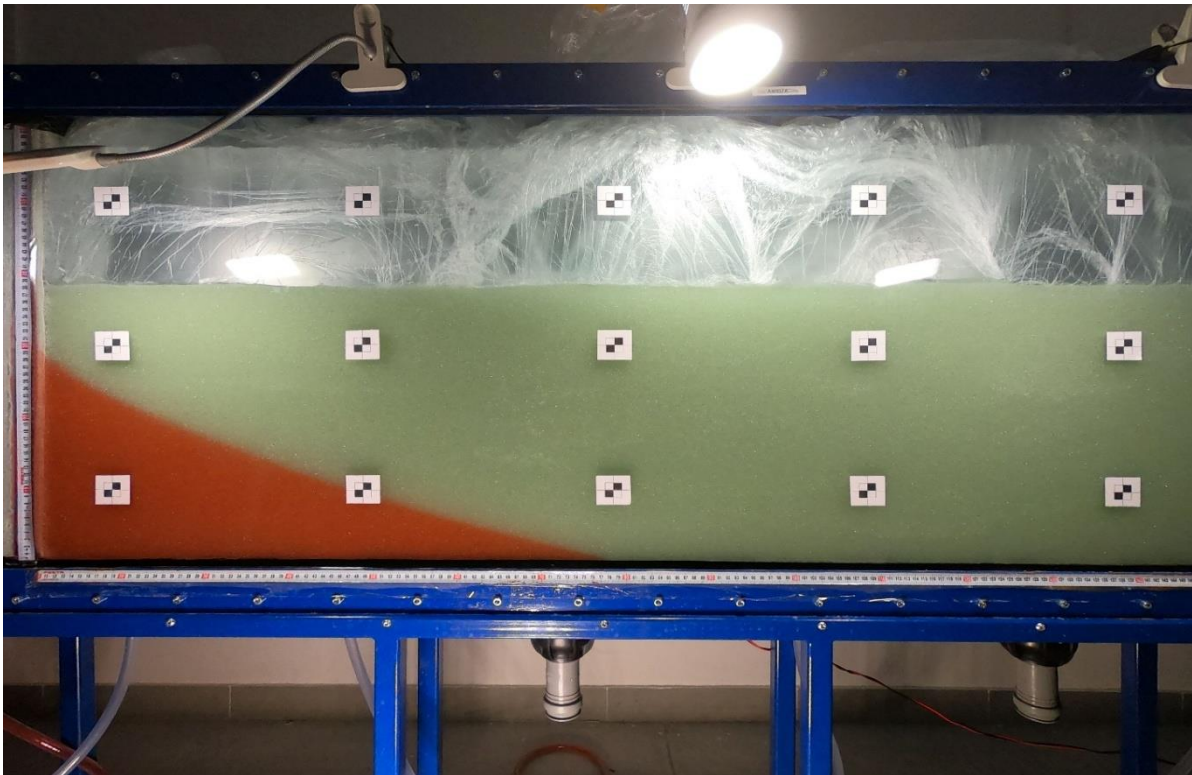
Nakon postizanja stacionarnog stanja za drugi slučaj i očitanih rezultata duljine klina za visinsku razliku rubnih uvjeta  $\Delta h=1,9$  (cm), desni rubni uvjet je ponovno smanjen za 0,3 (cm) te visinska razlika rubnih uvjeta iznosi  $\Delta h=1,6$  (cm). Klin ponovo napreduje sve do novog stacionarnog stanja.



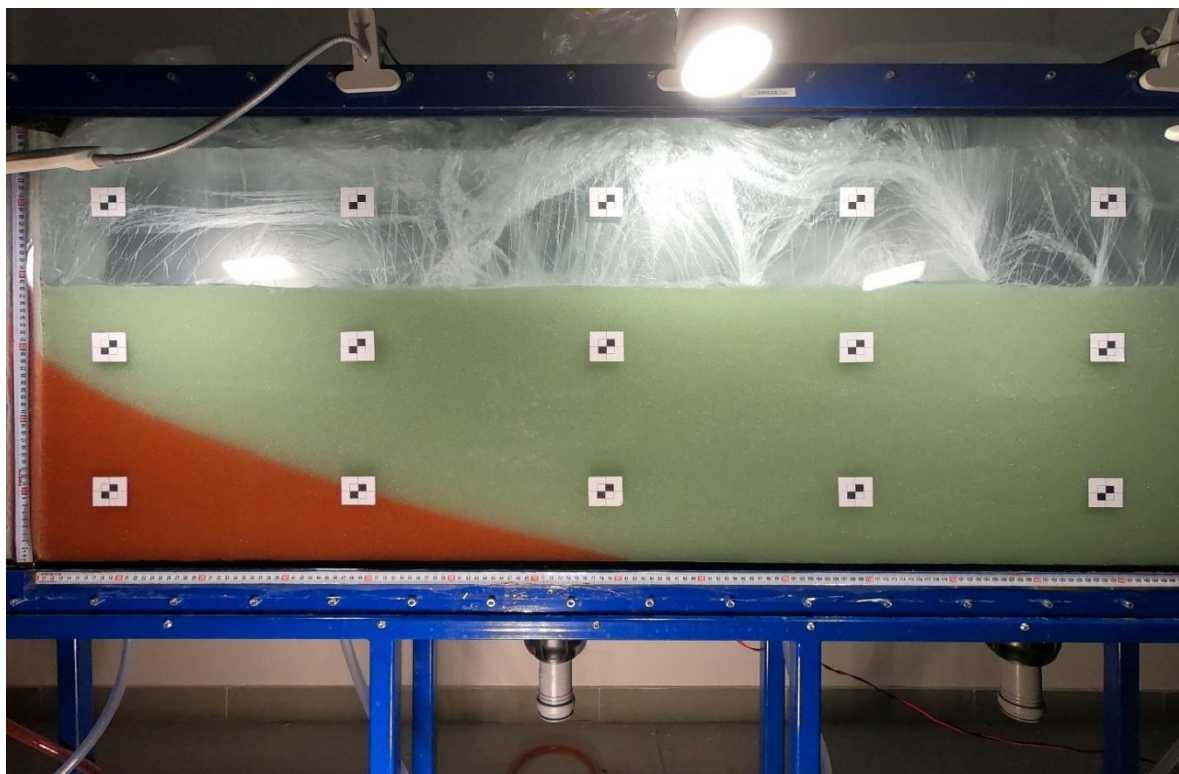
*Slika 53 Stanje u trenutku promjene  $t=350$  minuta (promjena gradijenta)*



*Slika 54 Stanje u trenutku  $t=360$  minuta*

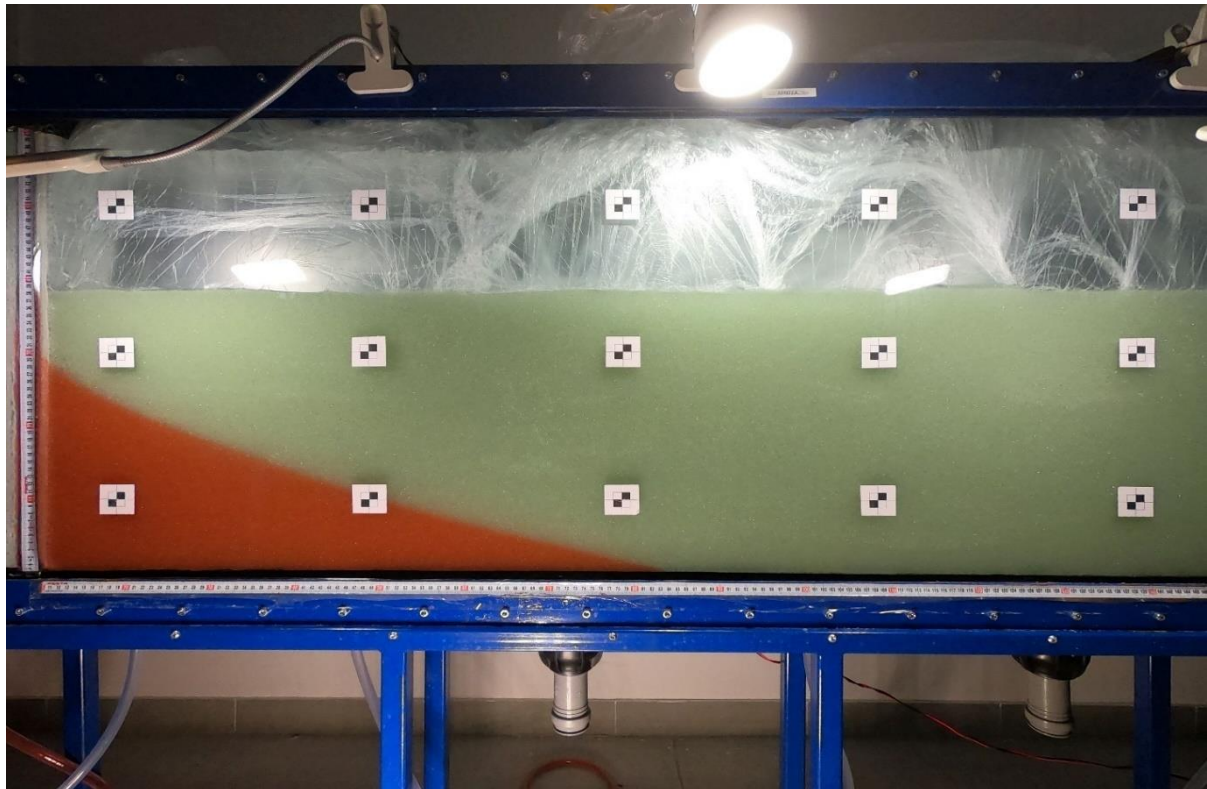


*Slika 55 Stanje u trenutku  $t=375$  minuta*

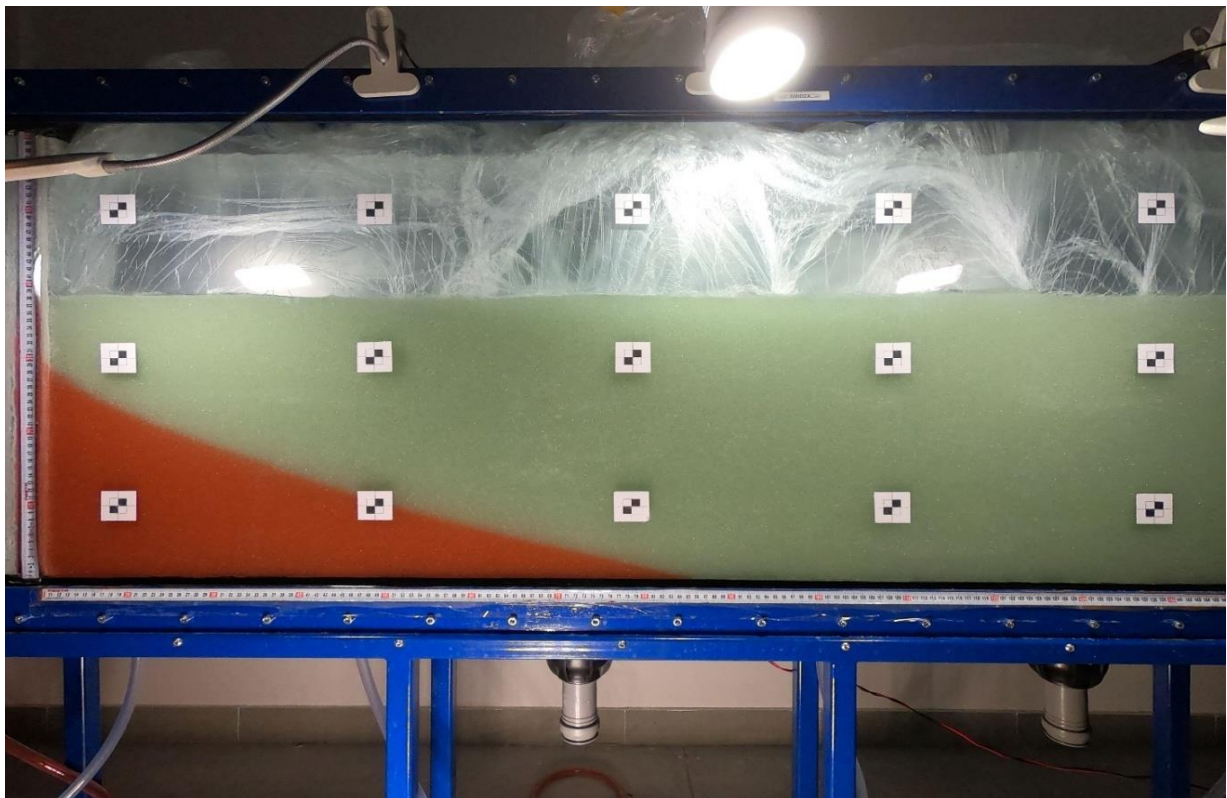


*Slika 56 Stanje u trenutku  $t=405$  minuta*

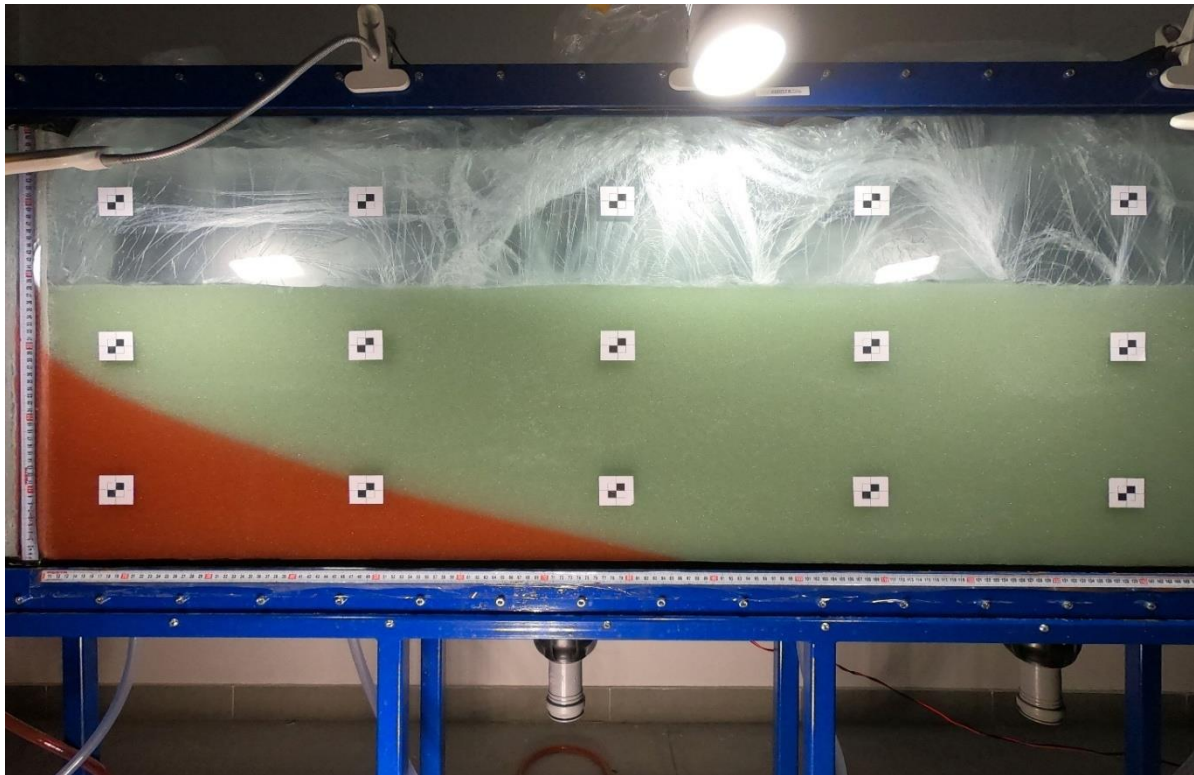




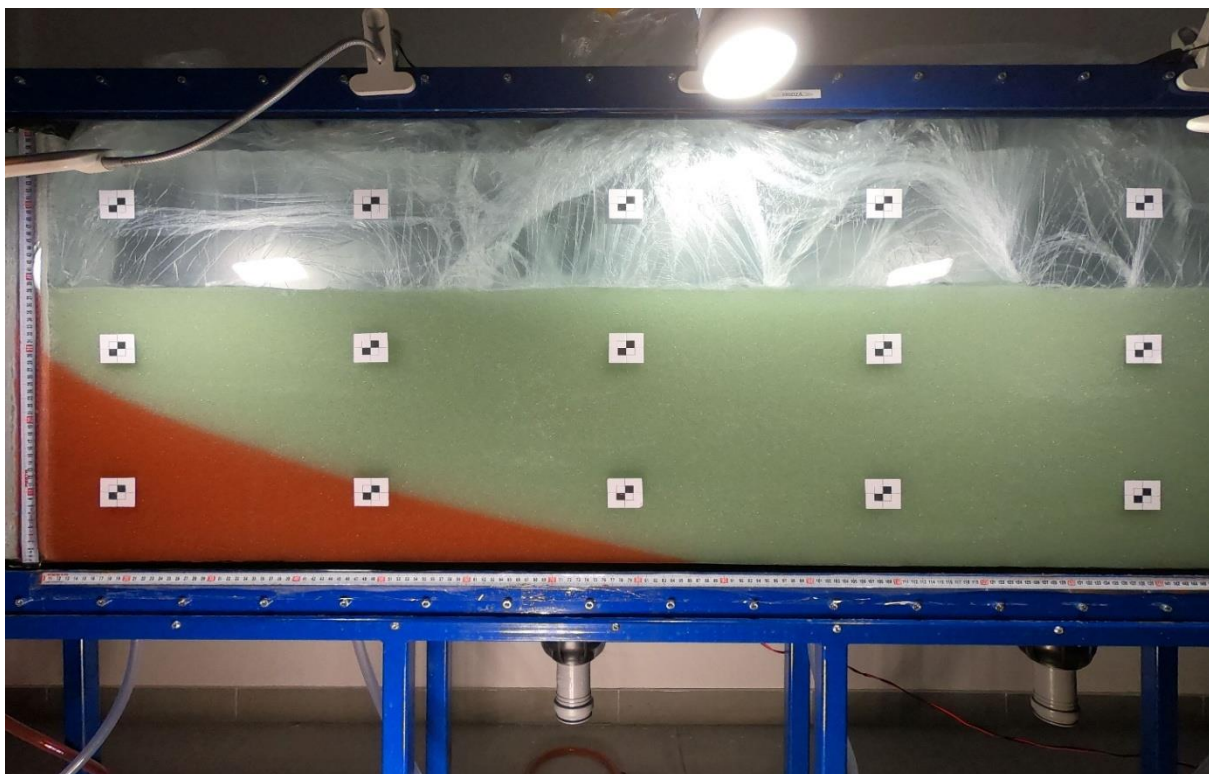
*Slika 57 Stanje u trenutku  $t=465$  minuta*



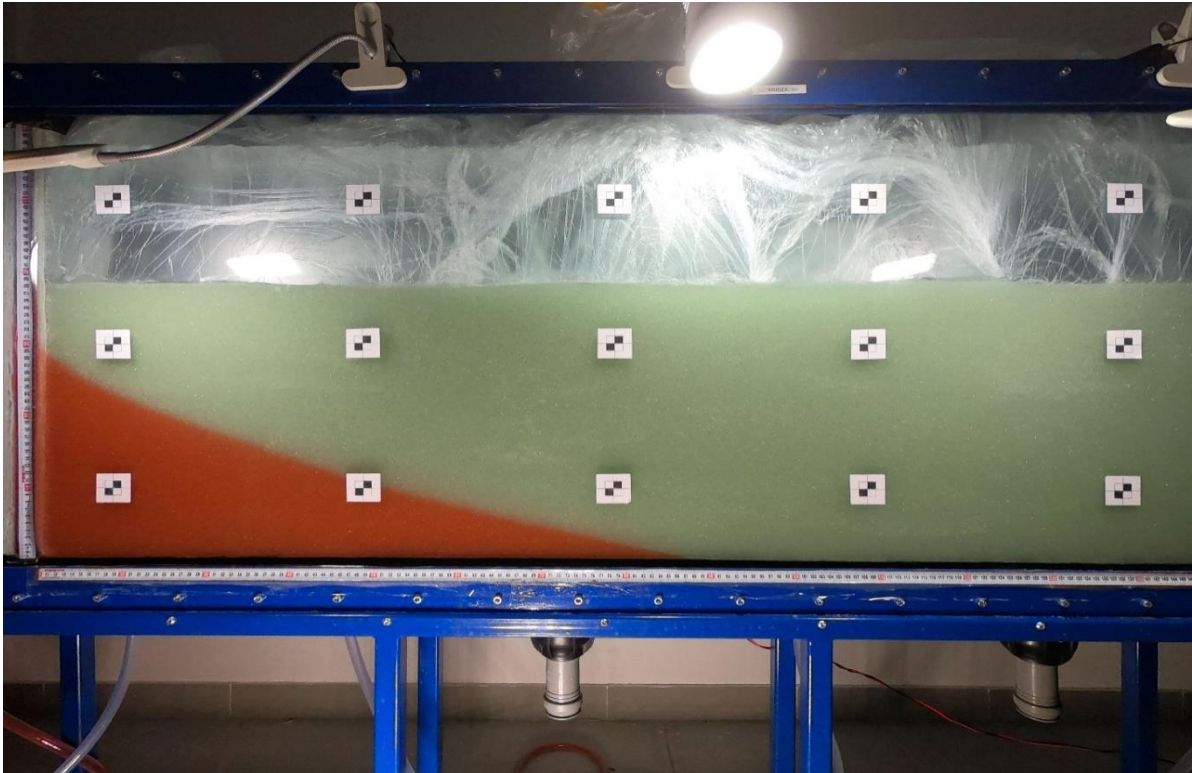
*Slika 58 Stanje u trenutku  $t=495$  minuta*



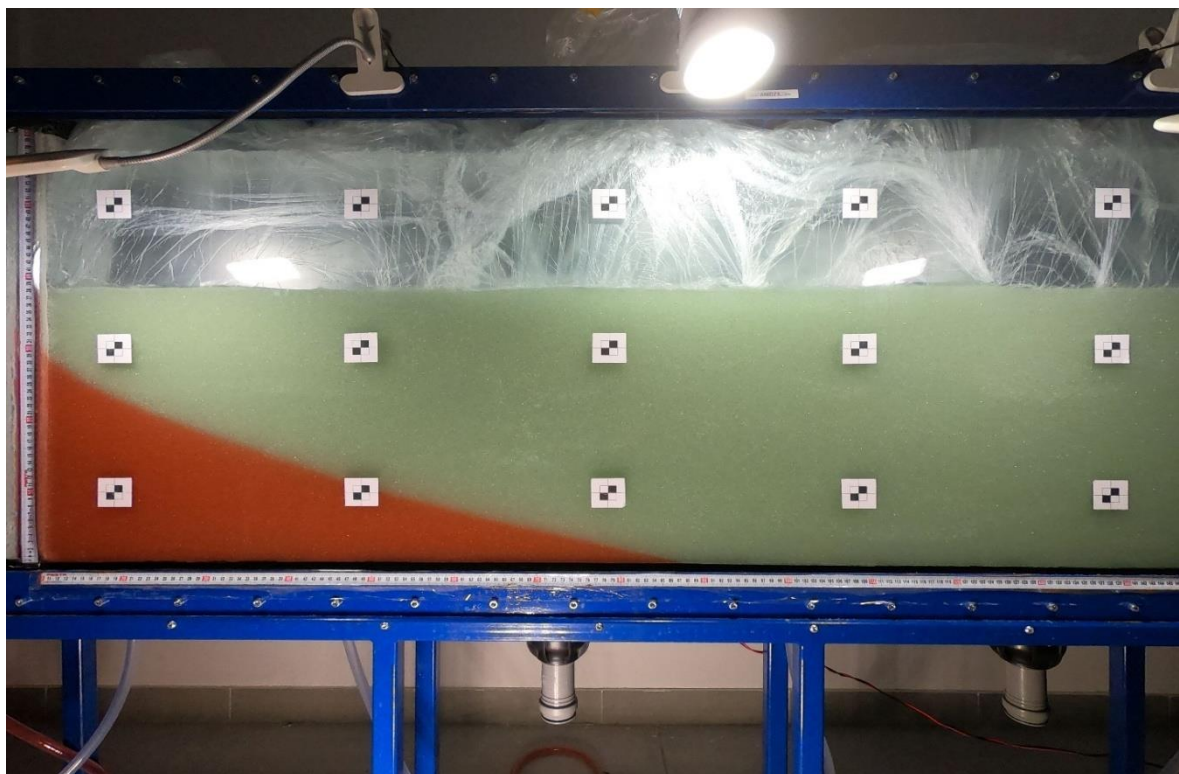
*Slika 59 Stanje u trenutku  $t=525$  minuta*



*Slika 60 Stanje u trenutku  $t= 540$  minuta*



*Slika 61 Stanje u trenutku  $t=555$  minuta*



*Slika 62 Stanje u trenutku  $t=570$  minuta-STACIJONARNO STANJE*

Nakon 570 minuta od puštanja eksperimenta duljina slanog klina dosegla je stacionarno stanje za visinsku razliku rubnih uvjeta  $\Delta h=1,6$  (cm). Očitana je vrijednost duljine slanog klina i iznosi  $x_t=77,7$  (cm).

### 4.3. Verifikacija analitičkih izraza

Korištenjem analitičkih izraza kao rezultat su dobivene vrijednosti duljine slanog klina  $x_t$  u vodonosnicima slatke vode. Rezultati su dobiveni uz određene hidrauličke, hidrogeološke i fizikalne parametre i verificirani su eksperimentalnim rješenjima koja su dobivena u laboratoriju.

Dakle, prikazana je usporedba rezultata duljine slanog klina dobivena analitičkim putem sa rezultatima dobivenim eksperimentalnim ispitivanjima. Na taj način su verificirani rezultati dobiveni analitičkim rješenjima.

Odrađena su dva eksperimenta i na svakom od njih su mijenjana tri različita gradijenta kako bi se zornije prikazalo ponašanje slanog klina te dala analiza razlike rezultata duljine slanog klina u ovisnosti o tome radi li se konstantnom napredovanju slanog klina ili o povlačenju slanog klina. Na napredovanje ili povlačenje klina utječe postavljanje desnog rubnog uvjeta to jest njegovo podizanje ili spuštanje u odnosu na lijevi rubni uvjet.

Eksperiment 1 i Eksperiment 2 su provedeni s istim hidrauličkim parametrima samo drugačijim redoslijedom postavljanja visinske razlike rubnih uvjeta. Na taj način je preciznije odrađena verifikacija analitičkih rješenja i prikaz rezultata za oba slučaja, a između ostalog prikazano je i vrijeme potrebno za dostizanje stacionarnog stanja prodiranja slanog klina.

### 4.3.1. Verifikacija analitičkog rješenja duljine slanog klina Eksperimentom 1

1) Visinska razlika rubnih uvjeta :  $\Delta h = 41,6 - 40,0 = 1,6$  (cm)

Ulazni parametri za analitička rješenja :

PARAMETAR	JEDINICA	IZNOS
$\rho_s$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1025
$\rho_f$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1000
B [L]	cm	38
L [L]	cm	188
$h_s$ [L]	cm	41,6
$h_f$ [L]	cm	40
d [L]	cm	0

Tablica 2 Ulazni parametri za analitička rješenja

Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja:

DULJINA SLANOG KLINA	ANALITIČKO RIJEŠENJE	EKSPERIMENTALNO RIJEŠENJE
$x_t$ (cm)	83,07	81

Tablica 3 Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja

2) Visinska razlika rubnih uvjeta :  $\Delta h = 41,9 - 40,0$  cm = 1,9 (cm)

Ulazni parametri za analitička rješenja:

PARAMETAR	JEDINICA	IZNOS
$\rho_s$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1025
$\rho_f$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1000
B [L]	cm	38
L [L]	cm	188
$h_s$ [L]	cm	41,9
$h_f$ [L]	cm	40
d [L]	cm	0

Tablica 4 Ulazni parametri za analitička rješenja

Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja:

DULJINA SLANOG KLINA	ANALITIČKO RIJEŠENJE	EKSPERIMENTALNO RJEŠENJE
$x_t$ (cm)	64,94	59,3

Tablica 5 Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja

3) Visinska razlika rubnih uvjeta:  $\Delta h = 42,2 - 40,0 = 2,2$  cm

Ulazni parametri za analitička rješenja:

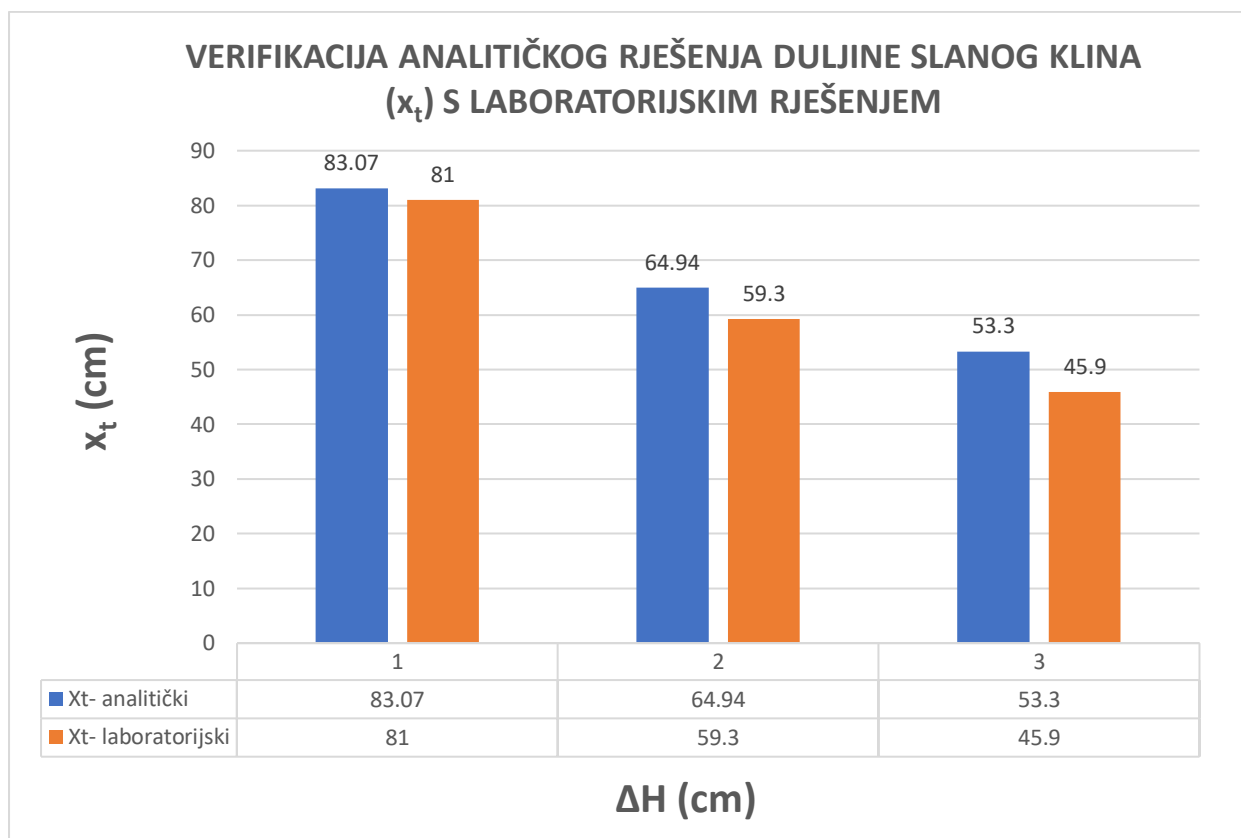
PARAMETAR	JEDINICA	IZNOS
$\rho_s$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1025
$\rho_f$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1000
B [L]	cm	38
L [L]	cm	188
$h_s$ [L]	cm	42,2
$h_f$ [L]	cm	40
d [L]	cm	0

Tablica 6 Ulazni parametri za analitička rješenja

Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja:

DULJINA SLANOG KLINA	ANALITIČKO RIJEŠENJE	EKSPERIMENTALNO RJEŠENJE
$x_t$ (cm)	53,3	45,9

Tablica 11 Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja



*Slika 63 Verifikacija analitičkog rješenja duljine slanog klina ( $x_t$ ) sa laboratorijskim rješenjem*

U grafu je prikazana verifikacija analitičkog rješenja duljine prodiranja slanog klina  $x_t$  za Eksperiment 1 kada je klin u procesu povlačenja. Rezultati dobiveni analitičkim rješenjima verificirani su laboratorijskim ispitivanjima.

Dakle, za svaki od tri različita rubna uvjeta dobiveni su analitički i laboratorijski rezultati. Vidljivo je kako postoje odstupanja u rezultatima dobivenim analitičkim i laboratorijskim putem. Međutim, još uvijek se može reći da su analitička rješenja mjerodavna te da laboratorijska ispitivanja adekvatno dokazuju točnost analitičkih rješenja.

### 4.3.2. Verifikacija analitičkog rješenja duljine slanog klina Eksperimentom 2

1) Visinska razlika rubnih uvjeta :  $\Delta h = 42,2 - 40,0 = 2,2$  (cm)

Ulazni parametri za analitička rješenja:

PARAMETAR	JEDINICA	IZNOS
$\rho_s$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1025
$\rho_f$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1000
B [L]	cm	38
L [L]	cm	188
$h_s$ [L]	cm	42,2
$h_f$ [L]	cm	40
d [L]	cm	0

Tablica 4 Ulazni parametri za analitička rješenja

Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja:

DULJINA SLANOG KLINA	ANALITIČKO RIJEŠENJE	EKSPERIMENTALNO RIJEŠENJE
$x_t$ (cm)	53,3	49,4

Tablica 5 Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja

2) Visinska razlika rubnih uvjeta :  $\Delta h = 41,9 - 40,0 = 1,9$  (cm)

Ulazni parametri za analitička rješenja:

PARAMETAR	JEDINICA	IZNOS
$\rho_s$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1025
$\rho_f$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1000
B [L]	cm	38
L [L]	cm	188
$h_s$ [L]	cm	41,9
$h_f$ [L]	cm	40
d [L]	cm	0

Tablica 6 Ulazni parametri za analitička rješenja



Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja:

DULJINA SLANOG KLINA	ANALITIČKO RIJEŠENJE	EKSPERIMENTALNO RIJEŠENJE
$x_t$ (cm)	64,94	60,05

Tablica 7 Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja

3) Visinska razlika rubnih uvjeta :  $\Delta h = 41,6 - 40,0 = 1,6$  (cm)

Ulazni parametri za analitička rješenja:

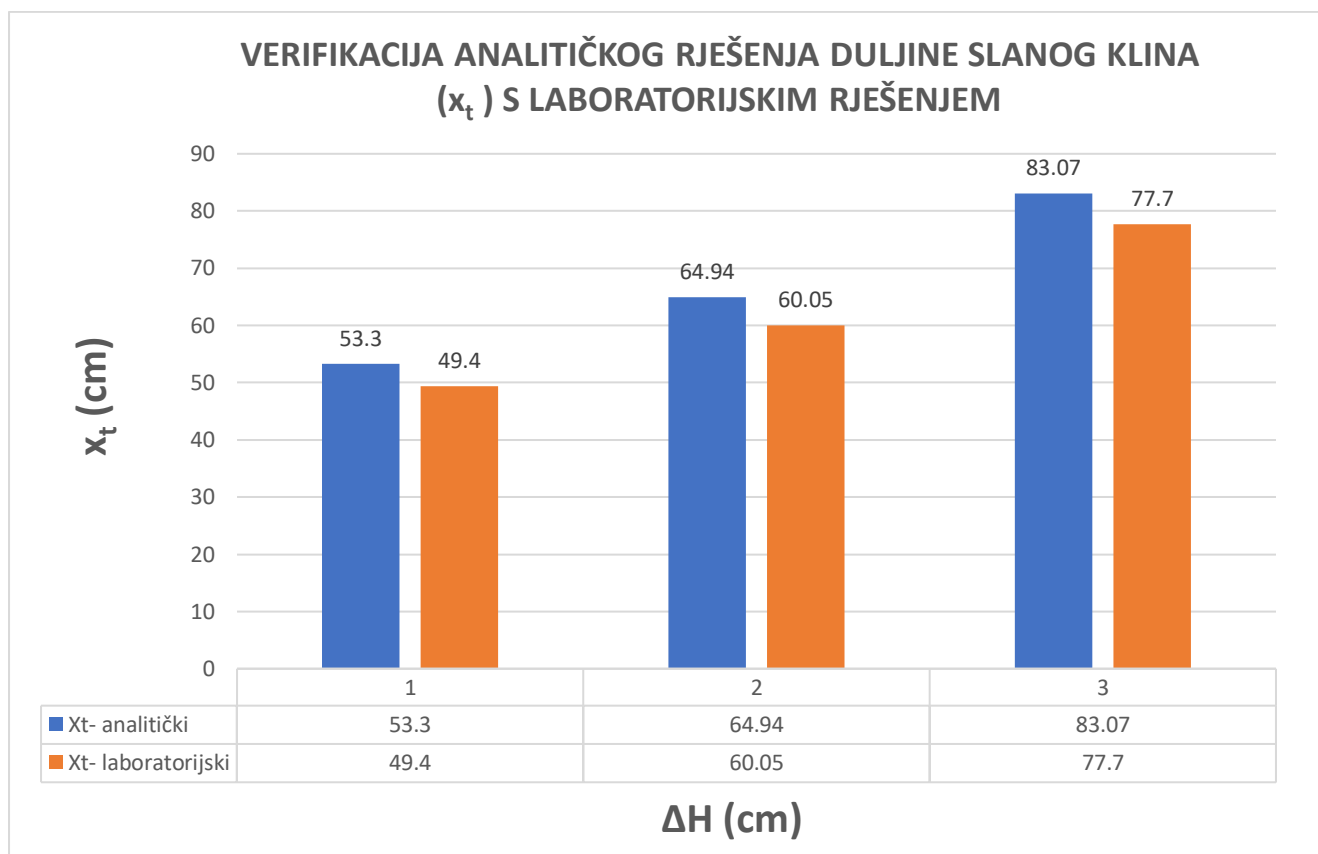
PARAMETAR	JEDINICA	IZNOS
$\rho_s$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1025
$\rho_f$ [M/L <sup>3</sup> ]	kg/m <sup>3</sup>	1000
B [L]	cm	38
L [L]	cm	188
$h_s$ [L]	cm	41,6
$h_f$ [L]	cm	40
d [L]	cm	0

Tablica 8 Ulazni parametri za analitička rješenja

Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja:

DULJINA SLANOG KLINA	ANALITIČKO RIJEŠENJE	EKSPERIMENTALNO RIJEŠENJE
$x_t$ (cm)	83,07	77,7

Tablica 9 Rezultat analitičkog i eksperimentalnog rješenja



*Slika 64 Verifikacija analitičkog rješenja duljine slanog klina ( $x_t$ ) sa laboratorijskim rješenjem*

Kao za prvi slučaj tako i za drugi, kada je slani klin u procesu napredovanja u grafu je prikazana verifikacija analitičkog rješenja duljine prodiranja slanog klina  $x_t$ . Rezultati duljine prodiranja slanog klina dobiveni analitičkim rješenjem verificirani su rezultatima dobivenim putem laboratorijskih ispitivanja. Iako postoje mala odstupanja analitičkog i laboratorijskog rješenja kao i u prvom slučaju i dalje su rezultati dobiveni analitičkim putem mjerodavni. Dakle, uspješno su verificirana analitička rješenja.

## 5. UTJECAJ PARAMETARA NA SVOJSTVA KLINA

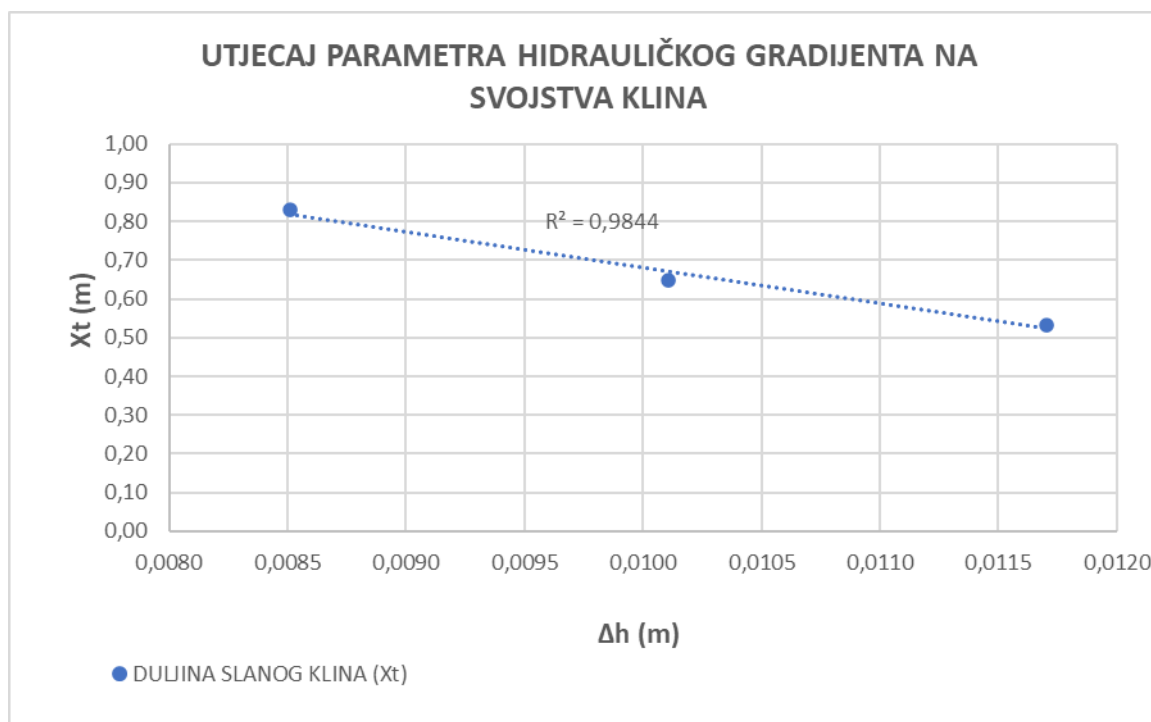
### 5.1. Utjecaj promjene parametra hidrauličkog gradijenta $\Delta h/L$ na svojstva klina

Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o promjeni  $\Delta h/L$  :

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta h/L$	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1025	1000	40,00	0,400	0,416	0,016	0,008511	0,830698
1,88	0,38	1025	1000	40,00	0,400	0,419	0,019	0,010106	0,649455
1,88	0,38	1025	1000	40,00	0,400	0,422	0,022	0,011702	0,533134

Tablica 10 Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o promjeni hidrauličkog gradijenta  $\Delta h/L$

Grafički prikaz utjecaja promjene  $\Delta h/L$  na duljinu slanog klina:



Slika 65 Utjecaj promjene parametra hidrauličkog gradijenta  $\Delta h/L$  na svojstva klina

Analitički i grafički je prikazano kako promjena  $\Delta h/L$  utječe na svojstva slanog klina. Vidljivo je da povećanjem parametra hidrauličkog gradijenta duljina prodiranja slanog klina opada. Dakle, povećavanjem visine desnog rubnog uvjeta utječe se na duljinu prodiranja slanog klina.

## 5.2. Utjecaj parametra gustoće slane vode ( $\rho_s$ ) na svojstva slanog klina

Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o gustoći slane vode ( $\rho_s$ ):

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\Delta h$ (m)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1015	1000	66,67	0,400	0,416	0,016	0,416965
1,88	0,38	1020	1000	50,00	0,400	0,416	0,016	0,605424
1,88	0,38	1025	1000	40,00	0,400	0,416	0,016	0,830698
1,88	0,38	1030	1000	33,33	0,400	0,416	0,016	1,104742

Tablica 11 Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o gustoći slane vode ( $\rho_s$ )

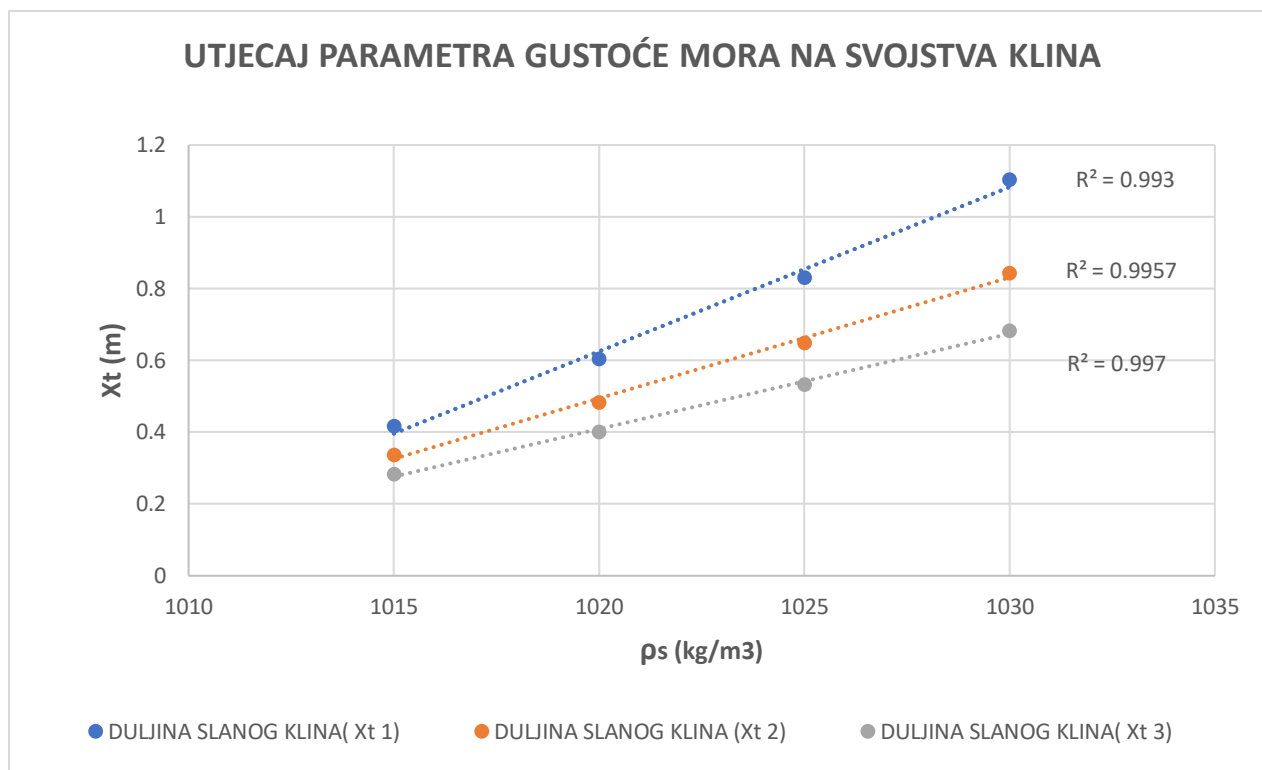
L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\Delta h$ (m)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1015	1000	66,67	0,400	0,419	0,019	0,338044
1,88	0,38	1020	1000	50,00	0,400	0,419	0,019	0,482703
1,88	0,38	1025	1000	40,00	0,400	0,419	0,019	0,649455
1,88	0,38	1030	1000	33,33	0,400	0,419	0,019	0,843780

Tablica 12 Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o gustoći slane vode ( $\rho_s$ )

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\Delta h$ (m)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1015	1000	66,67	0,400	0,422	0,022	0,284244
1,88	0,38	1020	1000	50,00	0,400	0,422	0,022	0,401348
1,88	0,38	1025	1000	40,00	0,400	0,422	0,022	0,533134
1,88	0,38	1030	1000	33,33	0,400	0,422	0,022	0,682548

Tablica 13 Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o gustoći slane vode ( $\rho_s$ )

Grafički prikaz utjecaja gustoće slane vode na duljinu slanog klina:



*Slika 66 Utjecaj parametra gustoće mora na svojstva klina*

Analitički i grafički je prikazan utjecaj promjene gustoće slane vode ( $\rho_s$ ) na svojstva slanog klina. Vidljivo je da je povećavanjem gustoće slane vode povećana duljina prodiranja slanog klina, a smanjivanjem gustoće slane vode smanjuje se i duljina prodiranja slanog klina. Odnos parametra gustoće slane vode i duljine slanog klina je linearan. Korelacija  $R^2$  je približna iznosu 1,0. Dakle, porastom same gustoće slane vode linearno se povećava i duljina prodiranja slanog klina  $x_t$ .

### 5.3. Utjecaj parametra gustoće slatke vode ( $\rho_f$ ) na svojstva slanog klina

Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o gustoći slatke vode ( $\rho_f$ ):

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\Delta h$ (m)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1025	998	36,96	0,400	0,416	0,016	0,936531
1,88	0,38	1025	999	38,42	0,400	0,416	0,016	0,882478
1,88	0,38	1025	1000	40,00	0,400	0,416	0,016	0,830698
1,88	0,38	1025	1001	41,71	0,400	0,416	0,016	0,781050

Tablica 14 Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o gustoći slatke vode ( $\rho_f$ )

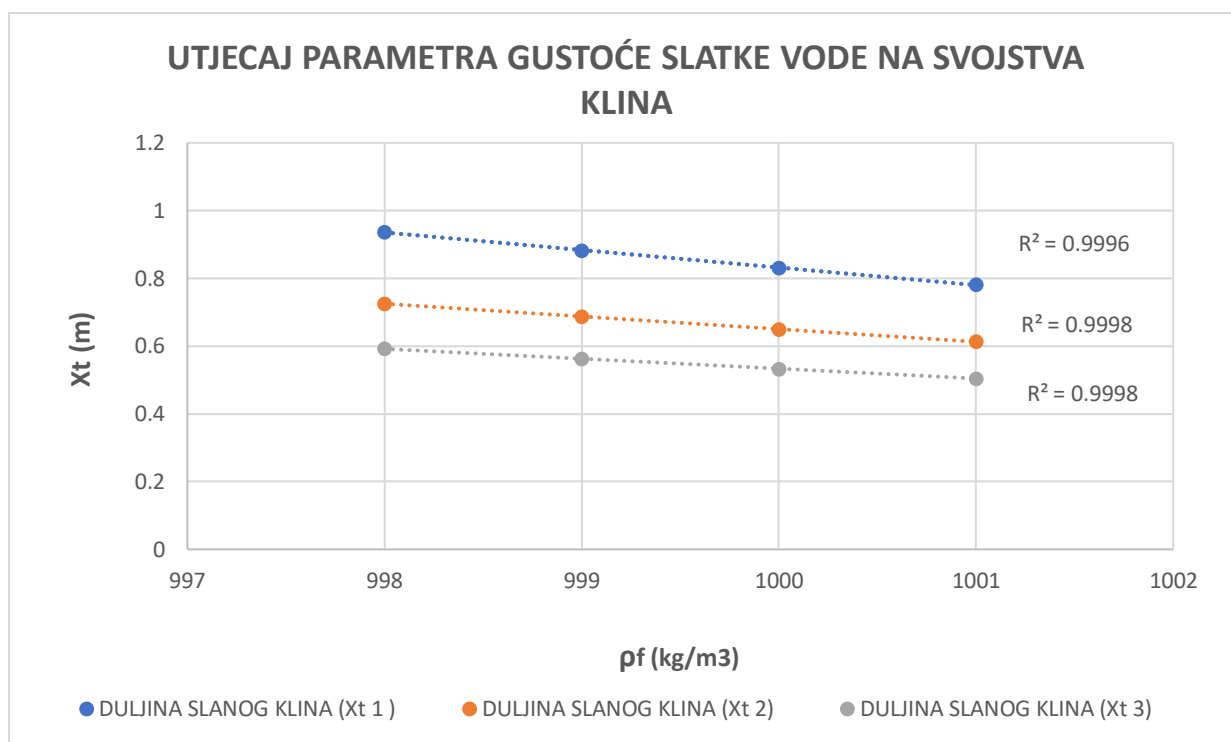
L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\Delta h$ (m)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1025	998	36,96	0,400	0,419	0,019	0,725579
1,88	0,38	1025	999	38,42	0,400	0,419	0,019	0,686872
1,88	0,38	1025	1000	40,00	0,400	0,419	0,019	0,649455
1,88	0,38	1025	1001	41,71	0,400	0,419	0,019	0,613263

Tablica 15 Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o gustoći slatke vode ( $\rho_f$ )

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\Delta h$ (m)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1025	998	36,96	0,400	0,422	0,022	0,592190
1,88	0,38	1025	999	38,42	0,400	0,422	0,022	0,562247
1,88	0,38	1025	1000	40,00	0,400	0,422	0,022	0,533134
1,88	0,38	1025	1001	41,71	0,400	0,422	0,022	0,504817

Tablica 16 Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o gustoći slatke vode ( $\rho_f$ )

Grafički prikaz utjecaja gustoće slatke vode ( $\rho_f$ ) na duljinu slanog klina:



*Slika 67 Utjecaj parametra gustoće slatke vode na svojstva klina*

Kako je dokazano da porastom gustoće slane vode raste i duljina prodiranja slanog klina, tako je dokazano da i porastom gustoće slatke vode opada duljina prodiranja slanog klina. Odnos gustoće slatke vode ( $\rho_f$ ) i duljine prodiranja slanog klina ( $x_t$ ) je linearan sa korelacijom  $R^2$  koja teži k vrijednosti 1,0. Dakle prikazano je analitički i grafički da duljina prodiranja slanog klina opada prilikom porasta gustoće slatke vode.

## 5.4. Utjecaj parametra hidrauličkog konduktiviteta ( $k$ ) na svojstva slanog klina

Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o hidrauličkom konduktivitetu ( $k$ ):

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$k$ (m/s)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\Delta h$ (m)	$q_f$ (m <sup>2</sup> /s)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1025	1000	40	0,010	0,400	0,416	0,016	0,000022	0,830698
1,88	0,38	1025	1000	40	0,012	0,400	0,416	0,016	0,000025	0,830698
1,88	0,38	1025	1000	40	0,020	0,400	0,416	0,016	0,000043	0,830698
1,88	0,38	1025	1000	40	0,025	0,400	0,416	0,016	0,000054	0,830698

Tablica 17 Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o konduktivitetu ( $k$ )

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$k$ (m/s)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\Delta h$ (m)	$q_f$ (m <sup>2</sup> /s)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1025	1000	40	0,010	0,400	0,419	0,019	0,000028	0,649455
1,88	0,38	1025	1000	40	0,012	0,400	0,419	0,019	0,000032	0,649455
1,88	0,38	1025	1000	40	0,020	0,400	0,419	0,019	0,000056	0,649455
1,88	0,38	1025	1000	40	0,025	0,400	0,419	0,019	0,000069	0,649455

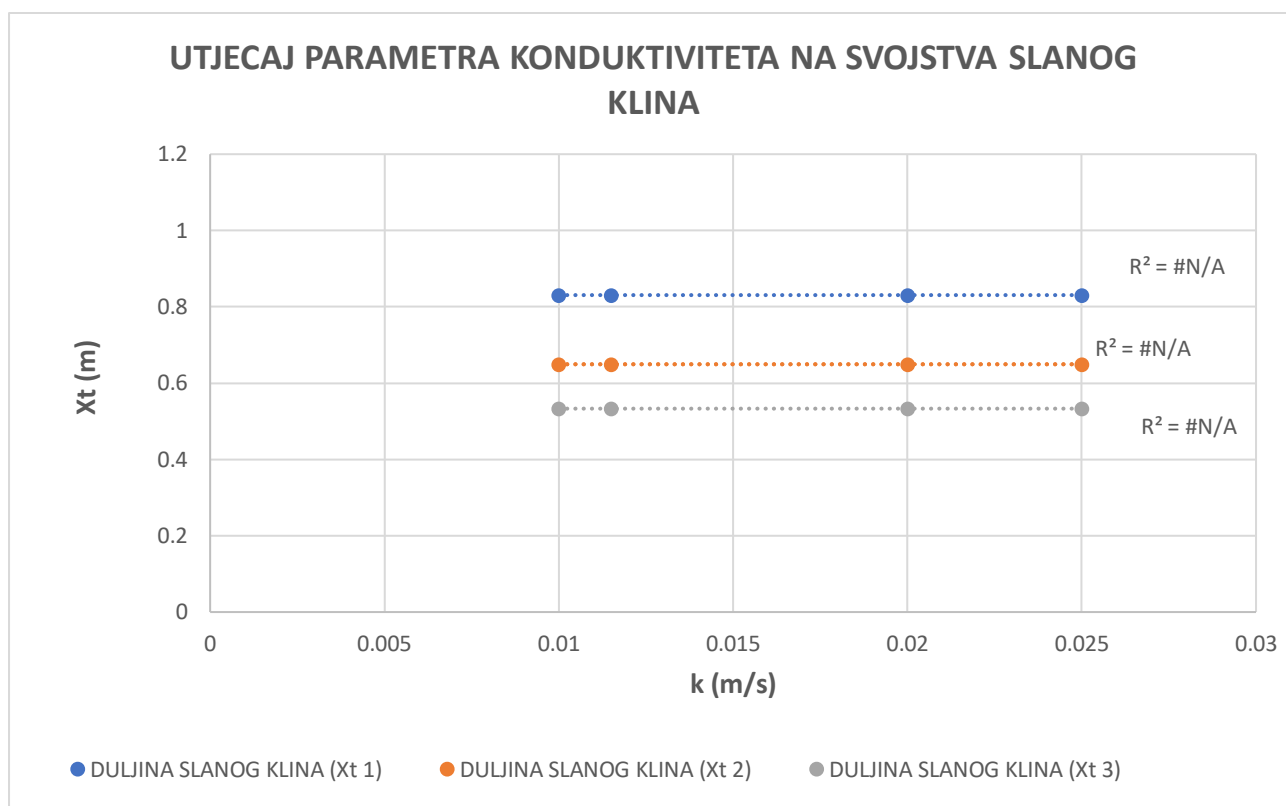
Tablica 18 Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o konduktivitetu ( $k$ )

L(m)	B(m)	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (°)	$k$ (m/s)	$h_s$ (m)	$h_f$ (m)	$\Delta h$ (m)	$q_f$ (m <sup>2</sup> /s)	$x_t$ (m)
1,88	0,38	1025	1000	40	0,010	0,400	0,422	0,022	0,000034	0,533134
1,88	0,38	1025	1000	40	0,012	0,400	0,422	0,022	0,000039	0,533134
1,88	0,38	1025	1000	40	0,020	0,400	0,422	0,022	0,000068	0,533134
1,88	0,38	1025	1000	40	0,025	0,400	0,422	0,022	0,000085	0,533134

Tablica 19 Prikaz analitičkih rješenja u ovisnosti o konduktivitetu ( $k$ )



Grafički prikaz utjecaja konduktiviteta ( $k$ ) na duljinu slanog klina:



Slika 68 Utjecaj parametra konduktiviteta na svojstva klina

Analitičkim rješenjima i grafičkim prikazom dokazano je kako parametar hidrauličkog konduktiviteta ( $k$ ) ne utječe na svojstva klina. Vidljivo je kako se promjenom parametra  $k$  dobiju jednaki rezultati duljine prodiranja slanog klina ( $x_t$ ).

## 6. RASPRAVA I ZAKLJUČAK

U ovom radu u kojem se od samog početka kao glavni problem nameće prodor slanog klina u obalne vodonosnike pod tlakom kojeg je bilo potrebno definirati i komentirati te na taj način pristupiti rješavanju samog problema prodora slanog klina. Kako bi se definirao parametar prodiranja slanog klina  $x_t$  pristupilo se analitičkim rješenjima. Korištenjem analitičkih rješenja dobivene su i jasno definirane duljine prodiranja slanog klina za sve poznate hidrauličke i fizikalne parametre u uvjetima ograničenog obalnog vodonosnika pod tlakom. Važno je napomenuti da je prilikom analitičkog rješavanja duljine prodiranja slanog klina rubni uvjet slane vode bio konstantan dok se rubni uvjet slatke vode mijenjao ovisno o potrebama proračuna. Osim definiranja same duljine slanog klina pratilo se i ponašanje istog s obzirom na utjecaj različitih parametara. Tako je prikazan i jasno obrazložen utjecaj promjene parametra gustoće slane vode, gustoće slatke vode, hidrauličkog konduktiviteta te gradijenta. Vidljivo je ponašanje slanog klina te njegova svojstva prilikom promjene navedenih parametara. Dokazan je linearan odnos između ključnog parametra duljine prodiranja slanog klina i ostalih parametara te korelacija koja je približno iznosila „1“ u svim slučajevima osim u odnosu konduktiviteta i duljine prodiranja slanog klina. Kod odnosa konduktiviteta i duljine prodiranja slanog klina dokazano je kako konduktivitet nema utjecaj na duljinu slanog klina. Ponašanje slanog klina u odnosu na ostale parametre grafički je prikazano u poglavlju 5. Rezultate dobivene analitičkim rješenjima potrebno je bilo verificirati laboratorijskim modelima. Laboratorijskim ispitivanjima odrađena su dva eksperimenta za koja su dobiveni rezultati kojima je verificirano analitičko rješenje duljine prodiranja slanog klina. Korišteni su jednaki rubni uvjeti kao i kod analitičkih rješenja. Bitno je naglasiti da je prikladno prikazana i kvantificirana vremenska asimetrija između Eksperimenta 2 koji za rezultat prikazuje napredovanje slanog klina u vremenu sve do stacionarnih stanja i Eksperimenta 1 u kojemu se klin povlači u vremenu do postizanja stacionarnih stanja. Navedeno, pokazuje da se u slučaju konstantnog napredovanja slanog klina do stacionarnih stanja i prikaza rezultata duljine prodora slanog klina dolazilo u većim vremenskim skalama, dok je u slučaju kod povlačenja klina potrebno nešto manje vremena do stacionarnog stanja duljine slanog klina. Dakle, odgovor laboratorijskih ispitivanja na analitička rješenja su samo dobar pokazatelj da su analitička rješenja mjerodavan i vjerodostojan prikaz rezultata duljine prodiranja slanog klina u vodonosnike slatke vode, ali i da su ta ista rješenja vrlo osjetljiva u slučajevima promjene određenih hidrauličkih i fizikalnih parametara.

## **7. LITERATURA**

- [1] “Laboratory experiments on the saltwater intrusion process“ (Prof. Paolo Salandin, Prof. Roberta Bertani, Dr. Elena Crestani, Dr. Enrica Belluco, Erika Bertorelle)
- [2] “Towards a Correlation between Long-Term Seawater Intrusion Response and Water Level Fluctuations“ (Antoifi Abdoulhalik, Ashraf A. Ahmed, Abdelrahman M. Abdelgawad and G. A. Hamill)
- [3] “Laboratory-scale investigation of saltwater intrusion dynamics“ (Rohit R. Goswami and T. Prabhakar Clement)
- [4] “Assessment of the impact of sea-level rise on steady-state seawater intrusion in a layered coastal aquifer“ (Wenlong Shi, Chunchui Lu, Yu Ye, Jichun Wu, Ling Li, Jian Luo)
- [5] “Seawater intrusion in response to sea-level rise in a coastal aquifer with a general-head inland boundary“ ( Chunchui Lu, Pei Xin, Ling Li, Jian Luo )
- [6] “Analytical analysis of the temporal asymmetry between seawater intrusion and retreat“ (Saubhagya Singh Rathore, Yuo Zhao, Chunchui Lu, Jian Luo )