

# Detekcija točaka gubitka vode u velikim plitkim rezervoarima korištenjem trasera: laboratorijski eksperimenti

---

Vukušić, Toni

Master's thesis / Diplomski rad

2022

*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:123:698944>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-23**



*Repository / Repozitorij:*

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



UNIVERSITY OF SPLIT



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

# **DIPLOMSKI RAD**

**Toni Vukušić**

**Split, 2022.**

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

**Toni Vukušić**

**Detekcija točaka gubitka vode u velikim  
plitkim rezervoarima korištenjem  
trase: laboratorijski eksperimenti**

Akad. godina: 2021./2022.  
Student: Toni Vukušić

Želio bi izraziti priznanje profesorima Joãou Luísu Mendes Pedroso de Limi i Marii Isabeli Mendes Leal Pereira Pedroso de Limi sa Sveučilišta u Coimbri (Portugalu), Departement of Civil Engineering, na dodjeli teme za diplomski rad, kao i mentorstvu kroz proces izrade, te također kolegi Soheilu Zehsazu na postavi laboratorijskog modela, te izvedbi pokusa.

Ovim putem bi se želio zahvaliti svim koji su mi pomogli u izradi svoga diplomskog rada, ali i doći do završetka svoje studijske naobrazbe. Ovo ne bi bilo moguće bez potpore moje obitelji i prijatelja, i profesora koji se me pogurali i naučili kako da dosegнем izniman dio svoga potencijala. Posebno se zahvaljujem majci Maji, ocu Dinku, bratu Domagoju i Juri, na neizmjerne potpori i lekcijama koje sam primao kroz godine. Zatim mojim mentorima Joãou Luísu Mendes Pedroso de Limi i Marii Isabeli Mendes Leal Pereira Pedroso de Limi iz Coimbri, Portugalu koji su me upoznali sa temom svoga diplomskog rada i pomagali u izradi. Zatim svom kolegi Soheil Zehsazu s kojim sam obavljao eksperimentalne pokuse i koji me je navodio pravilno i pouzdano kroz probleme mog rada. Iznimno se želim zahvaliti svojoj mentorici iz Splita, Katarini Rogulj u potpori i vodstvu pruženom tijekom izrade rade, te samoj mogućnosti da pristupim obrani diplomskog rada.

## Registo de Tema de Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Civil (MEC)

Ano Letivo \_2021/2022

Semestre \_2º

Nome do Aluno: Toni Vukusic

Nº 2021263701

Email: tonivukusic998@gmail.com

Telefone: +385 99 335 7776

**Título da Dissertação: Detecting water loss leaks in large shallow reservoirs using tracers: laboratory experiments**

Orientador: Prof. Dr. João L.M. Pedroso de Lima Instituição: UC/MARE Assinatura:

Orientador: Prof. Dr. Isabel Pedroso de Lima Instituição: UC/MARE Assinatura:

Resumo (300 palavras)

Sustainable water management demands that losses are reduced. However, although the problem of water losses is found in many situations, their nature often makes the identification of losses a difficult task. In large reservoirs water losses are mostly from evaporation, percolation on bottom and ditches and underground leaks. To reduce those losses we need leak detection techniques.

The main objective of this dissertation is to explore techniques for the estimation of the location of possible water loss sinks in large shallow reservoirs using tracers, using physical laboratory scale model.

The study will be based on laboratory experiments conducted at the Laboratory of Hydraulics, Water Resources and Environment of the University of Coimbra (Portugal). The experimental set-up includes a squared soil flume (2x2 m<sup>2</sup>) with a horizontal soil surface. The soil placed in the flume will be of very low permeability. After flooding the flume (simulating a large shallow reservoir), sinks will be created in the physical model. The following tracers will be tested: thermal, dye and fluorescent. Various sink locations should be studied, for various hydraulic conditions (e.g., discharge, depth, tracer volume).

Parecer do Coordenador da Área Científica DEC  / Representante do Departamento... Favorável  Desfavorável  Assinatura \_\_\_\_\_

Justificação (em caso de parecer desfavorável)

Parecer do Coordenador do Mestrado

Favorável  Desfavorável  Assinatura \_\_\_\_\_

Justificação (em caso de parecer desfavorável)

Assinatura do aluno



Data 12/03/2022



University of Split  
International Relations Office  
Erasmus coordinator  
Ruđera Boškovića 31  
21000 Split

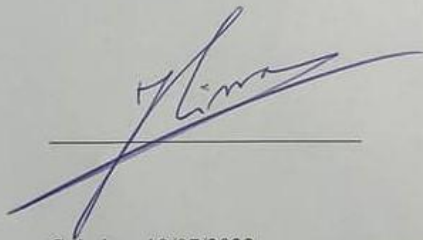
## Letter of Confirmation

This is to confirm that student **Toni Vukušić** from the **University of Split** spent 5 months at the University of Coimbra, Faculty of Science and Technology, Department of Civil Engineering, within the framework of the Erasmus + Programme, for the purpose of research for his Master thesis entitled: *Detecting water loss leaks in large shallow reservoirs using tracers: laboratory experiments*. He conducted all the experimental work proposed and treated and analysed the laboratory data resulting in a comprehensive draft version of his master thesis. He performed the experiments together with a Ph.D student (Soheil Zehsaz).

**This Letter must be signed and notarized either by host Professor/Mentor, Dean, or Erasmus coordinator of the abovementioned Institution and serves as proof of fulfilled obligations stated in the Learning agreement.**

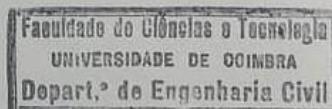
Prof. Dr. João Pedroso de Lima  
Full Professor

Prof. Dr. M. Isabel Pedroso de Lima  
Assistant Professor



Coimbra, 19/07/2022

Stamp of the Institution:



# SVEUČILIŠTE U SPLITU

## FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

### STUDIJ: DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA

**KANDIDAT:** Toni Vukušić

**BROJ INDEKSA:** 0083215042

**KATEDRA:** Katedra za gospodarenje vodama i zaštita voda

**PREDMET:** Hidrotehnički sustavi

### ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Detekcija točaka gubitka vode u velikim plitkim rezervoarima korištenjem trasera: laboratorijski eksperimenti

Opis zadatka: Održivo upravljanje vodom zahtijeva da se gubici vode reduciraju. Međutim, iako se problem gubitka vode pojavljuje u mnogim situacijama, zbog njihove prirode često identifikacija samih gubitaka predstavlja zahtjevan pothvat. U velikim rezervoarima gubici vode uglavnom potječu od isparavanja, procjeđivanja na dnu i jarcima, te podzemnog curenja. Da bismo reducirali te gubitke, potrebne su nam tehnike detektiranja curenja. Glavni cilj ovoga diplomskog rada je istražiti tehnike za procjenu mogućeg mjesta gubitka vode u velikim plitkim rezervoarima koristeći trasere i fizički model na laboratorijskoj skali. Studija će se temeljiti na laboratorijskim eksperimentima provedenim u Laboratoriju Hidraulike, Vodenih Resursa i Okoliša, Sveučilišta Coimbra (Portugal). Eksperimentalna postava uključuje kvadratni zemljani žlijeb ( $2 \times 2 \text{ m}^2$ ) s vodoravnom površinom tla. Tlo smješteno u kvadratni žlijeb, imat će vrlo nisku propusnost. Nakon poplave zemljanog žlijeba (simulirajući veliki plitki rezervoar), drenažne točke će se iskopati u fizičkom modelu. Ispitat će se sljedeći traseri: termalni, obojeni i fluorescentni. Različite lokacije drenažnih točaka trebaju se proučiti, za različite hidrauličke uvjete (npr. protok istjecanja, dubinu, volumen trasera).

U Splitu, 20. rujna, 2022.

Voditelj diplomskog rada:

Doc. dr. sc. Katarina Rogulj

Predsjednik povjerenstva za završne i  
diplomske ispite:

Izv. prof. dr.sc. Ivo Andrić

## **Detekcija točaka gubitka vode u velikim plitkim rezervoarima korištenjem trasera: laboratorijski eksperimenti**

**Sažetak:** *Prioritet ovog rada je evaluacija metoda praćenja koje se koriste u svrhu otkrivanja točke propusnosti u plitkim rezervoarima vode. Gubitak vode koji se pokazuje na velikoj prostornoj razini kroz istjecanje, curenje ili duboku perkolaciju, treba istražiti simulacijom okoliša i uvjeta koji dovode do toga. U opisu procesa i tehnika praćenja uključenih u eksperiment korištena je literatura o metodologijama i strujanju plitkih voda od raznih autora značajnih za naš rad. Fizikalni model postavljen je u laboratoriju, a sastoji se od sustava za unos vode i zemljanog kanala s površinom od 2x2 m. Ciljevi obuhvaćaju kvalitativnu i kvantitativnu procjenu plitkog toka površinske vode i kretanja trasera prema točki propusnosti, kao rezultat korištenja određene tehnike praćenja. S obzirom na ciljeve, eksperimentalni postupak je podijeljen na fazu navodnjavanja i detekciju. Konstantno ravnomjerno pražnjenje korišteno je za pretapanje kanala, za rekonstrukciju prirodnih uvjeta plitkog protoka, a dvostruki traser toplinske boje ubrizgan je kroz čaše za procjenu brzina protoka. Definirana su i modificirana tri parametra za način istraživanja detekcije točke propusnosti kroz više eksperimentalnih pokusa. Toplinski traser odabran je kao predstavnik za sve pokuse zbog raspoložive opreme i kvalitete slike. Rezultati prikupljeni eksperimentalnom analizom pomogli su u raspravi o prednostima i slabostima ove vrste eksperimentalnog pristupa. U slučaju poplave, empirijski podaci poslužili su kao sredstvo za istraživanje kretanja plitke vode preko gole površine koja služi kao pozadina za tehnike praćenja. Uspoređeni su različiti rezultati detekcije točke propusnosti, a najpovoljniji i najnepovoljniji rezultati uzeti su kao reprezentativni za termalnu tehniku praćenja*

**Ključne riječi:** *plitki, traser, tehnika praćenja, detekcija, točka propusnosti*



## **Detecting water loss leaks in large shallow reservoirs using tracers: laboratory experiments**

**Abstract:** *This work is prioritized on evaluating tracer methods that are used for the purpose of detecting the drainage point in shallow water reservoirs. Water loss exhibited on a large spatial scale through leakage, seepage, or deep percolation, needs to be researched by simulating the environment and conditions that lead up to it. Literature on methodologies and shallow water flow from various authors significant to our work was used in the description of the processes and tracing techniques involved in our experiment. A physical-based model was set up in a laboratory setting, consisting of a water input system and a soil flume with a 2x2 m area space. Objectives comprise a qualitative and quantitative evaluation of the shallow surface water flow and tracer movement towards the sink point, as a result of using an appointed tracing technique. In regards to the goals, the experimental proceeding was divided into the flooding and detection phases. A constant steady discharge was used to flood the flume, for the reenactment of natural shallow flow conditions, and a dual thermal-dye tracer was injected through cups for estimating flow velocities. Three parameters were defined and modified, for the means of investigating the detection of the sink point, through multiple experimental trials. Thermal tracer was chosen as a representative for all of the experiments due to the available equipment and image quality. Results gathered from the experimental analysis helped discuss the merits and weaknesses of this kind of experimental approach. In the case of flooding, the empirical data served as a means to investigate the shallow water movement across the barren surface that serves as a background for tracer techniques. Various results from the detection of the sink point were compared, and the most favorable and unfavorable results were taken as representative of the thermal tracing technique*

**Keywords:** *shallow water, tracer, tracing technique, detection, sink point*

## SADRŽAJ

NASLOVNICA.....	i
DISERTACIJA .....	ii
PRIZNANJA.....	iii
PROJEKTNI ZADATAK.....	iv
POTVRDA .....	v
OPIS TEME.....	vi
SAŽETAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
SADRŽAJ.....	ix
1. UVOD.....	1
1.1 Radni okvir i motivacija .....	1
1.2 Ciljevi .....	2
1.3 Struktura diplomskog rada.....	3
2. BIBLIOGRAFSKI OSVRT.....	4
2.1 Održivo upravljanje vodama.....	4
2.1.1 Umjetna i prirodna vodena tijela.....	5
2.1.2 Kontrola gubitka vode.....	10
2.2 Kretanje plitkih površinskih vodenih tokova.....	13
2.2.1 Nadzmeni tok vode.....	14
2.2.2 Dinamika i kinematika plitkih vodenih tokova .....	17
2.3 Međudjelovanje vode i tla .....	22
2.4 Integrirane tehnike praćenja toka vode .....	25
2.4.1 Umjetni traseri.....	25
2.4.2 Karakteristike transporta otopine.....	28
3. METODE I MATERIJALI.....	31
3.1 Laboratorijska postava.....	31
3.1.1 Morfologija tla i površine.....	32
3.1.2 Video sustav za snimanje.....	32
3.2 Traseri .....	33
3.2.1 Termalni traseri.....	33
3.2.2 Obojeni traseri .....	34
3.3 Eksperimentalna metodologija.....	34
3.3.1 Laboratorijski uvjeti.....	34
3.3.2 Faza navodnjavanja.....	36
3.3.3 Faza detekcija točke propusnosti.....	38
4. ANALIZA I REZULTATI.....	40
4.1 Faza navodnjavanja.....	40
4.1.1 Površinsko širenje vode.....	40
4.1.2 Polje brzina.....	42
4.2 Faza detekcije točke propusnosti.....	45
4.2.1 Analiza detekcije za slučaj 1 drenažne šupljine.....	45
4.2.2 Analiza detekcije za slučaj 2 drenažne šupljine.....	47
4.2.3 Analiza detekcije za slučaj 3 drenažne šupljine .....	49
4.2.4 Opis rezultata.....	53
5. ZAKLJUČAK.....	56
6. LITERATURA.....	59

# 1. UVOD

## 1.1. Radni okvir i motivacija

U kontekstu prostorne distribucije vode, postoji jedan čimbenik koji se ne može zanemariti, bilo da govorimo o poljoprivredno kultiviranim poplavnim područjima ili umjetno ograničenim vodnim tijelima, gubitak vode predstavlja prijetnju dugoročnom upravljanju vodama i održivosti. u stalnom kretanju stjecanja više znanja o revizijama vode i provedbi programa kontrole gubitaka (npr. poboljšanje kapaciteta zadržavanja vode, procjena curenja, onemogućavanje rasta biljaka, reguliranje protoka), kako bi se očuvao bio-geo-kemijski ciklus koji je u korelaciji s hidrološkim sustavom. Na globalnoj razini, gubici vode variraju ovisno o prostornim i vremenskim uvjetima, iako glavne vrste koje utječu na hidrauličku hemisferu mogu biti promatrano kroz vanjske sustave za zadržavanje vode [2,3,15,16]. Gubitak vode u svom konzervativnom obliku (bilo da se radi o curenju, izlivanju ili otjecanju) predstavlja prepreku u području hidrologije, stoga možemo zaključiti da stabilan plitki tok vode predstavlja način bližeg promatranja ovog problema. Obično su u zatvorenim objektima postavljene mjere za otkrivanje eventualnih oštećenja iz kojih bi voda mogla istjecati, no u tlu je teže procijeniti mjesta većeg upijanja vode. Kao takvo, ključno je razumjeti ulaz i izlaz sustava koji omogućuje transportne procese temeljene na vodi u ruralnom okruženju. Unaprijed i promatranje prirodnih pojava unutar našeg hidrološkog ciklusa pomoći će nam u otkrivanju rutina ponašanja iz kojih možemo izdvojiti faktore odvratanja za rješavanje naših problema. Naracija o kojem ćemo govoriti kroz ovaj rad, bavi se laminarnim strujanjem vode i sagledavanjem načina njenog kretanja među površinskim i dijelom podzemnim prostorima, radi istraživanja gubitaka vode. Digitalizacija je olakšala procjenu situacije kretanja vode simulacijom sustava i sila koje su doprinijele teškom stanju promatranja, tako da se može pronaći odgovarajuće rješenje. [2,3,4,6]. Održivost je opći postulat u mnogim područjima rada, pa tako i upravljanje vodama, smatra obaveznim pridržavanje svih potrebnih pravila i propisa, koji vode do produktivne prakse upravljanja (procijeniti sve parametre, jer performanse pod kojima sustav radi relativni su kroz vrijeme). Količina vode koja izbjegne svoj položaj u našem prirodno ili umjetno odvojenom okolišu, negativno utječe na ekonomsku sferu i ravnotežu vode (zakon ravnoteže vode) [9,32]. Jedna od naj zabrinjavajućih tema, koja drži interes znanstvene zajednice, je kako smanjiti nestašicu vode u današnje vrijeme, gdje se odgovornost stavlja na praćenje (tako da imamo dovoljno za pokrivanje svih područja potrošnje). Inženjerska je odgovornost otkriti i obnoviti sva područja koja bi mogla imati dugoročne posljedice na održivost i financije. U tom smislu, moramo prikupiti znanja o stalnom istjecanju vode i ponašanju koje se pokazuje u nekontroliranom vodenom okruženju. Ideja o tome koliko se volumena vode gubi kao produkt isparavanja, otjecanja, dubokog procjeđivanja, procjeđivanja i istjecanja zbog neučinkovitosti u izgradnji ili propusnosti terena itd., ovisi uglavnom o točnosti mjerne opreme i kvaliteti podataka s kojima radimo. Po toj izjavi, u interesu je cijelog svijeta pronaći nove metode detekcije (koje ne utječu na okoliš), točaka odvodnje, kako bismo mogli razvijati svoje znanje i optimizirati naš pristup. Možemo zaključiti mnogo različitih scenarija koji mogu izbjeći iscrpljivanje vode i na toj osnovi možemo raditi ekvivalentan eksperimentalni rad u

kombinaciji s numeričkim modeliranjem. [9,14,16,17,]. Općenito, radimo s malim brzinama koje se javljaju u prostornom okruženju koje ćemo promatrati kroz ovaj rad. Praćenje čestica i slikanje bit će potrebni u eksperimentalnim postupcima, kako bismo mogli izdvojiti odgovarajuće podatke za daljnju statističku obradu. Ispravno istraživanje korištenjem tehnika otkrivanja curenja temelji se na poznavanju kopnene distribucije protoka i hidroloških procesa. Točnije moramo imati uvid u površinske brzine protoka i protoke kako bismo mogli formirati odgovarajuće hidrodinamičke modele i matematičke jednadžbe koje prikazuju prostornu neuniformnost vodotoka [1,7,24,61]. Tehnike praćenja protoka igraju sastavnu ulogu u otkrivanju i vizualizaciji brzina protoka i transportnih procesa; na primjer, korištenje umjetnih trasera za mjerenje volumena otjecanja. Traseri nam daju uvid u dinamiku i fazne promjene aktivnosti koje se događaju u prirodi (interakcije površinske vode i podzemne vode, paleo-hidrologija, kretanje vode u vrlo nisko propusnim sastavima stijena, kalibracija i validacija numeričkih modela protoka i transporta), metodom točke ubrizgavanja trasera u različitim vremenskim intervalima duž poplavljenе površine. Primjetna razlika leži među praksama praćenja koje ovise o vremenskoj i prostornoj varijabli, a to je koncentracija i volumen otjecanja razrijeđenog medija. U istraživanju gubitka vode na točki propusnosti, baviti ćemo se plitkim površinskim otjecanjem vode, uz koje ćemo koristiti niz različitih trasera, kao što su bojila, fluorescentni i termalni traseri [7,37,60,68]. Bilo da je riječ o isparavanju, upijanju ili procjeđivanju, svaki gubitak vode mora se paziti, kako ne bi utjecao na nabavljeni volumen i buduću upotrebu. Svi navedeni procesi mogu se promatrati u velikim ležištima, različitih po istisnu i veličini. Zbog fine prirode vode koja teče na dnu, moramo ponovno stvoriti ove scenarije kroz laboratorijske postupke. Za tu potrebu testirat ćemo markere u plitkim nadzemnim tokovima, pod različitim uvjetima koji predstavljaju stvarne mogućnosti. Kako bismo na kraju mogli usporediti rezultate svakog testa i odrediti relevantan raspored [7,14,18].

## 1.2. Ciljevi

Ovaj rad je usmjeren na proučavanje plitkog nadzemnog toka vode, točnije njegovog kretanja prema točki propusnosti. Za tu potrebu postavljen je kvadratni zemljani žlijeb s instaliranom eksperimentalnom opremom za implementaciju i proučavanje metodologije praćenja toka vode. Eksperiment će se održati u Odjelu za Građevinarstvo, Znanost i Tehnologiju, Sveučilišta u Coimbri (DEC/FTUC). U eksperimentalnom postupku koristila se varijanta od 3 različita trasera, pod određenim hidrauličkim i geološkim uvjetima, kako bi se analiziralo vrijeme putovanja tipičnog trasera, prema točki propusnosti lociranoj na površini ispitivanja. Ciljevi obuhvaćaju:

- (i) prikupljanje informacija iz prethodnih studija koje se odnose na temu procjene
- (ii) ispitivanje kvalitativne značajke kretanja vodećeg ruba toka vode putem snimki u stvarnom vremenu, kao i kvantitativno analiziranje karakteristika plitkog površinskog toka vode

- (iii) isprobati najprikladnije tehnike praćenja toka vode za detektiranje točke propusnosti promjenom parametara (brzina istjecanja, vrsta trasera, materijal za drenažnu šupljinu, pomak točke propusnosti) pod kojima se provodi pojedini eksperiment
- (iv) Usporedba rezultata prikazanih u statističkom i grafičkom obliku, a zatim podcrtati najoptimalniji pristup.

### **1.3. Struktura diplomskog rada**

Ovaj diplomski rad je podijeljen u 5 poglavlja.

1. Poglavlje 1 - ovaj segment opisuje osnovu našeg rada kroz uvodni pregled, kao i ideju, motivaciju i ciljeve koji će se istražiti.
2. Poglavlje 2 - ovaj segment obuhvaća bibliografski pregled krajolika koji pokazuje gubitak vode, utjecaje takva vrsta problema i tehnike za otkrivanje kretanja vode.
3. Poglavlje 3 - ovaj segment uključuje metodologiju i laboratorijske postavke, za eksperimentalni postupak.
4. Poglavlje 4 - ovaj segment se sastoji od analize dobivenih rezultata, te izrade grafikona, dijagrama i tablice.za opis kvantitativnih aspekata
5. Poglavlje 5 - ovaj segment daje zaključke oko analiziranih rezultata i daje prijedloge za poboljšanja.
6. Poglavlje 6 - Pregled literature

## 2. BIBLIOGRAFSKI OSVRT

Ovo poglavlje daje uvid u pozadinu važnosti očuvanja vode, karakteristike koje stoje iza laminarnog kretanja vode i tehnike za detektiranje gubitka vode u prirodnim i umjetnim akumulacijama vode. Važno je proučiti različite poglede razumijevanja gubitka vode za stjecanje pouzdane podloge za izvedbu eksperimentalnih postupaka i analizu problema gubitka vode

### 2.1. Održivo upravljanje vodama

Voda kao osnova svakodnevnog života ima ulogu kroz mnogo različitih načina, kao što su egzistencijalne i higijenske potrebe u svakodnevnom životu i industrijskom razvoju, proizvodnji hidroenergije, plovidbi i očuvanju ekosustava. U tom smislu, važno je razlikovati da se sva vodna tijela mogu konceptualizirati i istraživati kroz studije u 3 glavna polja: hidrologija, fizikalna kemija i biologija. Kako ljudska populacija raste, potražnja za većim količinama slatke vode i pravilno upravljanje vodom postaje prioritet. Ukidanje politike 'iskoristi i odbaci' zamjenjuje se s normom održivog upravljanja resursima. Što se tiče prethodne tvrdnje, znanstvenici se danas moraju suočiti s gorućim problemom nestašice hrane zbog porasta stanovništva, kao i utjecaja klimatskih promjena. U tom smislu voda za navodnjavanje postaje osnova za korištenje prave količine vode u pravo vrijeme i na pravom mjestu, što je bitno za ekosustav i ekologiju. Mnogo je fondova uloženo u promicanje očuvanja vode u agrikulturnom navodnjavanju, znajući da to ima veliku političku težinu jer rezultati programa očuvanja vode često ne daju dovoljne rezultate. U domeni poljoprivrede, sustavi za navodnjavanje osiguravaju mehanizam površinskog prijenosa s fokusom na maksimiziranje profita farme ili produktivnosti vode, te minimiziranje nakupljanja vode, iscrpljivanja podzemne vode ili transpiracije [10,11,12,16]. Terminologija se mijenja u slučaju rezervoara s sadašnjim velikim skladištenjem vode koja se koristi za mnoštvo svrha poput skladištenja vode za piće i navodnjavanja, rekreacije, zaštite od poplava, navigacije i proizvodnje hidroenergije. Za te potrebe važno je upravljati zahtjevima i interesima, na način da uzmemo negativne i pozitivne aspekte zamišljene na lokalnoj, regionalnoj i globalnoj razini i pretpostaviti ih kroz okvir upravljanja, tako da lako možemo ublažiti negativne utjecaje i učiniti zahtjeve pristupačnijim pomoću sistematizacije. Ova perspektiva objašnjava se konceptom 'Održivog razvoja' koji je na vladajućem odboru za raspravu već više od desetljeća. Definiran je kao "razvoj koji zadovoljava potrebe sadašnjosti bez ugrožavanja sposobnosti budućih generacija da zadovolje vlastite potrebe" (od strane Svjetske komisije za okoliš i razvoj). Za razvojne projekte temeljene na vodi, koncept održivog razvoja uključuje odlučnost i planiranje zahtjeva za vodom kroz projektnu regiju, racionalno korištenje vode, sudjelovanje dionika, pravedan razvoj za ljudski razvoj, postizanje okolišne i socijalne zaštite razumnim gospodarskim rastom, sveobuhvatno promatranje i procjena, učinkovit nadzor i pružanje potrebnih uvjeta za zaštitu struktura povezanih s vodom.

Održivi razvoj osigurava stabilno poboljšanje stanja u kojem se upravljanje vodom provodi olakšavanjem mnogih potreba koje je potrebno postići za pravilno funkcioniranje hidrološkog sustava. U održivosti leži ravnoteža triju glavnih cjelina: ekonomska, socijalna i okolišna kojom su svi akti u promatranom hidrološkom sustavu olakšani [9,15,18]. Da bismo imali bolje shvaćanje održivog upravljanja vodom i njegovih praksa, moramo uračunati sve povezane utjecaje koji su predstavljeni na globalnoj razini. Jedna stvar koju treba prepoznati jest da će bilo koja promjena izvršena vodenom ciklusu ostaviti velike i složene učinke na ekološki i ekonomski sustav jer su prirodni ekosustavi prihvatili fenomene i promjene koji oblikuju tu domenu. Potreban je holistički pristup u upravljanju resursima zbog negativnih implikacija koje proizlaze iz njegovog korištenja, poput tehničke, pravne i okolišne domene do društvenih

vrijednosti, normi i navika. Također, mnoge se zemlje bore s nedovoljnim količinama vode potrebnim za zadovoljavanje njihovih urbanih, okolišnih i poljoprivrednih potreba. Neproduktivna upotreba vode, uključujući isparavanje, otjecanje, rast korova i duboku propusnost, glavni su počinitelji smanjenja proračuna kada se govori o opskrbi vodom. Što se tiče tih posljedica, inženjeri i operatori moraju biti svjesni prostornih i tehničkih problema, koje se mogu pojaviti s vremenom, tako da se naš projekt može pridržavati cjelokupnog održivog okvira. Izazov prakse održivosti postaje izrastanje iz starih navika koje ostavljaju štetnu oznaku na očuvanju vode, strukturnoj trajnosti, učinkovitosti navodnjavanja i ekološkom usklađenosti. Postotak gubitka prikuplja se kroz različite kontekste, počevši od učinaka prirodnih procesa na neadekvatno održavanje strukturnih akumulacija. Na primjer, deklinacija kvalitete vode u određenom održavanom području ne utječe samo na ekonomski supstrat, već i na okolišnu ravnotežu vodenog života u blizini. Društveni parametri su obično presudni u oblikovanju političke sfere oko zaključaka i implementacija uključenih u faze razvoja i liječenja. Društveni utjecaji rezervoara segmentirani su, na temelju procesa koji se događaju unutar i oko njih, povezanih s korištenjem zemljišta, društvenim tkivom i upravljanjem. Tehničke mane u slučaju neadekvatnih zahtjeva za pražnjenje i prolaznih mehanizama mogu ostaviti negativan ekološki utjecaj. Utjecaji na poljoprivrednu domenu mogu se vidjeti kroz rastuću oskudicu vode koja utječe na industrijsku i ekonomičnu životnu liniju, a s obzirom na to, treba ga rehabilitirati. Jednaka raspodjela vode u poljoprivrednim praksama, s naglaskom na zadržavanje potrebnog volumena, dovest će do smanjenja neto gubitaka i menadžmenta razvoja. [4,17,32]

### **2.1.1. Umjetna i prirodna vodena tijela**

Određene tvorevine tijekom ljudske povijesti revolucionirale su domenu znanosti, tehnologije i matematike, ali najznačajniji izum u povijesti građevinarstva je prvi zid ikada izgrađen. Služili su za razne svrhe, od potpore, zatvaranja i skloništa, ali uglavnom za odvajanje i očuvanje. Također, služe kao vitalni aspekt koji definira prakse zadržavanja vode i omogućuje održivo funkcioniranje struktura ovisnih o vodi. Osim građevina koje je stvorio čovjek, postoje primjeri u prirodi koji su zbog topografskog položaja i geološke formacije rezultirali tome da određena područja zahvate količine vode i zadrže ih. Poljoprivredni radnici oslanjali su se na korištenje otvorenih prostora kao pomoć u upravljanju usjevima, pa su pomoću iskopavanja i dilatacijama stvorili rute kanala za distribuciju vode. Ideje kao što su pravokutne prizme razvile su se iz praksi zadržavanja vode, kao i većeg standarda razvoja u strukturama brana za regulaciju protoka vode. S tehnološke perspektive, sve te operacije rade na održavanju kapaciteta vode u bazenu na izvornoj razini, na različite načine. [11,18,64]

### **Prirodne vodene površine**

Slivna područja predstavljaju trajni ili sezonski prirodni prikaz poplavljenog područja, koji uključuje obalne nizine, topografske udubljenja, široki ravnice na među-riječnim tokovima, bazu nagiba i topografske vrhunce s malim nagibom. Svi ovi pejzaži dozvoljavaju dobro promatranje površinskih tokova vode, zbog činjenice da lokacija utječe na geološke karakteristike poput: nagiba, debljine i propusnosti tla; kao i sastav tla, stratografije i hidrauličkih svojstva podzemnih slojeva. Vodeni tokovi, podzemne vode, tlo i jezera predstavljaju učestale zapremnine vode, a njihove se razine mogu brzo izmijeniti u reakciji na ljudske i prirodne varijable. Iz tog razloga, pristupačnost vodnih resursa predstavlja važnu stavku, uglavnom u shemama opskrbe vodom i navodnjavanja. Čimbenici koji utječu na dostupnost vode: su (i) zahtjev; (ii) klimatsko modeliranje; i (iii) kvaliteta. [1,9,22]

### ***Jarci i ribnjaci***

Jarci i ribnjaci(bare) predstavljaju prirodne depresije, nastale kao produkt ljudske aktivnosti s ciljem zadržavanja vode. Voda prikupljena u tim sabirnicama obično se donosi putem otjecanja pokrenutog olujnom kišom i prekomjernom zasićenosti gornjeg sloja tla zbog porasta razine podzemne vode. Oba elementa prirodnog skladištenja vode mogu se koristiti u praksi preusmjeravanja vode kada je potrebno imati fiksnu jedinicu za zadržavanje vode, kako bi se mogao regulirati vršni dotok vode tijekom poplavnih događaja, što može ometati riječni sustav. Ribnjaci mogu varirati ovisno o njihovoj veličini i nisu uvijek prikladni za skladištenje vode, ali se još uvijek smatraju hidrološkim modifikacijama. Njihova upotreba određena je njihovom veličinom i položajem za održavanje ili upravljanje, a obično su jedinice za pohranjivanje utemeljene na privremenom zadržavanju. [9,16] Jarci realiziraju ulogu odvodnje u procesu prikupljanja bilo kojeg viška ostvarenog otjecanjem vode, putem minimiziranja turbulencije i difuznih mrtvih područja. Jarci u kombinaciji sa pritvorskim bazenima mogu se koristiti za poboljšanje sustava na cesti ili urbanim sakupljanjima. Prilikom projektiranja urbanog sustava, kroz aproksimaciju područja odvodnje možemo odrediti trajektorije otjecanja. A za tu svrhu se koriste jarci i pritvorski bazeni koji održavaju vršni ispušt unutar unaprijed određenih uvjeta. Na razini sliva, bazeni mogu pridonijeti povećanju brzine protoka vode, pri čemu štetne sile izazvane djelovanjem erozije povećavaju svoju prisutnost u mreži nizvodno. [5,9,14]

### ***Poplavna ravnica***

Poplavne ravnice su najduži dio slivnih područja koje se uobičajeno pronalaze u priobalnim scenarijima, koji se sastoje od glavnog kanala tokova i rijeka koji su okruženi geološki formiranim ravnica. Očuvanje takvih ekosustava u zdravoj i čistoj materiji obuhvaća važnost prirodnog sustava, zbog ovisnosti svih elemenata u sustavu. Kao što već znamo slivna područja se općenito uzdržavaju pomoću perioda oborina, izvorima ili dotokom poplavnog područja. Poplavne ravnice čine ključnu ulogu u održavanju stabilnosti toka postizanjem protoka niske brzine i doprinosom zaliha sedimenata za zemlju oko potoka. Koncept odvodnje u ranim danima sastojao se od poplavnih ravnica, tokova i prirodnih kanala, koji su se oslanjali na površinsko otjecanje. Nerazvijeno slivno područje pruža savršenu pozadinu za stvaranje prirodnih tokova nastalih aktivnostima otjecanja tijekom geološkog vremena. Ovaj fluvijalni krajolik pruža mnoštvo upotrebe i ima neposredni ulogu u hidrološkom ciklusu. U slučaju perioda znatnih oborina i posljedičnog otjecanja, stvaraju se urezi na površini prirodnog terena, ovo nije slučaj kada postoji ravnomjerna raspodjela sedimenata na cijelom području tijekom kiše. Povećanje nepropusne površine je prevladavajući faktor koji utječe na karakteristike hidrološkog odgovora dijela sliva, uzrokujući eroziju i snižavajući standard vodnog zdravlja. [1,5,22]

### ***Jezero***

Jezero je dio prirodnog sustava, obično karakterizirano kao bazen, čija razina vode ovisi o režimu prirodnog dotoka. Konvencionalni izvori slatke vode mogu se naći u jezerima, kao prirodni rezervoari za skladištenje vode, gdje ljudski i okolišni čimbenici doprinose promjeni razine vode. Ovisno o svojoj veličini, oni mogu služiti kao dio toka ili biti upravljani njime uvjetovani: veličinom, lokacijom i položajem u odnosu na protočnu mrežu. Jezera imaju nedvojbenu ekološku važnost, zbog čega moramo eliminirati prijetnje poput eutrofikacije i gušenja algama da ih sačuvamo u održivom smislu. U odnosu na prirodne tokove, ova slivna mjesta doživljavaju male brzine, značajnu temperaturnu stratifikaciju prema dnu, ciklusi



izmjene režima i alternacija u pogledu godišnjih doba, vjetrova i drugih sila. Skladištenje vode kod ovih jedinica donosi ekološke posljedice na prirodnim tokovima i izmjenu protoka vode kroz tjesnace uzrokovano promjenom protoka vode, kvalitete vode i promjene u staništu. Prakse navodnjavanja tijekom godina uglavnom su iscrpile resurse koje ove prirodne akumulacije mogu ponuditi. U kombinaciji s godišnjim gubicima jezera mogu predstaviti problem na regionalnoj razini ako se ne održava ravnoteža dotoka i odljeva [1,9,23,14].

### ***Polja za navodnjavanje***

Procesi navodnjavanja ovise o zahvatu vode iz rezervoara ili podzemnog bunara i razdjeljivanjem je na određenom području zemljišta. Iza djelovanja poplave stoji mehanizam tijekom kojeg operater kontrolira odljev vode. Voda se kreće, obično usmjerena s veće visine u odnosu na polje, a nakon ostvarivanja navodnjavanja, volumen vode se smanjuje tijekom nadolazećih dana, zbog sušenja i infiltracije. Što se tiče tehnika navodnjavanja, sljedeće dvije su neovisne širom svijeta. Bassinovo navodnjavanje kao jednostavan oblik površinskog navodnjavanja koje se sastoji od navodnjavanja područja izgrađenog od niza bazena u formaciji mreže, u kojima se voda akumulira i polako infiltrira tlo. Glavni kanal za navodnjavanje smješten je u jednom smjeru i zajedno s trajnim ili sezonskim mejama sa svake strane, oni ocrtavaju svako potopljeno područje pojedinog bazena. Oblik i veličina bazena određuju se nagibom zemljišta, vrstom tla, dostupnim tokom, potrebnom dubinom navodnjavanja i poljoprivrednim praksama. Bazeni mogu biti okrugli, kvadratni i poravnati preko konture, s konstantnim nultom radijanom. Jedna od karakteristika ove vrste sustava za navodnjavanje je ta što stvara veliku ujednačenost na cijelom području jer smanjuje otjecanje. U slučaju 'zatvorenog bazena' voda se odvodi u pojedinačni bazen, te se ostavlja da se cijeli volumen infiltrira. Suprotno tome, „uzastopni bazeni“ navodnjavaju se odvojeno opskrbnim kanalom, koji pušta vodu u susjedne bazene i regulira se uzdizanjem razine vode [8,11,12,16]. Navodnjavanje u razini meja je vrsta površinskog navodnjavanja koja uključuje poplavu niza uskih kanala, pri čemu ima ulogu istodobnog transporta i infiltriranja vode u zemlju. Uobičajena visina meja je između 20-30 cm, a voda koja prolazi kroz kanal ne prelazi dvije trećine njegove dubine. Ovisno o tlu i podešavanju nagiba, možemo imati duge ili kratke meje, a na čelu kanala imamo glavnu cijev za ispuštanje vode. Jedna od karakteristika ove vrste navodnjavanja je da dobivamo 'nizvodno' neujednačenost (koja je svojstvena) i 'među-kanalnu' neujednačenost što je posljedica sposobnosti infiltracije tla. Upravljanje mejama igra veliku ulogu u učinkovitosti njegove uporabe, kao i gustoće tla, gdje su vrlo glinena i pjeskovita tla poželjna. [16,49]

### **Umjetne strukture**

Hidrauličke strukture uvelike su pridonijele disciplinama transporta i skladištenja vode, tako da se navedena tema koja se daljnje primjenjuje u prirodnom sustavu. Bilo da ispražnjavamo postojeće vodno tijelo, zaustavljamo protok vodotoka nasipima ili skupljamo kišnicu, potrebno je prikupiti podatke o promatranom području. To uključuje fizičke podatke kroz topografske prikaze i geološka ispitivanja, hidrološke podatke izvučene iz skupnih izvora, kao i fotografske zapise koji određuju uvjete za inženjerske radove. Opskrba industrijskom vodom, zaštita od poplava i projektiranje akumulacija predstavljaju intervencije u prirodnom sustavu koje proizlaze iz potrebe za raspodjelom vodnih resursa radi održavanja kvalitete i količine. Treba postojati jasna razlika između vrste strukture koju koristimo u projektnom području. Također radimo s privremenim strukturama koje zahtijevaju jeftin rad i materijal za npr. modifikacije ili trajne strukture koje zahtijevaju čvrste materijale za disipaciju energije i izdržljivost. [1,14,19]

## ***Akumulacije***

Akumulacije imaju temeljnu ulogu u našem društvu ostvarenu skladištenje vode, zaštitom od poplava, uspostavljanjem vodnoga okoliša i pretvorbu svojstava vode. Za ove pothvate se može stvoriti zid preko doline ili vodotoka, ili se kroz iskopavanje stvori udubina u zemlji, a najbolje je opisano kroz 3 parametra: (i) volumen (ii) poplavljeno područje (iii) širenje oscilacija vode. Kroz procese pridržavanja uzvodnog toka, opskrbe iz vanjskog izvora i prikupljanja otjecanja ili kišnice dobivamo jedinice za skladištenje vode. Korištenje vode koju ove građevine daju je svestrano, kao za navodnjavanje, kućanstvo i hidro-energetske svrhe, tako da se bilo kakve štete koje mogu uzrokovati smanjenje razine vode moraju odmah sanirati [13,18,19]. Umjetne akumulacije su neovisne o prirodi u smislu da mogu promijeniti tok vodotoka ili sačuvati vodu za produktivnu upotrebu, kontrolirajući prirodni režim vodotoka. Priroda i akumulacije su u su-ovisnom odnosu koji se prepoznaje u kvalitativnim i kvantitativnim aspektima vode, na primjer, kako akumulacijska voda može utjecati na kvalitetu vode nizvodno od brane i kako ljudske aktivnosti utječu na različita svojstva vode u akumulaciji. Izgradnja brana ili akumulacije ostavlja negativne posljedice u slivu, kao što su promjena protoka i režima nanosa te povećanje hranjivih tvari koje sadrže štetne kemikalije. Ako postoji samo jedna akumulacija u sustavu 'akumulacija i potrošač' onda je ona samostalna cjelina, ali može biti i dio sustava akumulacija koje imaju međusobnu kooperativnu funkciju. Hidrauličke konstrukcije razlikuju se po svom ulazu, cjevovodu i izlazu, kao i zidnim ili čeličnim formacijama koje okružuju spremište, tako da prema tome možemo imati različite strukturne tipove akumulacija, poput obalnih akumulacija, akumulacija za zadržavanje ili servisnih akumulacija. Postoji niz namjena akumulacije među kojima se najviše primjenjuju sljedeće:

- 1) aktivna akumulacija koja pomaže u prevladavanju ovisnosti o prirodnim izvorima tijekom suša.
- 2) akumulacije za kontrolu poplava koje funkcioniraju putem potpunog pražnjenja sa obale ili povećanja prihvatljivog volumena za zadržavanje viška vode
- 3) akumulacije koje se postavljaju na vodotocima, obično služe za zadovoljenje potreba za vodoopskrbom i zaštitu od poplava
- 4) konzervativne akumulacije namijenjene su za crpljenje vode za navodnjavanje, industrijske, poljoprivredne i kućanske potrebe, kao i za proizvodnju električne energije i održavanje. [9,11,15,19]

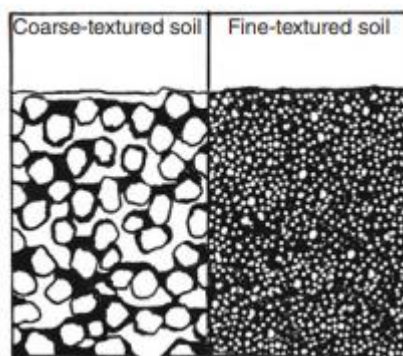
## ***Vodeni rezervoari(spremnici)***

Spremnici za vodu su skladišni objekti koji služe za kratkotrajno ispuštanje prekomjerne količine vode koja se crpi iz prirodnih izvora. Mogu biti smješteni u zemlji, na uzvisini ili na površini, s ugrađenim pumpnim sustavom, a uglavnom se koriste za navodnjavanje i kućanske poslove. Ovisno o prirodi njihove primjene, različiti materijali se mogu koristiti za izradu ovih spremnika. Ovim se jedinicama mora svakodnevno regulirati snaga otpuštanja jer imaju periodički ponavljajući ciklus koji traje jedan dan. Parametri vodospremnika, kao što je skladišni prostor, određuju se na temelju potražnje stanovništva i prinosa iz vodnih resursa [16,19]. Među različitim praksama, spremnici za skladištenje vode su vitalni za skupljanje kišnice u svrhu navodnjavanja. Oni su vrlo skupa investicija, ali imaju veliku korist s ekološke točke gledišta, zbog velikog niza utjecaja na energiju i životni ciklus. Voda koja će se skupljati ovisi o veličini spremnika, na koju utječu kapacitet kiše i dnevna zadovoljavanje potreba kućanstva, tako da je potrebno odrediti maksimalno povećanje. Svako povremeno kontrolirano ispuštanje vode stvara prostor za nadolazeće olujno nevrijeme koje će popuniti kapacitet spremnika, pa se u tom smislu preporuča odabrati optimalnu veličinu spremnika kroz ekonomske i ekološke koristi. Materijali korišteni za spremnik igraju ulogu u kvaliteti vode,

gdje cement dobro služi za neutralizaciju kiselosti, ali uglavnom korišteni materijali su polietilen i staklo-plastika. [17,19,70]

### Kapacitet zadržavanja vode

Postojeća zabrinutost koja okružuje većinu poljoprivrednih projekata je 'kako se nositi s fizičkom i biološkom degradacijom tla tijekom promjenjivih klimatskih razdoblja'. Budući da se tijekom većine konvencionalnih poljoprivrednih aktivnosti tlo ne obnavlja, pa njegovo zdravlje degradira tijekom tekućih razdoblja ostvarenja usjeva. Velik broj tala je heterogen i anizotropan, te djeluju kao dinamičko skladište vode, pomoću kontinuiranog unosa kišnice i vode za navodnjavanje, kako bi se mogla koristiti za rast biljaka. Nadalje, postoje dva parametra koja bi mogla ostaviti negativan utjecaj na vertikalno i lateralno ujednačeno raširene parametre tla (čak i u dobro definiranim slojevima tla), a to su: količina pora u odnosu na čvrste čestice i hidraulička vodljivost. Unatoč tome, navedeni parametri će se smanjivati s dubinom od površine tla, zbog prirodnog učinka konsolidacije, što dovodi do smanjenja propusnosti. Sadržaj vode u tlu definiran je kao volumen vode sadržan u volumenu vode u bilo kojem trenutku, a nasuprot tome, maksimalna količina vode koja može biti sadržana poznata je kao kapacitet zadržavanja vode. [16] Postoje različiti načini za mjerenje kapaciteta tla za vodu, bilo pomoću senzora vlage u tlu, sonde za reflektometriju u vremenskoj domeni ili, ako nam nedostaje opreme, putem gravitacijske metode. SWC indeks prikazan je kao odnos mokrog prema suhom sadržaju.



Slika 2.1 Zadržavanje vode u krupnim i sitno-zrnatim tlima (adaptirano iz [16])

$$SWC(\%wt) = \frac{(\text{težina vlažnog uzorka} - \text{težina suhog uzorka})}{(\text{težina suhog uzorka} - \text{težina posude})} \times 100\%$$

Stvarna vrijednost kapaciteta zadržavanja vode se definira kao sposobnost tla da sačuva vodu u svojim porama tijekom prirodne odvodnje pokrenute gravitacijom. Naravno, tlo ima ograničenje na koliko vode može apsorbirati, a to je iznad kapaciteta zadržavanja vode, što uglavnom karakterizira teksturom tla i sadržajem organske tvari. Veličina, struktura i širenje čestica tla se održava izravno preko količine i veličine pora koje mogu akumulirati vodu, tako da će referentno glineno tlo imati veći volumen manjih pora od volumena velikih pora u pješčanim tlima. Prema tome jasno je zaključiti da će veće pore imati povećanu odvodnju vode pod utjecajem gravitacije, što smanjuje njihov kapacitet zadržavanja vode. Čestice organskih tvari povećavaju sposobnost zadržavanja vode zbog svog afiniteta prema vodi i različitih oblika i veličina prema kojima se prilagođavaju. Za razliku od tog zbivanja, negativno utječe na sposobnost zadržavanja vode, jer međusobno približava čestice. Poboljšanje sposobnosti zadržavanja vode u tlu je posebno potrebno u slučajevima kada doživljavamo manjak vlažnosti

tla, što tada može doprinijeti otpornosti tla kroz sušne periode i smanjiti gubitak vode prouzročen dubokim procjeđivanjem i evaporacijom. Krajnji rezultat koristan je za prirast usjeva s zdravijim i robusnijim biljkama i sveobuhvatnim skladištenjem zelene vode. Dakle, povećanja kapaciteta zadržavanja tla, mogu se postići miješanjem finih čestica tla s organskom tvari koja skuplja čestice zajedno pružajući dovoljno prostora za pore i opuštanje zbijanja, posebno oko površinske razine. [16,71]

### **Hidrauličko vrijeme zadržavanja unutar velikih zapremnih površina**

Promatrajući glomazni vodeni sustav, hidrauličko vrijeme zadržavanja važan je parametar kojim možemo slijediti različite procese koji pridonose smanjenju kvalitete i količine volumena vode, na primjer, procesi eutrofikacije, toplinska stratifikacija, izotopski sastav, itd. Napravljene su brojne eksperimentalne studije o mjerenju prijenosa i zadržavanja skalarnih količina ili vode unutar recipijenata tekućine. S obzirom na to da su veličina jezera, izvor vode i sliv ključni segmenti koji definiraju vrijeme zadržavanja, može se predložiti da je to dobar alat za definiranje strukture i vanjskih utjecaja na promatrani sustav. Brane, mala drenažna jezera i jezera s velikim količinama dotoka podzemne vode i ispusti vodotokova, doživljavaju nagle izmjene tokove izazvane turbulencijom, koji doprinose kraćem vremenu zadržavanja tvari, suprotno vrijedi i za procjedna jezera bez površinskih ispusta. Za velika procjedna jezera za propadanje prosječno vrijeme zadržavanja traje mnogo godina, a u slučaju malih brana oko nekoliko dana [1,28]. Akumulacije za kontrolu poplave daju dobar uvid u fluktuaciju vremena zadržavanja volumena vode. Takve brane ostavljaju dodatan prostor, koji je unaprijed određen ili ispražnjen, za prihvatanje vode tijekom poplavnog događaja. I tako se efekt kontrole poplave mora pravilno predvidjeti tako da ne završimo s velikim kapacitetom za skladištenje ili prekomjernim ispuštom vode za nizvodni dio vodotoka. Dobar način za ublažavanje ovih dotoka vode je oslobađanje vode prema standardnoj krivulji koja predviđa da se volumen skladištenja drži na razumnoj razini prolijevanjem, tijekom određenog razdoblja godine ili kratkoročnim prognozama pražnjenja. [19]

Ova jednadžba ukazuje na mehanizam za povećanje i unos u rezervoaru:

$$P - O = R \rightarrow \text{dotok} - \text{odljev} = \text{zadržavanje}$$

$P > O$ ,  $R$  je pozitivan, a razina vode raste

$P < O$ ,  $R$  je negativan, a razina vode se smanjuje

### **2.1.2. Kontrola gubitka vode**

Iako možemo primijetiti različite vrste gubitka vode u prirodnoj ili izgrađenoj okolini, usredotočit ćemo našu pažnju na scenarije gubljenja vode koji su najučestaliji u statičkim vodenim tijelima. Nadalje, moramo proučiti hidrološki ciklus kako bismo stekli znanje o prevenciji gubitka vode, tako da možemo stvoriti eksperimentalni model koji će nam pomoći u rješavanju našeg problema. Hidraulički sustavi kao i prirodni vodeni sustavi uvijek su bili izloženi nekom obliku gubitka vode. Voda koja se koristi u domaće svrhe, doživljava svakodnevne gubitke u mreži, zbog nepravilnog upravljanja ili nepredviđenih okolnosti. Od dana Rimskog carstva, ovaj je problem bio prisutan u vodoopskrbnim sustavima ali zanemaren je zbog postojećih količina i bez posljedica proračuna. Danas nadležna tijela i IWO pozivaju na obveznu primjenu vodenih revizija i aktivnosti kako bi se suprotstavili problemu gubitka vode, te da bi se održala razina ekonomskog olakšanja [2,4]

## **Gubitci i dobitci vode u hidrološkom ciklusu**

Ako istražujemo globalni hidrološki ciklus, dobivamo uvid u različite procese transformacije vode, to nam može pomoći da bolje razumijemo kretanje vode u različitim agregatnim stanjima i definiramo obrasce ponašanja koji dovode do gubitka vode. Što se tiče toga, hidrološki sustav se može podijeliti u tri podsustava: atmosferski vodeni sustav, koji sadrži procese padalina, evaporacije, presretanja i transpiracije; sustav površinske vode koji sadrži procese nadzemnog toka, površinskog otjecanja, pod-površinske i podzemne vode, te otjecanje do vodotokova i oceana; i podzemni vodeni sustav koji sadrži procese infiltracije, punjenja podzemne vode, pod-površinskog protoka i protoka podzemne vode. [6,16]. Hidrološki ciklus predstavlja kontinuirano kretanje vode iznad i ispod Zemljine površine. Voda koja se održava na površinskoj razini troši se procesom evaporacije koja iscrpljuje vodu s otvorenih površina i transpiracije koja konzumira vodu koja se čuva u biljkama i lišćem. Akumulirana masa pare zatim se kreće prema atmosferi, gdje pod pravim uvjetima dolazi do stvaranja oborina. Voda koja padne na zemlju može se presresti čvrstim ili tekućim terenom, poput prijanjanja na vegetaciju, apsorpcijom u tijelima površinskih voda, postajući nadzemni tok preko površine zemlje, infiltrirajući se u zemlju i tokom kroz tlo. Velika količina presretane vode vraća se u atmosferu kroz već spomenute procese, a ostatak se dublje procjeđuje u slojeve tla. Ta se voda može provesti kroz kanale kao otjecanje i pojaviti u izvorima ili procjeđivati kroz pukotine i dilatacije u slivu i doći do prirodnog bazena ili mora. Također, još jedan značajan čimbenik koji utječe na infiltraciju, otjecanje i evapotranspiraciju je vegetacijski pokrov, budući da vrsta, gustoća i ujednačenost vegetacije, uvjetuju promjenu vlage tla na prostornoj i vremenskoj skali. [1,5,6]

## **Karakteristike 3 najznačajnija inicijatora gubitka vode**

Prostori za skladištenje vode na otvorenoj površini, kao što su akumulacije, jezera, polja za navodnjavanje itd. čine savršene kandidate kako bi objasnili temeljne procese koji uzrokuju gubitak vode

### ***Evaporacija***

Evaporacija je proces transformiranja vode iz čvrstog ili tekućeg stanja u vodenu paru, koja se kondenzira u atmosferi. Ovaj je proces je jedan od najupečatljivijih gubitaka vode koji je vidljiv na jezeru ili akumulaciji. Globalna evaporacija je glavni potrošač padalina zadržanih na ili u zemlji, te čini prosjek od 60-70%, a preostali postotak se pojavljuje kao otjecanje preko sliva do mora. Međutim, doživljava varijacije zbog efekta solarne energije, lokacije planina i približenosti oceanu. Sušne regije su najosjetljivije na isparavanje zbog povećane temperature i vlage. Ciklus otjecanja se može smanjiti uslijed evaporacije koja smanjuje brzinu unosa vode u sliv, što rezultira manjim količinama vode za otjecanje. Zbog svoje prirode brane su jedinice za skladištenje koje imaju dugoročne smetnje u vodenoj ravnoteži, zbog djelovanja evaporacije, što stoga zahtijeva planiranje vodenih resursa i studije vodoopskrbe. U slučaju površinskih jezera, gubitak vode je funkcija sunčevog zračenja, temperature vode i zraka, razlike u tlaku pare između vode i gornjeg zraka i brzine vjetra preko jezera. Evaporacija se obično mjeri tavom klase A napunjenom do 8 inča, s mjeračem kišnice, koji se može prilagoditi i promatrati svakodnevno. [1,5,6,14]

## *Infiltracija*

Proces vode koja ulazi u profil tla kroz površinu poznat je kao infiltracija, a dinamika tog pokreta ovisi o veličini i raspoređenosti pora u tla. To je svojstvo tla odgovorno za zadržavanje površinskog navodnjavanja, zbog kontrole nad količinom vode koja se apsorbira i nadzemnim protokom. Postoje različite razine infiltracije ovisno o: (i) Svojstvu tla (ii) Početnom sadržaj vlage tla (iii) Povijest vlaženja (iv) Propusnosti i njenih promjene uslijed kretanja površinske vode (v) Praksi stvaranja (vi) Vrsti usjeva koja će biti posijana (vii) klimatskim učincima. Na početku kiše infiltracija je pretežno visoka, ali s vremenom se ispravlja na prilično stabilno stanje infiltracije. Ovo stanje, koja se naziva i osnovna stopa infiltracije, definira propusnost tla. Tip teksture tla određuje vrijeme u kojem će voda proći prema dolje kao rezultat gravitacijskog povlačenja. Dakle, u slučaju tla nekoherentne teksture (pijesak i pješćana-ilovača smjesa), to je vrijeme manje, u usporedbi s tlima koherentne teksture (glinenim smjesama) koja imaju duže vrijeme boravka zbog male veličine pora. Međutim, tla na bazi gline manje su osjetljiva na gravitaciju, tako da je širenje kapljica vode izraženije bočno, što rezultira većim volumenom vlage tla. S obzirom na to, mješavina koherentnog i nekoherentnog tla rezultira najučinkovitijom infiltracijom vode. Pješćana tla imaju veliku sklonost za brtvljenje površine i sabijanje, jer brzo apsorbiraju vodu. Infiltracija se može mjeriti zabijanjem prstenastog infiltrometra u tlo, gdje se voda stavlja u prsten, a brzina infiltracije mjeri se padom razine vode tijekom vremena. Infiltracija je jedan od najtežih hidroloških parametara za izmjeriti, zbog naglih promjena u stanju tla i vode i zahtijeva precizno kontrolirano eksperimentalno okruženje. U slivovima, razlika između bruto kiše i izravnog otjecanja preuzetog iz hidrografa predstavlja infiltraciju. [1,6,14,16]

## *Curenje i procjeđivanje*

Hidrauličke strukture koje nose opterećenje vode uvijek će ostvariti kvarove, nakon određenog razdoblja, a veličina curenja ovisi o stanju infrastrukture i vrijednosti stalnog opterećenja. Curenja, rascjepi i preljevi odgovorni su za ogromnu štetu koja se može dogoditi bez odgovarajućeg održavanja, ili kao rezultat loše izvedbe. To je obično slučaj nedovoljno kompaktnih ili starijih dijelova brane, loših adhezivnih svojstava betonskih izlaznih cijevi ili drugih struktura, te labavih veza između strukture brane i temelja ili udubljenja. U nekim slučajevima, baze brana mogu biti izgrađene od jako oštećenih materijala ili imati kontinuirana sjecišta koja vežu porozne slojeve. Stare podzemne opeke ili zidarske akumulacije obično doživljavaju curenja kroz spojeve i obloge koji nisu pravilno sastavljeni. Curenje vode se najbolje otkriva noću kada smo izolirali sustav zatvaranjem ulaznog i izlaznog ventila, a zatim s vremenom provodimo test dubine mjerenjem pada razine vode. Zatim nastavljamo s izračunavanjem područja akumulacije; volumen po površini pomnožen sa negativnim pomakom, da bi izračunali volumen koji je izgubljen. Poteškoća proračuna ovisi o obliku strukture, jer doživljavamo promjenu volumena, ovisno o segmentu područja na koji razina vode pada. [3,19] Osim curenja, voda može pobjeći kroz dno akumulacije ili lošu oblogu na funkcionalnoj strukturi kroz proces cijedenja (prodiranja). Gubitke vode u tlu ispod akumulacije teško je kvantificirati, a obično se gubici infiltracije ili cijedenja smatraju zanemarivim i zanemareni su u studijama analize akumulacije. U početnom razdoblju korištenja akumulacije, gubici cijedenja su prilično opsežni, ali s vremenom se smanjuju, pa se zbog toga akumulacija ne bi trebala staviti na pretjerano propusne formacije. [1]

## Prevenzijske taktike za 3 glavna inicijatora gubitka vode

Prakse navodnjavanja koje su prožete u agronomiji, doživljavaju sveobuhvatne učinke gubitka vode kroz duboku procjeđivanje, evaporaciju i otjecanje. Rješenja se mogu pronaći kroz prakse upravljanja vodom, poput, povećanja kapaciteta zadržavanja vode, poboljšanja infiltracije, pokrova i zaštite tla. Ove metode također doprinose otpornosti tla na eroziju i drugim oblicima degradacije zemljišta. Jedan od glavnih zadataka koji opterećuju poljoprivrednike je očuvanje vode u razini tla prateći korijen biljke, bez poticanja kretanja prema dolje. Zbog toga je preferirano povećati kapacitet zadržavanja vode koji ovisi o:

- veličini čestica tla (sitne čestice poput gline povećavaju bočni volumen vlage, držeći vodu na mjestu pod silom gravitacije)
- sadržaj organskih tvari (koristi tlu pojačavanjem skupljanja čestica tla i čini prostor za pore za zadržavanje vode)
- Sabijenost (ovaj postupak smanjuje sposobnost zadržavanja tla, posebno u korijenskoj zoni, tako da je korisno imati rastresita nekompaktnih tla)

Postoje brojne prakse koje su aktualizirane za produljenje kapaciteta zadržavanja vode u tlu, a to uključuju obrezivanje pokrova, ugaranje, recikliranje sedimentata, agro-šumarstvo i očuvanje agrokulture [16,71]. Na razini sliva reduciranje evaporacije s površine tla, akumulacija za skladištenje i transportnih sustava povećat će produktivnost vode. Stoga moramo imati pouzdanu mrežu operatora sustava koji su spremni djelovati pri pronalaženju problema. To upoznaje program za optimizaciju gubitka vode, koji uključuje poboljšanje tehničkih i financijskih performansi vodenih sustava i učinkovito korištenje vodenih resursa iz prirode. Osnovna pretpostavka koja stoji iza uklanjanja gubitka vode iz akumulacija je:

- reduciranje dubokog procjeđivanja povećanjem kapaciteta zadržavanja vode tla
- reduciranje vode izgubljene isparavanjem
- onemogućavanje rasta korova (neproduktivna biljka) [16,22]

Dno akumulacije se s vremenom učvršćuje putem sedimentacije, što smanjuje propusnost tog sloja. U slučaju curenja u akumulaciji, ronilaca se šalje kako bi raširio fini pijesak preko zidova i baze, koji se uvuče u putanje gdje se odvija usisavanje tijekom curenja. U slučaju značajnog propuštanja vanjskog dijela rezervoara predviđeno je da bude obložen. Uzdužna komponenta ojačanja u betonskim oblogama varira od 0,1% do 0,4% i 0,1% do 0,2% za poprečnu komponentu. To sprječava ozbiljne pukotine u oblogama i povezuje susjedne dijelove obloge kako bi se osiguralo dodatna čvrstoća u slučaju oštećenja nastalih taloženjem više slojeva na tlo ili nekih drugih čimbenika. Jedan od važnijih čimbenika u strukturama brane je postizanje monolitnog kompozita blokova u poprečnom smjeru fugiranjem uzdužnih dilatacijskih zglobova. Otvori poprečnih zglobova između susjednih blokova čine mjesta za curenje, tako da kako bi se ovo spriječilo, brtve se postavljaju na zglobove neposredno uz uzvodno lice brane.[1,3,11]

## 2.2. Kretanje plitkih površinskih vodenih tokova

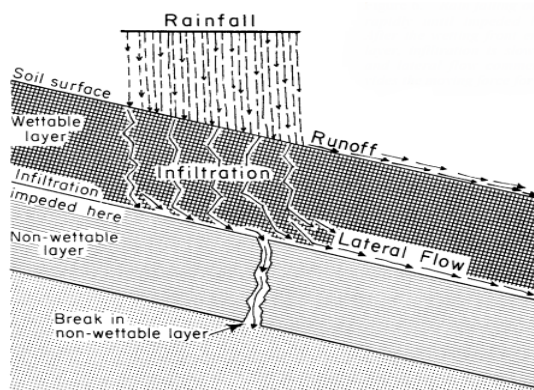
Kretanje vode na čvrstoj površini može se proizvesti na različite načine poput gravitacijskih sila, vanjskih utjecaja (vjetar, naslaga snijega itd.), te transport izazvan mehaničkim tlakom.

Kretanje rive (ruba vodenog plašta) u određenom smjeru ovisi o svojstvima vlaženja tla (hidrofilne i hidrofobne) kao i molekularnoj interakciji među istim i suprotnim nabijenim česticama. Voda koja održava svoj protok u određenom smjeru, bit će pod utjecajem adheziivnih sila, koje povezuju čestice vode i tla, koje imaju dobre hidrofilne kvalitete. A također i kohezivne sile među česticama vode koje povezuju čestice vode u svim smjerovima, iako je sloj površinske vode podložan neravnoteži zbog zraka koji je na drugoj strani. Prema tome

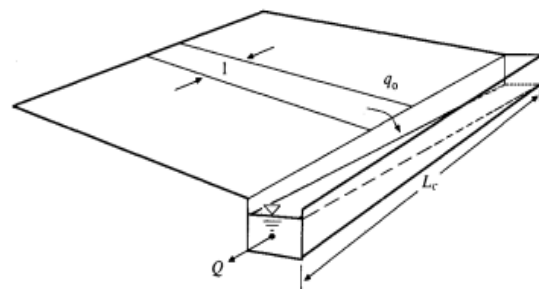
ovisno o energiji toka vode u određenom smjeru, imamo veliku količinu neuravnoteženih čestica vode iz površinskog sloja, uz to da, općenito sila koja uzrokuje klizanje slojeva je veća od sile koja ih pokušava držati na mjestu ili na površini napetost. Od tada, ovisno o vrsti tla, slojevi klizanja adsorbiraju se ili apsorbiraju na površinu pružajući bazu za čestice dolaznih vode.

### 2.2.1. Nadzemni tok vode

Čitav prirodni sliv pokreće se događajima unosa vode i mrežom za distribuciju vode. Među čime je površinsko otjecanje vodeća funkcija koja povezuje djelovanje ulaza vode (oborine, snijeg, odmrzavanje smrznutih tla i navodnjavanje) i izlaza vode (strujanja, infiltracija, međutokovi i protok). Nadzemni(površinski) protok stvara se mehanizmom bara na površinskom terenu i s vremenom (do određene dubine) postiže otpornost na otporne sile koje pokušavaju zadržati vodu na mjestu. U prirodnom okruženju stvara se kroz kišne događaje ili taline snijega, s ciljem hranjenja odvodnih sustava, vođenih njegovom visokom prostornom i vremenskom varijabilnošću. [1,5,6,54] Površinska voda se ne održava dugo na površini, kao rezultat gravitacijskih sila, akumulacije i površinske topografije, s neuniformnim trajektorijama pokreta, iako se na razini brda ispituje više organizirana ponašanja tih tokova. Uglavnom se nadzemni protok održava na maloj udaljenosti sve dok ne ugrozi mrežu mučnih kanala na površini sliva, koji su frakcijski mali dubinski, koji se povećava s napredovanjem i kasnije doprinosi raširenom protoku vodotoka u kanalu. U inženjerskoj i hidrološkoj sferi, otjecanje je dobar alat za predviđanje hidroloških reakcija na parcelama i mjestima usmjeravanja protoka. Protok vode preko površine sliva kompliciran je u prirodi, prostorno i vremenski. U tom okolišu površinski protok traje dva oblika: nadzemni protok koji pokriva široki prostor, kroz difuzno širenje plašta vode i koncentrirani protok, koji se nalazi unutar brazda i jaruga, te se kreće turbulentnim gibanjem. [6,14]



Slika.2.2 Kretanje vode kroz tlo i površinu tijekom kišnog događaja (adaptirano iz [67])



Slika.2.3. Nadzemni tok sa ravnice u kanal (adaptirano iz [6])

Nadzmeni protok, obično teče u formacijama koje su opisane kao anastomizirajući putevi, koji koncentriraju vodu u rječicama, u suprotnosti sa tankim plašnim tokom rasprostranjenim po kopnenom terenu, definicijom Abrahamsa „Nadzmeni protok je kao plitki plašt vode s nitima dubljeg, bržeg protoka koji se odvaja i konvergira oko površinskih razdjeljenja, stijena i vegetacije“. Ponovljeno kretanje vode može uzrokovati razvoj brazda, koji tada utječu na daljnje kretanje tekućine, ovisno o varijablama njihove geometrije, hidrauliku protoka i koncentracije sedimenata, koji se mijenjaju s vremenom [1,59,23]. Stvaranje otjecanja kao temeljni uzrok erozije, dosta ovisi o intenzitetu oborina, vegetacijskom pokrovu i količini organske tvari u tlu. Bez obzira na njihovu visoku lokalnu varijabilnost, jedan od glavnih demonstratora kontrole nad dubinom nadzemnog protoka i brzine je oblik brežuljaka. Kada



diskutiramo višak otjecanja, sadržaj vode u tlu je jako bitan, tijekom trajanja događaja oborina. Nekoherentno tlo ima tendenciju da ima višu razinu vode zbog manjeg prostora pora, što rezultira većim sadržajem vode u tlu koje uzrokuje povećanje otjecanja. U tom slučaju možemo predvidjeti brzinu otjecanja usporedbom kapaciteta vlage tla u prethodnom mjesecu (ST) i trenutnog kapaciteta vlage tla (STC). Tamo gdje je stvaranje otjecanja djelić viška koji postaje otjecanje u aktualnom mjesecu, a ostatak se prenosi u sljedećih mjesec dana. Postoje dva glavna mehanizma koji određuju stvaranje nadzemnog protoka: višak infiltracije (Horton) i višak zasićenja (Dunne) [1,30,23,17,54]

### **Saturacijski-ekscs nadzemnog toka vode**

Nepovratni 'saturirano-ekscsni' protok uobičajno se kreće kao "razgranati protok" koji nastaje, kada inferentni protok koji ulazi zasićena područja premašuje kapacitet pod-površinskog toka koji prolazi kroz profil tla i mora izići na površini. Ovakav tip otjecanja traje sve dok je to omogućeno, procjeđivanjem iz sloja tla, također je vrlo ovisan o kapilarnom rubu koji omogućuje da podzemna voda uđu u pore u pod-površinskom sloju. Drugi pojam u kojem je prikazan 'saturirano-ekscsni' protok je kao uzrok izravnih oborina koje padaju na već zasićeno područje, poznat je i kao Dunne mehanizam ili 'zasićenost od dolje'. Objašnjenje je definirano kao dolazni kapacitet vode pri površinskom infiltriranju profila tla do granice gdje je postignuta maksimalna zasićenost, što rezultira podizanjem razine vode. Ovakav mehanizam za stvaranje otjecanja najčešći je u vlažnim regijama s tlima koja imaju kvalitetna svojstva zadržavanja vode i gustu vegetaciju praćenu plitkom razinom vode. Kad područje dosegne svoj potencijal za "zasićenja od dolje", sav nadolazeći tok vode se uklapa u površinsko otjecanje. Razina podzemne vode u odnosu na vodotok, posebno na ravnim terenima, dobar je inicijator za 'zasićenje od dolje'. Koncept područja varijabilnog izvora koji prikazuje opseg zasićenja iz određenog područja je ovisan o fluktuaciji dubine vodene tablice kroz sezonske i vremenski definirane ljestvice.

Kada se govori o opsegu zasićenih područja, geometrijske predispozicije igraju veliku ulogu, gdje u blizini područja konkavne formacije brda i široke ravne doline čine glavne primjere. Osim ove dvije situacije, 'zasićenost od dolje' događa se i u područjima u kojima se pod-površinske protočne linije konvergiraju u konkavnim kosinama ili gdje su slojevi tla koji provode pod-površinski protok doista lokalno tanki itd. [30,54,59]

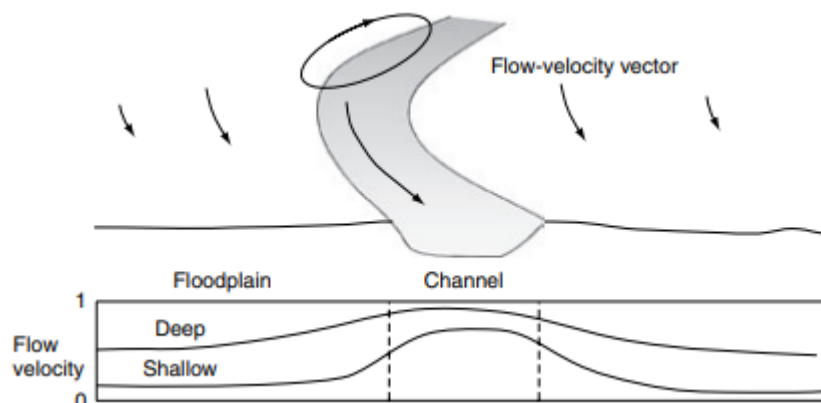
### **Infiltracijski-ekscs nadzemnog toka vode**

'Infiltracijsko-ekscsni' protok se stvara kada je brzina ulaska vode sa površine kopna veća od brzine infiltracije tla, što dovodi do nakupljanja vode u malim depresijama na površini. Voda koja pronađe put s površine, do tla se ne izbacuje odmah na površinu, jer dio nje infiltrira, a drugi dio isparava. Tek kada je dosegnuto ograničenje kapaciteta, voda se izliva kao nepravilni plašt ili se konvergira u rječicama. Dolazi do kašnjenja u puštanju vode iz zapremnina depresija na različita površinska mjesta zadržavanja, zbog različitih razina skladištenja vode u tlu. Mjesta s intenzivnim padalinama, niskom propusnošću tla i ogoljenim površinskim stanjem za infiltraciju uvjetuju 'infiltracijsko-ekscsni' otjecanja. Tijekom olujnog događaja, sva područja sliva neće postići istu razinu infiltracije, s obzirom na to da će neka područja tla imati jaču otpornost na unos vode zbog neaktivnih kapilarnih sila zasićenih pora. Prostorna varijabilnost svojstava tla koja utječe na infiltraciju i prostorna varijabilnost unosa površinske vode diktira mehanizam stvaranja otjecanja tijekom olujnog događaja. Kao što je Betson (1964.) istaknuo samo određeni dio sliva donosi 'infiltracijsko-ekscsni' protok, a to su područja bez odgovarajuće vegetacije ili s tankim pokrovom. Pri tome 'infiltracijsko-ekscsni' protok je posebno izražen u područjima koja promiču razvoj kore, zbijanje i brtvljenje, što

umanjuje propusnost. Polu-sušna područja s visokom stopom kiše, kao i područja s kompaktnom strukturom tla i asfaltiranim urbanim područjima dobra su za ispitivanje napredovanja 'infiltracijsko-eksczesnog' protoka. [1,30,59]

### Tok vode kroz poplavne ravnice

Transport vode i sedimenta preko poplavnih područja teško je predvidjeti, a nije uvijek točno modeliran zbog prolazne prirode poplava, promjenjive širine poplavnog područja, površinske topografije, kopnenog pokrova i druge strukture koju proizvode ljudi i životinje. U uvjetima u kojima se stacionarni tok javlja tijekom porasta razine vode u poplavljenom okruženju, najbrži protok prisutan je u glavnom kanalu s brzinama i posmično naprezanje u koritu koje se smanjuje s udaljenosti od margina kanala.



Slika 2.4 Tok vode preko poplavnih ravnica, sa varijabilnosti vodotoka duž udoline u odnosu na udaljenost od glavnog kanala (adaptirano iz [23])

Protok vode na poplavnim površinama kompliciran je njegovom prolaznom prirodom, promjenjivom širinom poplavnog područja i površinskom topografijom (kanali, udubljena, nakupine sedimenata), vegetacija i strukture koje proizvode ljudi i druge životinje [1,5]. Prema tome protok i transport sedimenata na prirodnim poplavnim područjima, nisu dobro poznati, a numerički modeli protoka vode i transporta sedimenata su slabo razvijeni. Međutim, provedene su mnoge laboratorijske eksperimentalne studije o potopljenom protoku u blizini riječnih kanala, uglavnom s stalnim tokovima preko jednostavne geometrije kanala -floodplain, i s nepokretnim granicama bez kretanja sedimenata. Unatoč tim pojednostavljenjima, eksperimenti su razjasnili neke važne karakteristike poplavnih protoka kada voda prekriva poplavno područje i protok je stabilan i uglavnom teče niz dolinu. Najbrži protok u jednostavnim modelima kanala –poplavnog područja je u glavnim kanalima, a brzina protoka i posmično naprezanje u koritu, na poplavnom području iščezavaju sa udaljavanjem od margina kanala. Vrtlozi stvoreni na marginama kanala- poplavnog područja, zbog izmjeničnih struja, uzrokuju naglo smanjenje brzine protoka. S udaljavanjem od glavnog kanala dubina protoka u poplavnom području raste u korelaciji s brzinom protoka, bez posljedica na brzinu uz rub kanala. Plitke poplave uglavnom doživljavaju velike gubitke u brzini zbog hidrauličkog skoka na marginama, a široka poplavna područja isključivo doživljavaju gubitak brzine na kratkoj udaljenosti od margina kanala. Konvergencija protoka u poplavnim područjima doprinosi povećanju brzine protoka, što se može promijeniti ovisno o hrapavosti kreveta i širenju protočne površine. Ove promjene u protoku i transportu sedimenata tijekom vremena promiču prostornu eroziju i taloženje na poplavnim područjima. Porast razine vode u glavnom kanalu može biti uzrokovan doprinosom vode iz kanala pukotina, nadzemnim protokom provedenim preko brazda i oborinama. To uzrokuje prelijevanje u poplavni bazen, gdje se voda ubrzava, potaknuta erozivnim tokovima. U vrijeme vršne poplave voda u potpunosti prekriva poplavnu ravnice i

nastavlja svoje kretanje nadalje s smanjenjem brzine vodećeg vodenog vala. Na kraju poplavljenog područja, razina vode opada, te se povlači do odvodnih kanala i podzemnih voda, a prema tome se poplavna jezera s vremenom smanjuju. [1,23]

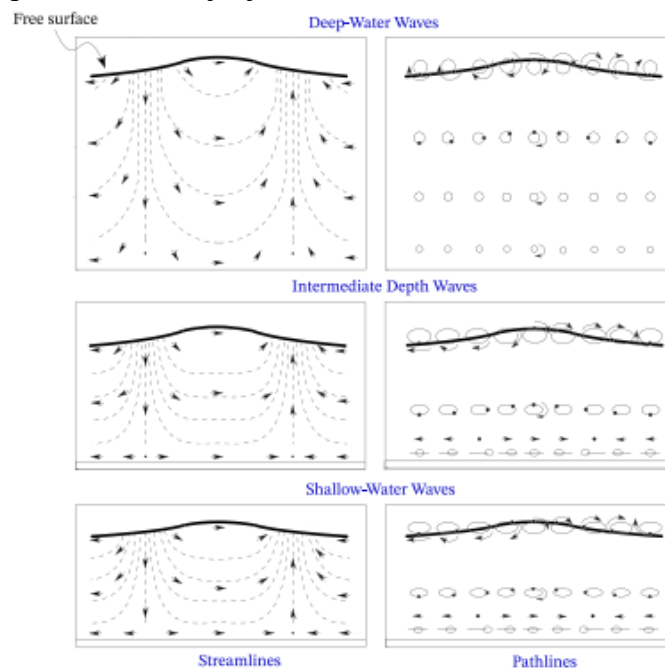
### 2.2.2. Dinamika i kinematika plitkih vodenih tokova

Karakteristike plitkih vodenih tijela teško je izmjeriti i kvantificirati, zbog njihove dostupnosti i karakteristika, međutim, važne su za određivanje površinskog otjecanja, kontrole erozije i modeliranja kvalitete vode. Za analizu ove vrste tokova koji su upravljani principima kontinuiteta i momenata, obično se koriste jedno ili dvodimenzionalni modeli protoka, zbog ograničenja zadanih 3D modeliranjem. Komponente brzine u smjeru x i y, u slučaju plitkog površinskog protoka, izvedene su iz energetskog pobuđivanja slobodne površine i zapisane su na sljedeći način (primjer iz [26]):

$$u(x, y, t) = a\omega \left[ \frac{\cosh[k(y+ho)]}{\sin(kho)} \right] \cos(kx - \omega t)$$

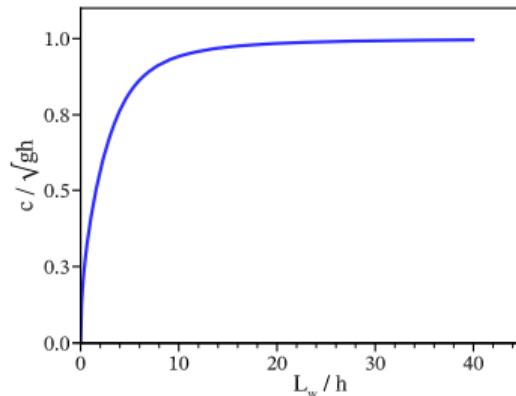
$$v(x, y, t) = a\omega \left[ \frac{\sinh[k(y+ho)]}{\sin(kho)} \right] \sin(kx - \omega t)$$

Kada se govori o dubini u odnosu na brzinu, jasno je da čestice tekućine, u dubljjoj vodi prate kružni ritma okretanja u smjeru kazaljke na satu, budući da su veličine komponenata brzine iste. Za plitke dubine vode, ovo je kretanje izmijenjeno u putanje eliptičnog oblika ili ispravljene linije, jer se komponenta brzine 'v' smanjuje kada se približava dnu, a slobodna površina ne ostavlja prostor za razvijanje u odnosu na dno.



Slika.2.5 Okretanje čestice vode uslijed propagacije gravitacijskog vala (adaptirano iz [26])

Može se zaključiti da amplituda horizontalnog gibanja u plitkim vodenim tokovima vode ima veću važnost od amplitude vertikalnog kretanja tekućine, budući da se njegove vrijednosti približavala 0 prema dnu. Plitka voda predstavljena je relativnom veličinom  $h_0$  i  $L$ , a zbog malih vrijednosti  $h_0/L$ , valna brzina uzeta iz donjeg grafikona postiže gotovo asimptotske konstantne vrijednosti dane:  $c = \sqrt{gh_0}$ , stoga komponente horizontalne brzine postaju praktički ujednačene duž cijele dubine, neovisno o duljini vala. [26,63]



Slika.2.6 Graf ovisnosti valne brzine o valnoj duljini i dubini (adaptirano iz [26])

Ovaj zaključak o neovisnosti horizontalne brzine u odnosu na vertikalnu brzinu može se projicirati na raspodjelu tlaka u plitkim dubinama vode. Razlike tlaka obično se pokazuju zbog ubrzanja u vertikalnom smjeru, zamišljenog pomoću zakrivljene vodene površine. To nije slučaj za plitke dubine u kojima 'k\*ho' ima vrlo malu vrijednost, gdje se podrazumijeva da je raspodjela tlaka hidrostatička. Jednadžba tlaka može se dobiti izmjenom brzinskog potencijala u jednadžbi slobodne površine:

$$p = p_0 + \gamma \left[ \tau \frac{\cos k(y+h_0)}{\cos kh_0} - y \right]$$

Vraćajući se na ranija objašnjenja, možemo objasniti turbulencije koje se uglavnom pojavljuju duž horizontalnih dužina, zbog ograničenja dubine. Ispitivanje turbulentnih pokreta poput stvaranja vrtloga, tromosti izazvane trenjem i odupiranja utjecaju viskoznosti, dovodi do odvajanja dvodimenzionalne turbulencije velikih razmjera ( $L2D > h$ ) i trodimenzionalne turbulencije malog razmjera ( $L3D < h$ ). Prikaz prirodne okoline predočava tanki vodeni sloj omeđen dnom trenja i slobodnom površinom, gdje se velika i mala turbulentna izobličenja mase fluidne mase djeluju zasebno i u odnosu na međusobnu razmjenu. Nestabilnost nastala u tekućoj plitkoj vodi produkt je omjera između sile pogona i disipacijske sile. Temeljna pokretna sila koja stoji iza horizontalne turbulencije, na velikoj 2D skali, je posmični tlak, koji se povećava s ubrzanjem na dnu i ovisi o viskoznosti tekućine. Topografija također igra veliku ulogu u stvaranju slojeva protoka, koji su vođeni promjenom brzine zbog hrapavosti korita, pri čemu se stvara turbulenciju na globalnoj skali. [21,63]

### Klasifikacija tokova prema Reynoldsovom broju

Jedan od ključnih čimbenika u određivanju režima protoka u otvorenim kanalima i prirodnim tokovima je izračunavanje Reynoldsovog broja koji označava omjer inercijalnih sila prema viskoznosti tekućine. Visoke vrijednosti Reynoldsovog broja, prikazane su u gravitacijskom toku slobodne površine koji pokazuje visoku otpornost na protok zbog inercije. Suprotno od stacionarnog istjecanja gdje viskozna naprezanja između susjednih slojeva kontroliraju ujednačen protok. Povećanje plitkog nadzemnog protoka kao primjer vanjskog viskoznog protoka, mora se kategorizirati na temelju njegove uzdužne komponente, kao laminarni ili turbulentni tok. Reynoldsov broj definiran ujednačenom dubinom ( $h_0$ ) i jednolikom brzinom protoka definiranim za prosječnu dubinu ( $u_0$ ) [6,24]. Difuzni plaštni nadzemni protok koji se kreće vrlo sporo, vegetacijski sloj i pod visokom infiltracijom može se eksperimentalno procijeniti kao laminarni protok kada je  $Re \leq 500$ , što odgovara pražnjenju po jedinici širine reda od  $10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , kroz vrijednost kinematičke viskoznosti. U slučajevima kada imamo vrlo

tanki sloj (milimetarska ljestvica) vode koja teče nizbrdo pod djelovanjem gravitacije, Reynoldsov broj može se aproksimirati kao  $Re \leq 350$ , iako je protok u otvorenom kanalu uglavnom prikazan turbulentnim protočnim uvjetima. Druga alternativa definiranja Reynoldsovog broja je korištenje okomite udaljenosti od zida, što nam pomaže u skaliranju gradijenta brzine:  $Re_l = \frac{uy}{\nu}$ . Kroz to utvrđujemo da je protok blizu zida, pod konstantnom kinematičkom viskoznošću, laminaran zbog stanja 'no-slip' uvjeta, bez obzira na srednji protok. Turbulentni uvjeti se raspršuju s protokom koji se širi bliže zidu i poprima oblik vrlo viskozne tekućine. Između dva sloja protoka formira se translacijska zona, djelujući kao tamponski sloj za pretvorbu turbulentnog protoka u laminarni. [24,26]

### Saint-Venant jednadžbe plitkih vodenih tokova

Nadzemni protok je sjajan primjer raspodjele plitke vode, koja se može opisati Saint-Venant jednadžbama na osnovi prosječne dubine. Ova vrsta kretanja vode je nekoliko stupnjeva teža za analizirati u odnosu na protok otvorenog kanala koji vodi do površinskih izvora. Kao što se spominjalo u prethodnom odjeljku, postoje dva pokreta koja proizlaze iz nadzmenog protoka a to je laminarni režim, uvjetovan parametrima stacionarnog razvoja protoka i turbulentnog režima, koji se ostvaruje utjecajem kiše, izrazitom relativnom hrapavošću i kanaliziranjem. Ovi aspekti kompliciraju procjenu hidraulike protoka na prostornoj i vremenskoj skali, no u generaliziranom modelu sliva ti se parametri pridodaju u analizi turbulentnog protoka. Zbog vremenskog i prostornog diskontinuiteta, koji proizlazi iz vanjskih izvora, nadzemni protok ima nejasno definirano područje širenja, što otežava obavljanje numeričke simulacije [6,8,26]. Saint-Venantove jednadžbe ili jedna od njihovih aproksimacija koriste se u simulaciji 1D nestacionarnog protoka u prirodnom i ne-prirodnom kanalu, koje se mogu pojednostaviti kalibracijom. Često nazvane jednadžbama plitke vode, mogu se raspisati i u 2D obliku, što se često primjenjuje kod slivova.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad Sf = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t}$$

Gornje jednadžbe predstavljaju potpunu dinamičku valnu jednadžbu (Saint-Venantove jednadžbe), sastavljene od jednadžbe kontinuiteta (s lijeve strane) i jednadžbe momenata (s desne strane). U predstavljanim jednadžbama  $Q$  predstavlja ispušt,  $A$  je površina poprečnog presjeka,  $v$  je brzina,  $S_f$  je nagib trenja,  $S_0$  je nagib korita,  $y$  je dubina vode u odnosu na dno, a  $x$  i  $t$  su nezavisne varijable koje predstavljaju karakteristike prostornog i vremenskog protoka. Ove jednadžbe zahtijevaju pouzdano izmjerene hidrauličke podatke, numeričke tehnike i geometriju poprečnog presjeka za određivanje otopine. Dakle, s obzirom na nadzemni protok, jednadžba s desne strane može se pojednostaviti, na primjer u plitkim potocima ako nagib korita ostane nepromjenjiv nakon odgovarajućeg trajanja vremena, brzina promjene dubine vode  $\left(\frac{dy}{dx}\right)$ , samo će neznatno odstupiti od uobičajene vrijednosti, kao i izraz vremenske promjene brzine  $\left(\frac{1}{g}\right) \left(\frac{\partial v}{\partial t}\right)$  i izraz gradijenta uzdužne brzine  $\left(\frac{v}{g}\right) \left(\frac{\partial v}{\partial x}\right)$ . Dakle, u tim se slučajevima izrazi na desnoj strani jednadžbe se mogu zanemariti. Jedna od pojednostavljenih verzija Saint-Venantovih jednadžbi je kinematička valna jednadžba, koja je raspisana bez inercijalnih i tlačnih izraza. Koristi se za proučavanje nestacionarnog protoka, koje je u ovoj verziji najprimjerenije za modeliranje nadzmenog protoka. Jednadžba momenata ide na sljedeći način:  $S_f = S_0$ , što može predstaviti komplikacije kao definiranje kosine trenja kao kosine korita i pretpostavljanje jednoličnosti u odnosu na mrežu za distribuciju, osim u slučaju uporabe u nestacionarom kontinuitetu protoka.

Prilagođavanje jednadžbe momenata na jednadžbu nestacionarnog istjecanja (ispuštanja), stvara alternativna rješenja za jednadžbu momenata:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} = c \frac{\partial A}{\partial x} \qquad \frac{\partial Q}{\partial t} = c \frac{\partial A}{\partial t} \quad [1,6,26]$$

### NRCS –Metoda brzina

NRCS metoda brzine je najčešće korištena metoda za procjenu vremena koncentracije ( $T_c$ ), što je zbroj vremena putovanja, za svaki segment protoka koji se javlja od trenutka početka površinskog otjecanja, te sve dok ne dostigne mjesto ispusta u slivu. Kretanje vode kroz sliv može se aproksimirati kao plaštni protok, plitki koncentrirani protok i protok kanala. Oni su dio odvodnog sustava i ključni su u izračunavanju vršnog pražnjenja s područja, što se događa kada su svi segmenti protoka uključeni u otjecanje s površine. Urbanizacija obično smanjuje vrijeme koncentracije i stoga povećava brzinu vršnog pražnjenja. [56,57]

Vrijeme putovanja je omjer duljine i brzine protoka:  $T_t = \frac{L}{3600V}$

$T_t$ -vrijeme putovanja(h)  
 $L$ -protočna duljina(ft)  
 $V$ -prosječna brzina(ft/s)

Vrijeme koncentracije  $T_c$  sastoji se od dodavanja uzastopnih protočnih segmenata, koji se pridodaju drenažnoj površini:

$$T_c = T_{t1} + T_{t2} + \dots + T_{tm}$$

$T_c$ -vrijeme koncentracije

$m$ -broj protočnih segmenata

Vrijeme koncentracije ovisi o sljedećim faktorima:

1. Razvoj površinske hrapavosti –razvoj urbanih područja utjecao je na povećanje brzine protoka, smanjenjem retardacije protoka.
2. Oblik kanala –projektne hidrauličke karakteristike sustava kanala, promiču brže brzine otjecanja i kraća vremena putovanja
3. Nagib -može se povećati ili smanjiti urbanom intervencijom, tako da možemo poboljšati upravljanje vodom i transportne aktivnosti

Plaštni protok je prvi segment analize i predstavlja protok preko površinske ravnine. Obično se širi do udaljenost od oko 100 ft, a mi koristimo Manningovo kinematičko rješenje, koje sažima sve faktore prevencije protoka (utjecaj kišnice, tromost, transport sedimenata), za računanje  $T_t$ :

$$T_t = \frac{0,007(nL)^{0,8}}{(P_2)^{0,5} S^{0,4}}$$

Surface Description	n
Smooth Surface (concrete, asphalt, gravel, or bare soil) .....	0.011
Fallow (no residue) .....	0.05
Cultivated Soils:	
Residue cover ≤ 20%.....	0.06
Residue cover > 20%.....	0.17
Grass:	
Short grass prairie.....	0.15
Dense grasses <sup>1</sup> .....	0.24
Bermudagrass.....	0.41
Range (natural) .....	0.13
Woods: <sup>2</sup>	
Light underbrush.....	0.40
Dense underbrush.....	0.80

Slika.2.7 Manningov koeficijent hrapavosti za plašni tok vode (adaptirano iz[57])

Plitki koncentrirani protok razvija se nakon maksimalno 100 ft, te se obično razvija u brazdama, jarugama i gusicama. Vrsta kanala i hrapavost kosine definiraju prolaznu prirodu ovih tokova, iznad kojih obrada površine može utjecati i na smjer protoka. Taj se protok može odrediti iz tablice u nastavku na temelju sheme okoliša. [56,57]

Flow Type	Depth (feet)	Manning's n	Velocity Equation (ft/s)
Pavement and small upland gullies	0.2	0.025	$V = 20.238(s)^{0.5}$
Grassed waterways (and unpaved urban areas)	0.4	0.050	$V = 16.135(s)^{0.5}$
Nearly bare and untilled (overland flow); and alluvial fans	0.2	0.051	$V = 9.965(s)^{0.5}$
Cultivated straight row crops	0.2	0.058	$V = 8.762(s)^{0.5}$
Short-grass prairie	0.2	0.073	$V = 6.962(s)^{0.5}$
Minimum tillage cultivation, contour or strip-cropped, and woodlands	0.2	0.101	$V = 5.032(s)^{0.5}$
Forest with heavy ground litter and hay meadows	0.2	0.202	$V = 2.516(s)^{0.5}$

Slika.2.8 Jednadžbe i pretpostavke definirane iz grafa brzine/kosine za plitke koncentrirane tokove (adaptirano iz [57])

Protok u otvorenom kanalu je naj prepoznatljiviji od, do sada spomenutih, zbog njihove dostupnosti za provjere poprečnog presjeka, vidljivosti pri zračnom fotografiranju i označenih linija na kartama i planovima. Manningove jednadžbe ili podaci o profilu vodene površine mogu se koristiti za procjenu prosječne brzine protoka:

$$V = \frac{1,49 \left( r^{\frac{2}{3}} \right) \left( s^{\frac{1}{2}} \right)}{n}$$

V-prosječna brzina (ft/s)

s-hidraulički nagib dna

R-hidraulički radijus

n-Manningova veličina za tok u otvorenom koritu

-A/P

A-površina poprečnog presjeka vodotoka

P-vlažni opseg

Type of Channel and Description	n
<b>A. Closed Conduits Flowing Partly Full</b>	
1. Steel - Riveted and Spiral	0.016
2. Cast Iron - Coated	0.013
3. Cast Iron - Uncoated	0.014
4. Corrugated Metal - Subdrain	0.019
5. Corrugated Metal - Storm Drain	0.024
6. Concrete Culvert, straight and free of debris	0.011
7. Concrete Culvert, with bends, connections, and some debris	0.013
8. Concrete Sewer with manholes, inlet, etc., straight	0.015
9. Concrete, Unfinished, steel form	0.013
10. Concrete, Unfinished, smooth wood form	0.014
11. Wood - Stave	0.012
12. Clay - Vitrified sewer	0.014
13. Clay - Vitrified sewer with manholes, inlet, etc.	0.015
14. Clay - Vitrified subdrain with open joints	0.016
15. Brick - Glazed	0.013
16. Brick - Lined with cement mortar	0.015
<b>B. Lined or Built-Up Channels</b>	
1. Corrugated Metal	0.025
2. Wood - Planed	0.012
3. Wood - Unplaned	0.013
5. Concrete - Trowel finish	0.013
6. Concrete - Float finish	0.015
7. Concrete - Finished, with gravel on bottom	0.017
8. Concrete - Unfinished	0.017
9. Concrete Bottom Float Finished with sides of:	
a. Random stone in mortar	0.020
b. Cement rubble masonry	0.025
c. Dry rubble or rip rap	0.030
10. Gravel Bottom with sides of:	
a. Formed concrete	0.020
b. Dry rubble or rip rap	0.033
11. Brick - Glazed	0.013
12. Brick - In cement mortar	0.015
13. Masonry Cemented Rubble	0.025
14. Dry Rubble	0.032
15. Smooth Asphalt	0.013
16. Rough Asphalt	0.016
<b>C. Excavated or Dredged Channel</b>	
1. Earth, straight and uniform	
a. Clean, after weather	0.022
b. Gravel, uniform section, clean	0.025
c. With short grass, few weeds	0.027
2. Earth, winding and sluggish	
a. No vegetation	0.025
b. Grass, some weeds	0.030
c. Dense weeds or aquatic plants in deep channels	0.035
d. Earth bottom and rubble sides	0.030
e. Stony bottom and weedy banks	0.040
3. Channels not maintained, weeds and brush uncut	
a. Dense weeds, high as flow depth	0.080
b. Clean bottom, brush on sides	0.050
<b>D. Natural Streams</b>	
1. Clean, straight bank, full stage, no riffles or deep pools	0.030
2. As D.1 above, but some weeds and stones	0.035
3. Winding, some pools and shoals, clean	0.040
4. As D.3 above, but lower stages, more ineffective slope and sections	0.045
5. As D.3 above, but some weeds and stones	0.048
6. As D.4 above, but with stony sections	0.050
7. Sluggish river reaches, rather weedy or with very deep pools	0.070
8. Very weedy reaches	0.100

Slika.2.9 Manningov koeficijent hrapavosti za tok u otvorenim koritima (adaptirano iz [57])

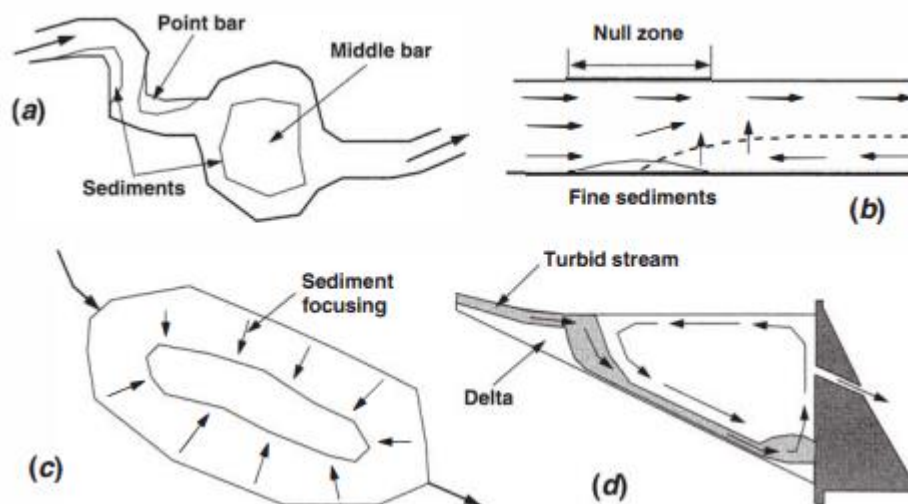
## 2.3. Međudjelovanje vode i tla

### Transport sedimenata i deponiranje

Međusobni odnosi vode i tla mogu se objasniti preko formacija rijeka, zemljanih brazda, jaruga i drugih površinskih formacija kao rezultat kretanja vode po površini. Hidrološki ciklus pokreće dinamiku mijenjanja vlage tla i kruženja bio tvari i kemikalija, poput otjecanja fosfora i organskog ugljika. Masa određene organske ili anorganske tvari koja se kreće kroz promatrani volumen pokretne vode naziva se transport. Među tim protokom, masa se mijenja u svojoj količini, kao posljedica raznih reakcija, prezentiranih ili u smanjenju zbog promjene strukture spoja tvari ili u povećanju, zbog promjene afiniteta neke tvari, pri čemu se lakše veže za prevladavajuću materiju. [1,23] Također, vanjske naslage, mogu služiti kao dodatak transportnoj masi. Za referencu, zrna šljunka ili pijeska potopljena u vodi bit će pod utjecajem



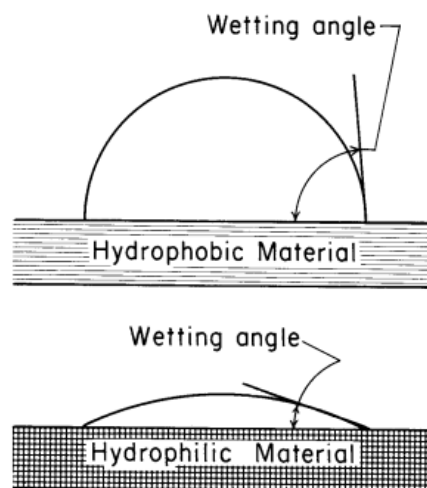
uzgona, a ovisno o gustoći će ili potonuti ili ostati na površini. Na to dalje utječe i turbulencija protoka vode, pri čemu neki dio sedimenata može se zaostati pored zadržanog sedimenta na koritu zbog viskoznog posmičnog naprezanja i dinamičkog tlaka. Ovo relativno gibanje naziva se fluidna tromost ("drag"), dobivena iz ograničenja izazvanog trenjem (površinski tromost) ili otpora proizvedenog dinamičkim tlakom (tromost oblika). Tromost oblika ima veću ulogu u taloženju sedimenata zbog utjecaja na pojedinačna zrna i raspored zrna na dnu korita. Suspendirane krute tvari u prirodnom toku vode prolaze kroz različite transformacije njihovog osnovnog sastava i rasprostranjeni su po dnu ovisno o njihovoj gustoći i volumenu. Iako će određena količina čvrste mase trajno zadržati, drugi se vraćaju nazad u vodotok putem turbulencije, što se događa u plitkim područjima s jakim strujama i naletima vjetra [1,23,27]. Ovisno o veličini zrna i stanju protoka, mogu se razaznati određeni tijekom kretanja. Područja niske energije kao što su bazeni u rijekama i nulte zone estuarijskih područja su pogodni za taloženje sedimenata i uvećanje čestica. U jezerima grubi sedimenti su razbacani po plitkim regijama, a finije čestice u sredini poplavljenog područja, kao rezultat vjetra i struje potaknute turbulencijom. Ljudske interakcije mogu izmijeniti povijest taloženja, kao i intenzivni prirodni događaji, a to uključuje izgradnju brane, skupljanje u riječnom krevetu i poplave. Očuvanje sedimentnog opterećenja u strukturi brana može dovesti do degradacija nizvodnog kraja kao rezultat nedovoljnog prinosa sedimenata, utjecaja erozije itd. Sedimentacija se može postići različitim aktivnostima u kojima pruža prekomjerne naslage u određenom području, kao posljedicu radova iskopavanja, porasta razine mora ili iznad prosječne opskrbe sedimentom. To mijenja ravnotežu sedimenata kroz vremensko period erozije i cjelokupnog taloženja. [1,20,66]



Slika.2.10 Dispozicija rute kretanja finih sedimenata u prirodnim vodnim tijelima  
 a) tlocrtni prikaz rijeke  
 b) bočni prikaz estuarija  
 c) tlocrtni prikaz jezera  
 d) bočni prikaz akumulacije (adaptirano iz [20])

## Vlažnost

Jedno od najčešće utvrđenih dinamičkih svojstava, koje pokazuje učinak u kontaktu između tekućine i čestica tla je vlažnost površine tla. Tijekom preklapanja dvodimenzionalnih sadržajno različitih medija, voda se akumulira na površini tla, kao posljedica površinske napetosti i prevladavajućih karakteristika tla. Tijekom ove razmjene, različite veličine stanica i rasjeda iz kojih curi voda utječu na stvaranje prvog vodenog sloja, konkretnije strukturu i vijek trajanja vodikove veza u mreži. U slučaju postojanja malih deformacija u dvodimenzionalnoj mreži vodikovih veza, nepravilni profili kapljica dijelom se formiraju nepotpuno, što produženje vrijeme zadržavanja na površini, prije potpune adsorpcije. [67,72] Ovo je prikazano kao nagomilavanje kapljica vode na površini kroz međusobne veze postignute silama privlačenja između čestica vode. Sljedeći slojevi smanjuju vrijeme boravka na površini prije nego što se apsorbiraju u tlo. Možemo zaključiti da je stupanj vlažnosti određen reakcijskim silama koje privlače čestice vode na čestice tla u usporedbi s odbijanjem od te unije prilikom vezanja čestica vode. Drugi važan čimbenik u raspoznavanju hidrofobnih od hidrofilnih površina je kut vlaženja kapljica vode u odnosu na površinu ravnine. U slučaju hidrofilnih površinskih medija, mjehurić vode se lakše upija, zbog poroznosti tla, adsorbirajući djelomični volumen. Kut vlaženja definira veličinu privlačnosti između čestica tla i vode, iz čega se može zaključiti da hidrofobne površine imaju smanjenu brzinu protoka zbog spajanja čestica vode.



Slika.2.11 Kut vlaženja kod hidrofilnih i hidrofobnih površinskih tekstura (adaptirano iz [67])

U slučaju nezasićenog tla, voda može slijediti tijekom kretanja preko prolaska energije, pri čemu se privlačne sile vode termodinamičkim prijelazom iz visoke energetske regije u nisku energiju. Vodeno odbojni(ne vlažni) slojevi tla, koji se uglavnom formiraju u vlažnim područjima uslijed efekata sušenja ili mjesta izloženih visokim temperaturama, sastoje se od voštanih slojeva u nizovima ili neujednačenih, zbog degradacije organskog sastava. Ova tla uglavnom se nalaze na 'čestarskim' stepama ili izgorenoj i pješčanoj ilovači, gdje se standard vlažnosti temelji na: učinkovitosti vegetacije, povijesti požara, atributima tla i brojnim suradničkim vanjskim čimbenicima. Odbojnost vode ključni je inicijator za sukcesiju otjecanja i modificiranog isparavanja, što naglašava njegovu rasprostranjenost u hidrološkom ciklusu. Odnos između infiltracije i otpornosti vode ovisi o teksturi profila tla i njegovim svojstvima vlaženja, gdje neznatno vlažna tla prihvaćaju vodu brže od izuzetno vlažnih tla koja čuvaju vodu na površini dok ne ispari. [26,67]

## 2.4. Integrirane tehnike praćenja toka vode

Primjena trasera u današnjem danu i vremenu prožeta je kroz različite znanosti, za otkrivanje određenih svojstava, definiranje translacijskih putanja kretanja fluida ili ispitivanje nepristupačnih područja. Njihova upotreba u hidrološkoj znanosti i u istraživanju vodenog ciklusa pridonijela je daljnjem razvoju segmenata koji omogućuju kretanje vode, kao i upotpunjavanju modeliranja iza tekućih sustavnih dilema istraživanja. (granice infiltracije, pomaci kretanja podzemne vode, širenje erozije, raspored taloženja). Postoje različite varijacije trasera prepoznatih preko stabilnih izotopnih ili radioaktivnih svojstva, ili umjetnih ili prirodnih trasera koji se promatraju kao tvari s kemijskim ili fizičkim svojstvima. Kao u riječima 'Flury&Wair (2003)' citirajući: " idealan traser za hidro-ekološko istraživanje trebao bi: i) imati pokret sličan vodi; ii) biti konzervativan, tj. bez degradacije tijekom vremena mjerenja; iii) onemogućiti sorpciju drugim komponentama okoliša (npr. tlo, sedimenti, stijene); iv) biti vidno drugačiji od pozadine sustava; v) biti jednostavno otkriven kemijskom analizom ili vizualizacijom; vi) niskog toksikološkog utjecaja na ispitno okruženje ". [7,37] Polje korištenja ove vrste spojeva je široko rasprostranjeno, od ispitivanja dubine infiltracije, praćenja kretanja podzemne vode, karakterizacije širenja erozije ili praćenja raspoređivanja taloga. Kada se koriste u svojem području prakse, postoje 3 dijela hidrološkog sustavnog pristupa koji ostaju nepromjenjivi. Prvi je unos u okoliš koji se može postići koncentracijom ili ubrizgavanjem trasera, drugi je potentnost prirodnih ili umjetnih trasera dok se kreće kroz strani medij, a treći koji označava izlaz iz sustava je opisan kao izvedeni volumen i koncentracija trasera. Tehnike detektiranja predstavljaju eksperimentalnu domenu prikupljanja empirijskih podataka, koji se kasnije koriste za kalibraciju i validaciju određenih (kinematičkih, dinamičkih, hidroloških) modela ili se kvantitativno i kvalitativno obrađuju. Tehnike detektiranja imaju veliku važnost u upravljanju vodnim resursima, gdje doprinose promicanju određenih studija unutar politike očuvanja vode i nadopunjavanju određenih projekata implementacije, kroz daljnja otkrića o prirodnom sustavu. U svrhu ovog rada, daljnji će se pregled uglavnom usredotočiti na umjetne trasere koji se koriste u istraživanju prirodnih fenomena i njihovog razumijevanja. [7,27,73]

### 2.4.1. Umjetni traseri

Prije korištenja trasera u prirodnim i laboratorijskim eksperimentima, moramo se upoznati s 'ulascima i izlascima' ('ins and outs') njihove uporabe. Umjetni traseri pružaju jasniji uvid u latentne i aktivne procese koji se javljaju oko hidrološkog sustava i mehanike mreže za distribuciju vode. Njihova značajka ograničena je i prostorno i vremenski, pa se njihova primjena mora izvršiti sigurno i kontrolirano. Osim toga, njihova održiva svojstva omogućuju da ih instrumenti jasno promatraju u prirodnom okruženju, što doprinosi kvantitativnoj obradi brzine protoka, toka, vremena boravka, disperzije itd. [7,62]. Sustavi s ograničenim vremenskim rokovima obično su u fokusu njihove rasprave, poput površinskog otjecanja, koje se ne može pouzdati u mjerne instrumente kako bi se pružila točna analiza. Ovo je problem zbog tankog sloja vode, krećući se preko površine s razbacanim ostatcima koji ometaju protok, kao i razne površinske uvjete. Za potrebe procjene polja brzine, putanje protoka i usmjerenja u plitkim vodotokovima, krškim vodonosnicima, mnoštvo različitih varijanata trasera stoje na raspolaganju. Među tim skupinama tradicionalno se koriste traseri od boje i soli, iako različite prigode, zahtijeva trasere, koji mogu imati više naglašeniju konzervativnu prirodu. Topljivost određuje dugovječnost materijala za praćenje (trasera) unutar medija, zajedno sa sorpcijom koja može biti štetna za protok. Kemijski trag određenih trasera čini ih pouzdanim kandidatima, za izvedbu određenog zadatka, poput fluorescentnih trasera, koji se uglavnom koriste u bilo kojem scenariju. Uglavnom se umjetni traseri ubrizgavaju u vodeno tijelo, gdje se prilagođavaju svojoj

okolini, pružajući signal za pokret predočen u volumenu. Na temelju fizikalno -kemijskog stanja raspršenih čestica, oni se koriste za asortiman posebnih problema. [7,36,60,61]

### **Slani traseri**

U pokušajima da se izbjegnu problemi koji mogu nastati heterogenošću i anizotropijom hidrauličkog režima i nepoznatih uzroka brzine i pomaka uslijed kretanja, koristimo trasere soli kao jedinice za praćenje u različitim scenarijima. Mehanizam koji stoji iza primjene trasera soli oslanja se na električne sonde koje se postavljaju u pod-površinski dio i prenose signal na prijelazni rub slane vode, što zauzvrat odašilje signal. Ovi traseri djeluju kao ekološki i umjetni traseri zbog svoje kemijske pozadine. Njihova protu-reaktivna priroda ih je učinila prikladnim za mnoštvo primjena u krškim sustavima, kanalima podzemnih voda, poroznim geološkim slojevima i izlivanju iz rijeka i cijevi [73]. Bez obzira na kvalitetu koju pokazuju traseri soli, kada se primjenjuju u područjima koja se bave strujanjem vode, oni se prevoze se kroz utjecaj mehanizma za masovni transport, pa ih treba pažljivo izabrati. Zbog svoje snažne ionske baze i pozitivnih svojstava topljivosti, bili su uključeni svugdje unutar hidrološkog sustava sve dok se nisu pojavili fluorescentni traseri. Plitki nadzemni tokovi čine optimalne primjere pothvata malih razmjera, pri čemu je važna količina trasera koju je potrebno koristiti da bi bio detekcija bila učinkovita. Pri miješanju soli u volumen vode mora se osigurati zadovoljavajući omjer, tako da se ne utječe na topljivost. Kvaliteta odaziva mjerne opreme ovisi o učestalosti prolaza vala slane vode, što ovisi o koncentraciji soli u određenom vremenu na dijelu potoka. Kemijska i fizička svojstva soli u vodi sastoje se od kationa i aniona koji se odvajaju tijekom otapanja, s visokom električnom vodljivošću kao produktom kaotičnih iona. Pri nanošenju ovih trasera u profilima tla zamišljenim od sitnozrnog tla, mineralne i organske čestice privlače ione sadržane u soli, razmjenom iona. Sorpcija u pogledu kationa ima veću stopu adsorpcije nego u slučaju aniona, što odražava niske sorpcijske uvjete. Faktori koji utječu na volumen kationa i aniona za izmjenu, sa česticama tla, su potencijali iona u pogledu naboja i radijusa iona. Negativne posljedice korištenja trasera soli uključuju značajne stupnjeve onečišćenja, poteškoće pri kretanju, zahtjevnju obradu i injekcije prekomjerne tvari. Iako, bez obzira na spomenute neuspjehe, ovi tragovi su favorizirani u praksi zbog njihovog slabog održavanja, velikih količina i značajki za snimanje kvalitete. [7,62,65]

### **Fluorescentni traseri**

Zbog svojih virtuoznih sposobnosti u disciplinama praćenja umjetnim traserima, ti su traseri postali poznati među svojim prethodnim korisnicima, s najvećom stopom učinkovitosti i upotrebe. Granice postavljene tradicionalnim metodama praćenja kretanja na bazi vode, zaobilaze se kroz njihove urođene karakteristike. Poput netopljivog ponašanja, koji dobro funkcionira za sprečavanje prijanjanja na prolazne slojeve materijala, što smanjuje volumen uzorka trasera, što radi protiv učinka trasera boje. Također, izražena svjetlost u nejasnom okruženju, što povećava kvalitetu tehnike snimanja i olakšava proces bez smetnji. Ovi traseri su posebno korisni za opisivanje neograničenih rubova protoka, protoka pokretnog opterećenja i jakih poplava kroz procjenu 2D i 3D protoka, protok vrtloga i batimetrijske značajke materijala. Čišćenje razine toksičnosti mnogo je veće u odnosu sa drugim kemijskim spojevima, kao i ujednačenosti u pogledu koncentracije na krivulji kalibracije. Sažeta analiza i male količine korištenog materijala, čine korist od troška ovog trasera i različitih načina praćenja protoka vode, proizvod su izražene osjetljivosti, lakog rukovanja i jednostavnih uvjeta otkrivanja. [7,39,40,64] Provedena su brojna istraživanja kako bi se definirale primjenjive vrste

fluorescentnih traserata, koji su u malom broju omogućeni za današnju upotrebu. Čak i među potencijalnim kandidatima, nema dovoljno uvjeta za proširenje njihove uporabe, uglavnom zbog procesa proizvodnje. Neki od ovih traserata uključuju Rodamin WTS za istraživanje odvodnje, uranina i deuterija za testiranje propuštanja vodonosnika i piranina za prijelaz vode između makro-pora.

Fluorescencija funkcionira iz energije izvora luminiscencije kao uzrok elektromagnetskog zračenja i prenosi lagani impuls vrlo kratke valne dužine  $10^{-18}$ . Izvor energije privlači atome iz nižih krajeva energije i odbacuje ih do višeg energetskeg stanja, gdje oni ispuštaju energiju kroz bljesak svjetlosti. Intenzitet emisije fluorescencije proporcionalan je intenzitetu incidentne svjetlosti i koncentraciji traserata:

$$I_e = A * I_0 * \epsilon(\lambda_{ex}) * \Phi(\lambda_{em}) * c * d$$

$I_e$  = intenzitet fluorescencije

$A$  = instrumentalna konstanta

$I_0$  = intenzitet incidentnog svjetla

$\epsilon(\lambda_{ex})$  = molekularni koeficijent iščezavanja za valnu dužinu  $\lambda_{ex}$

$c$  = koncentracija traserata

$\Phi(\lambda_{em})$  = kvantni prinos

$d$  = debljina slojnog uzorka

Intenzitet fluorescencije istaknut tragovima materije određuje se njegovim fizičkim parametrima, poput kvantnog prinosa, koeficijentom iščezavanja i koncentracije traserata. Ovo je svojstvo važno jer je granica detekcije određena intenzitetom fluorescencije s kojim je u jednom smislu pozitivno povezan, a u drugom s pozadinom uzorka [7,27]

Dye	Relative fluorescence intensity [Uranine = 100%]	Detection limit [mg/m <sup>3</sup> ]	Excitation/emission [nm]
Naphthionate	18	0.2	325/420
Pyranine	18	0.06	455/510
Uranine	100	0.001	491/516
Eosine	11.4	0.01	515/540
Amidorhodamine G	32	0.005	530/555
Rhodamine B	9.5	0.02	555/575
Rhodamine WT	10	0.02	560/585
Sulforhodamine B	7	0.03	561/586

Slika.2.12 Tablica vrijednosti između obojanih spojeva, predočavajući njihovu relativnu fluorescenciju i detekcijski limit(adaptirano iz [7])

## Obojeni traseri

Kao umjetni traser s dugom upotrebom u procesima praćenja transporta vodenog tijela, obojenim traserima nedostaje svojstveni potencijal da bi bili išta više od proizvoda za eksperimente bojenja. To je predstavljeno u površnoj prostornoj i vremenskoj rekonstrukciji ponašanja vode, što ih čini savršenim kandidatima za predstavljanje nepredvidivog i nestacionarnog protoka u tlu. Ovi traseri pružaju dobar uvid u srednju brzinu protoka plitkog nadzemnog protoka, slijedeći vodeći rub boje nakon što se injektiranje trasera dogodi. Unutar recipijenta, obojeni kemijski spoj podvrgnut je reakciji u kojoj čestice ubrizgane mase se šire okolo pod vodstvom čestica vode, što objašnjava visoku topljivost. U takvim koncentriranim uvjetima čestice boje mogu se odvojiti od reaktivne ravnoteže, dok se kreću kroz vodene parcele, kao produkt principa vezanja vodika, razmjene iona i kontaktnog kuta krute tekućine, što su sve preliminarni čimbenici sorpcije [7,27,37]. Obojeni traseri doživljavaju negativne učinke kemijskom reakcijom otapanja, što smanjuje faktor svjetline i oksidaciju koja polako razgrađuje otopljeni sastojak. Stoga su mobilnost i vidljivost glavni čimbenici koji čine kvalificirani faktor, za vrstu trasera koji će se odabrati kako bi se izvukle linije protoka kroz zamršene spojeve u profilu vode. Ne-fluorescentne i fluorescentne boje imaju prevladavajuća fizikalna i kemijska svojstva, koja se pojavljuju na niskoj pH razini, što inducira vezivanje vodika. Plavi metilen je obojeni traser s izvrsnim značajkama svjetlosti, ali ima dominantan trend adsorbiranja pri približavanju površini, koji ima povratnu reakciju u praćenju protoka. U tom je smislu upotreba kiselih boja pokazala najbolji rezultat, po njihovoj umjerenj brzini kretanja i kvaliteti snimljene slike. Prednja strana trasera boje pokazuje veće stope retardacije u odnosu na kontrolirane trasere, te prednji rub vlaženja i kreće se kroz prostor, fluktuacijom sorpcije, fizičkim i kemijskim ograničenjima tla i varijacijama u vremenu kontakta. Obrada slike je nužna ako postoji potreba za dubljim uvidom u sljedove ponašanja i karakteristike koje su primijećene metodama praćenja boje. [7,38,45,52]

### 2.4.2. Karakteristike transporta otopine

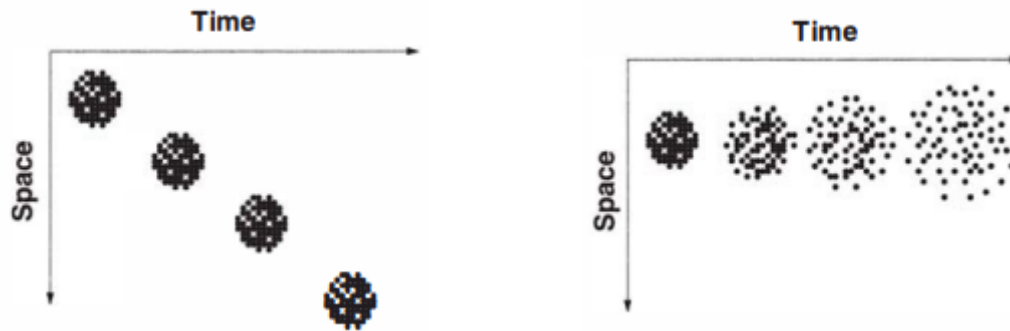
#### Transport otopine

Kad se govori o kretanju stranih tvari u kontroliranom volumenu, bilo da se radi o kretanju zagađivača u mreži otpadnih voda ili materijalu za praćenje koji je ušao u strujni tok, svojstva masovnog transporta važna su za procese koji utječu na ravnotežu protoka. U tim je okolnostima važno je dobro razumjeti molekularne reakcije, ovisno o omjeru mase otopine u volumenu otapala. Ako razrjeđivanje koncentrata pokreće razdvajanje iona ili molekule, to je dodatno vođeno sudarom s česticama vode u uzdužnom i bočnom smjeru, slijedeći 'meandrirajuće' staze. Ovaj sudar je produkt hidratacije u kojem se čestice vode prijanjaju za suprotno nabijene ione sprječavajući ih da se preurede i izmjene njihovo kretanje kako bi odgovarali protoku otopine [74]. Proces se nastavlja sve dok spoj ne postigne ravnotežno stanje, nakon što je dostigao prag momenta vodnog toka izazvanog energijom (stvoren kemijskim reakcijama). Prije početka širenja parcele otopine, nekoliko drugih procesa doprinosi promjeni oblika i izmjeni hidro-dinamičkih i kinematičkih svojstava otopine. Veliki dio u određivanju početnih procesa, vodećih otopina nadalje, određuje se vrstom protoka raspodjele i karakteristikama površine. [25,74,75]

#### *Advekcija u suradnji sa difuzijom*

Trajno međudjelovanje dvaju elemenata sačinjava vremenski osjetljiv medij koji prikazuje različite kemijsko-fizičke i mikrobiološke procese. Promatrajući ovo okruženje, možemo

razaznati transportni mehanizam na temelju utjecaja relativnog gibanja cijelog sustava i transporta zamišljenog iz 'refleksivne' prirode čestica da međusobno reagiraju. [25,75]



Slika.2.13 a)transport čestice bojila kroz prostor, potaknuto advekcijom

b)transport čestice bojila kroz prostor, potaknuto difuzijom (adaptirano iz [20])

Advekcija predstavlja ponašanje jedne jedinice unutar unije, krećući se s jednog mjesta na drugo, kao posljedica ponavljanih pokreta. Ovaj fizički fenomen ovisi o reaktivnim silama pojedinih čestica i drugih elemenata, pružajući otpornost na kinematičku silu. Energija vjetra i gravitacija obično su pokretačke sile koje potiču kretanje vode, gdje advekcija sačinjava polja brzina razvijena iz tog poremećaja statičkog oblika. Otopljeni spoj funkcionira pasivno unutar otopine, kao rezultat toka, postignut energijom koja struji između iona i čestica vode. U tom slučaju, ovaj tok se može povećati ili smanjivati ovisno o vremenu i mjestu i energetskom potencijalu. Poboljšanje koncentracije otopine, dodavanjem otapala, neće rezultirati neposrednom promjenom brzine i smjera sorpcije, jednoliko preko područja širenja. Ali će imati postupni tijek izobličavanja u odnosu na ravninu koncentracije, koja je odgovoran za disperzivni tok topljivog sredstva (neujednačena raspodjela topljivog sredstva). Jezera s prirodnim ispustima i transportom nizvodno u prirodnim vodotocima, čine dobre primjere postupka advekcije. [20,25]

Difuzija je tendencija sporadično nabijenih čestica ili molekula da se kreću oko prostora, ili kretanje mase zbog među-molekularnih reakcija. Kroz ovaj inverzni postupak, čvrsto vezane molekule topljivog materijala rašire se i postupno razrjeđuju otopinu. Ovaj prijenos započinje od područja veće koncentracije, te se smiruje u nižim koncentracijskim područjima, natrpanih formacija. Prisutnost topljivog agenta u razrijeđenim otopinama ne utječe na ukupnu dinamiku vodenog tijela ako je ograničena na dozvoljenu količinu. Zauzvrat nudi nesmetano napredovanje koncentracije, koja se smanjuje sve do donjeg kraja volumena. Postoje različiti načini za izmjenu brzine transporta pojedinih čestica u koncentriranoj otopini zbog povećanja: temperature, elektromagnetskog naboja i tlaka. Veličina difuzije aproksimirana je ovim trima faktorima:

- 1) Područje širenja- što je veći volumen veća je mreža razrijeđene tvari
- 2) Sposobnost miješanja- koja se može poboljšati u uvjetima koji daju opskrbu energijom
- 3) Gradijent koncentracije- koji naglašava da se sadržaj skupno kreće iz područja velike mase u područja ograničene mase, u korist postizanja mrežne ravnoteže [20,25,29]

Fickov zakon predstavlja realiziranu koncentraciju i tok topljive mase, određene jedinice prostora, dobivene orijentiranim difuzijskim hranjenjem.

$$q_s = \frac{\Delta M}{\Delta A \Delta t}$$

U odnosu na vanjski početni mehanizma otapala i unutarnji mehanizma pobude topljivog sredstva, to gibanje možemo definirati kroz diferencijalnu jednadžbu, koja ih povezuje. Može se reći da se topljivo sredstvo unutar volumena recipijenta kreće zajedničkim naporom volumetrijskog toka otapala i Fick-ovog toka topljivog sredstva. Ovaj pojam dovodi do

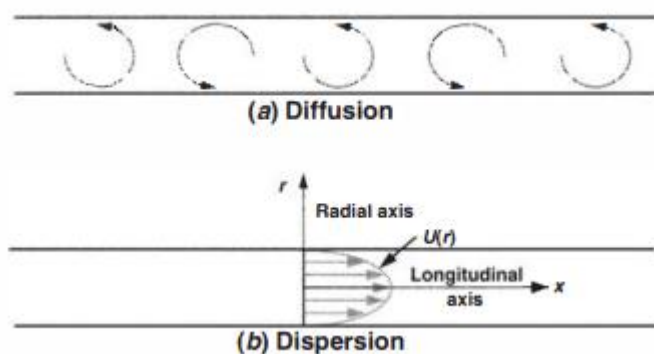
odlučnosti za superponiranjem dva odvojena toka masa u dobivanju jednog prevladavajućeg toka mase potrebnog za advektivnu difuziju.

Definirana jednačba glasi :  $\frac{\partial C}{\partial t} + V * \nabla C = D \nabla^2 C$ , koja može biti pojednostavljena implementiranjem konstantne advektivne brzine:  $\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$

U slučaju kada dominira advekcija, čestice topljivog sredstva se kreću brzinom  $u$ , a u slučaju kada difuzija dominira, čestice putuju neizmjerljivom brzinom. [25,29,75]

### Disperzija

Druga važna kvaliteta turbulencije vode, kada se ispituje količina topljivog sadržaja, je komponenta koja omogućava miješanje u većem obujmu. Čim se topljiva tvar potapa u prijemni volumen, započinje stvarnje vodikovih veza, što znatno utječe na topljivost. Ova komponenta djeluje zajedno s drugim mehanizmima transporta topljivog sredstva, a određuje se kinematičkim svojstvima protoka vode. U odnosu na difuziju, disperzija se ravnomjerno širi kroz kontrolni volumen, ovisna uglavnom o gradijentu brzine. Na skali tipičnog molekularnog poremećaja, kao učinka difuzije, disperzija se može smatrati Fick-anskim procesom difuzije, kada njih dvoje surađuju. Zbog ograničenja koja je postavila okolina i dinamična priroda vode, ovaj postupak ne pokazuje toliko obećanja kao s manjim prostorima i ograničenim domenama. Difuzija i disperzija dva su preklapajuća procesa u kojima se njihova učinkovitost određuje silom zaduženom za pomak u brzini koji uzrokuje miješanje. U statičkim prirodnim vodnim tijelima disperzija ostavlja najviše utjecaja jer na nju utječu vanjske sile, spontano razbijajući molekularne napetosti i promičući turbulentnu difuziju [20,25,29]. Druga vrsta disperzije je potrebna kako bi se objasnio pojam difuzijski raspodijeljenih koncentriranih slojeva formirani tijekom dugih i intenzivnih događaja masovnog transporta u mreži. Budući da je ovaj postupak povezan s difuzijom, kroz pretvorbu i prilagodbu turbulenciji, pomoću agitacije čestica, time se uvodi susjedna praksa miješanja predložena u nestacionarnim prirodnim tokovima. Razrjeđivanje visoko suspendiranih krutih tvari može se postići turbulentnom difuzijom koja ostvaruje svoj potencijal inertnim djelovanjem vrtloga. U plitkim tokovima, uzdužna disperzija pridonijela je razvoju topline, kroz uzdužni posmični protok, kao i masovnog oblikovanja, poprečnom difuzijom i uzdužnim transportom parcela topljivog sadržaja. [25,29,55]



Slika.2.14 Kontrast između difuzije i disperzije (adaptirano iz[20])

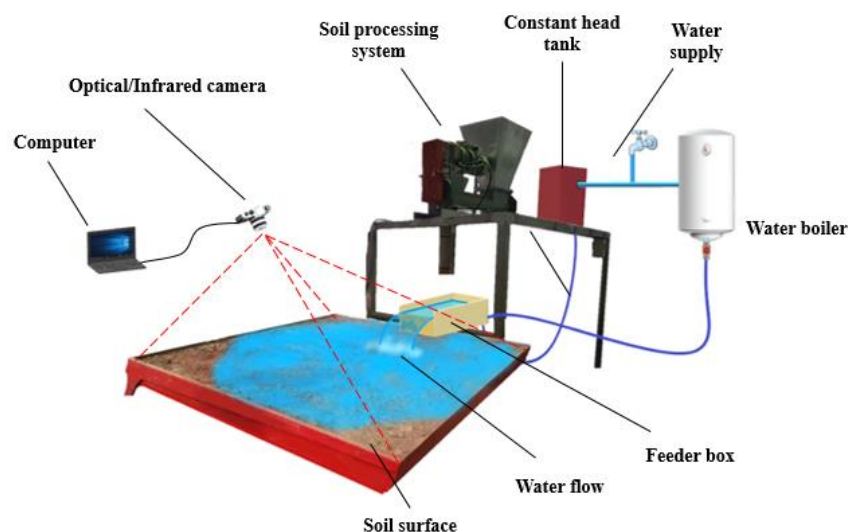


### 3. METODE I MATERIJALI : STUDIJI SLUČAJA

Sljedeće poglavlje ovog diplomskog rada opisuje okruženje i postupke koji su uključeni u niz eksperimenata izvedenih na fizičkom modelu. Prvo, početni dijelovi daju opis laboratorijskih postavki i potrebnih materijala. Nakon toga, posljednji odjeljak opisuje strukturu eksperimentalne metodologije koja se koristi za istraživanje prirode gubitka vode na točkama propusnosti.

#### 3.1. Postava laboratorija

Ekperimentalni rad je obavljen u hidrauličkom laboratoriju, vodnih resursa i okoliša (LHRA) odjela za građevinarstvo (DEC) od Fakulteta Znanosti i Tehnologije sa Sveučilišta u Coimbri (FCTUC) sa svrhom istraživanja dinamike protoka i kretanje vodećeg ruba trasera [44,47] prema točki propusnosti. Na *Slici 3.1.* prikazan je 3D prikaz sastavljenog fizičkog modela. Područje ispitivanja sastoji se od zemljanog kvadratnog žlijeba 2 x 2 m, sa kvadratnom formacijom pribadača koje čine mrežu koja je vidljiva na vrhu površine. Za drenažnu šupljinu je ostavljeno karakteristično mjesto koje je otkopano i zatrpano materijalom drukčijeg sastava od tla, u određenom vremenu izvođenja eksperimenata. Konstantni protok je ispušten kroz dovodnu kutiju, na nizvodnoj strani kvadratnog žlijeba, koja je dio vodoopskrbnog sustava. Vodoopskrbni sustav osigurava nesmetan dotok vode do dovodne kutije kroz cijev povezanu na vodeni spremnik podešen za konstantan rad, te smješten na višoj koti. Spremnik s konstantnim pritiskom napunjen je vodom iz slavine laboratorijskog opskrbnog sustava (vodljivost: 75,9–150  $\mu\text{S}/\text{cm}$  na 20 °C; pH: 6,5–7,3; zamućenost: < 1,1 NTU; O<sub>2</sub>: 1,0–3,7 mg/L; ukupna tvrdoća: 21,4–33,3 mg CaCO<sub>3</sub>/L; [87], koji je korišten za pripremu obojenih trasera. Praćenje eksperimentalnog tijeka vršeno je GoPro kamerom i Infracrvenom kamerom, tijekom cijelosti održavanja eksperimentalnih procedura. Opisana postava uređaja nije ni na koji način mijenjana tijekom vremena korištenja, s jedinom razlikom u vrsti trasera koji je korišten i ispunama za drenažnu šupljinu koje su bile mijenjane tijekom eksperimenata.



*Slika 3.1 Shematski prikaz laboratorijske postave uz korištenje infracrvene kamere*

### 3.1.1. Tlo i površinska morfologija

Eksperimentalni teren je sačinjen od 0,1 m dubokog sloja tla, točnije pjeskovite ilovače, prikupljene iz fluvijalnih naslaga s desne obale rijeke Mondego, u blizini Coimbre, Portugal, koji je ujedno korišten i u sličnim studijama [47,88]. Ključne fizikalne značajke tla korištenog u pokusima tla sa kanalima su: -Sadržaj pijeska: 79%; -Sadržaj mulja: 10%; -Sadržaj gline: 11%; -težina nasipa: 1100 kg/m<sup>3</sup>; -Dubina tla: 62 mm; -Boja: smečkasta. Između eksperimenata nismo brinuli za očuvanjem površinskog zemljanog sloja, pri čemu je došlo lokalnog raspršivanja sedimenta i deformacija uzrokovanih brazdama i naborima. Ovim se približava realnom prikazu prirodne topografije terena, koji se transformira tijekom otjecanja. [23,89]. Izmjene na eksperimentalnoj površini izrađene su samo u slučaju prekomjerne nakupine tla na jednom mjestu, kako ne bi došlo do odstupanja od predviđene ravne površine. Zbog heterogene teksture pjeskovite ilovače, tijekom širenja vode na površini tla, različita mjesta u području će imati birana mjesta preferiranog toka u pod-površinski sloj [88]. To generalno utječe na brzinu otjecanja, što može rezultirati duljim vremenom snimanja tijekom navodnjavanja tla. Eksperimenti su provedeni za različite vlažnosti tla (suho, mokro, zasićeno), radi dobivanja više rezultata za analizu.

### 3.1.2. Video sustav za snimanje

Snimanje zemljanog kanala je napravljeno optičkom kamerom Samsung Galaxy S8 (Rezolucija 1080p pri 120/90/60/50/48/30/25/24fps; 1920 × 1080 video okvira) postavljenom na uzvodni kraj kanala i infracrvena videokamera FLIR DUO PRO R (Rezolucija (broj piksela): 336 × 256; Preciznost: +/- 5 °C ili 5% očitavanja u rasponu od -25 °C do +135 °C; Spektralni raspon: 7,5 – 13,5 μm), postavljen na desnoj strani kanala. Obje kamere su fiksirane u položaju iznad kanala (0,65 m za GoPro kameru i 3,1 m za infracrvenu kameru) i poduprte metalnom strukturom, kako bi se dobio optimalan kut kamere. Optička kamera bilježi širenje vodećeg ruba uzorka boje, dajući slike za ispitivanje geometrije i dinamike poplavljenog područja [37]. Snimanje zemljanog kanala je napravljeno optičkom kamerom Samsung Galaxy S8 (Rezolucija 1080p pri 120/90/60/50/48/30/25/24fps; 1920 × 1080 video okvira) postavljenom na uzvodni kraj žlijeba i infracrvenom videokamerom FLIR DUO PRO R (Rezolucija (broj piksela): 336 × 256; Preciznost: +/- 5 °C ili 5% očitavanja u rasponu od -25 °C do +135 °C; Spektralni raspon: 7,5 – 13,5 μm), postavljenom na desnoj strani kanala. Obje kamere su fiksirane u položaju iznad kanala (0,65 m za GoPro kameru i 3,1 m za infracrvenu kameru) i poduprte metalnom strukturom, kako bi se dobio optimalan kut kamere. Zbog stupnja disperzije materijala za boju, u našem je interesu raditi s opremom koja omogućuje bolju rezoluciju iscrtavanja. Neki od nedostataka s kojima se treba posvetiti prije snimanja, uključuju osiguravanje dobrih uvjeta osvjetljenja, koji poboljšavaju sliku uzorka razrijeđene boje, a kvadratni žlijeb tla mora biti postavljen tako da se minimalizira refleksiju svjetla. Infracrvena kamera radi na principu očitavanja elektromagnetskih valova koji se prenose, zbog koeficijenta toplinske emisije vode i konstruiranja 2D slike [44,45]. Budući da su koeficijenti emisije vode i mokrog tla vrlo slični (maksimalno 15%), za radni spektralni raspon infracrvene kamere (7,5–13,5 μm), dobivene pogreške mogu se zanemariti. Tijekom eksperimenta, vodeći rub termalnog trasera snimljen je

u vremenskim intervalima snimaka snimljenih u intervalu od svake 1 sekunde. Svjetlina zagrijane vode pruža prepoznatljiv spektralni raspon koji pridonosi jasnijoj vizualizaciji kretanja topline [86]. Senzorska tehnologija ove vrste olakšava određivanje empirijskih podataka potrebnih za kvantitativnu i kvalitativnu analizu plitkih površinskih tokova.



*Slika 3.2 Pogled iz perspektive infracrvene kamere na laboratorijsku postavu*

## **3.2. Traseri**

### **3.2.1. Termalni traseri**

Ovaj će se traser koristiti u eksperimentalnim ispitivanjima za bilježenje kretanja vode kroz masovno kretanje tople vode, prateći prostorne i vremenske promjene trenda temperature. U ovom slučaju, to se odnosi na kvalitativne i kvantitativne procjene, svojstava i protočnih putanja, postignutih obradom temperaturne slike [80,88]. Topla voda dobro funkcionira s recipijentom, prilagođavajući se brzini protoka, kroz proces hlađenja i pridonosi samo manjim poremećajima uzrokovanim promjenom gustoće. U tom smislu, manje je nametljiv od drugih kemijskih i krutih trasera. Raspodjela temperature trasera u području jednakog specifičnog toplinskog kapaciteta naglašava proces kohezije (miješanje, difuzija, disperzija) tijekom vremena u prostornim primjenama malih razmjera [42]. Također zbog istaknute karakteristike toplinskog zračenja, vidljivi su kroz infracrvenu termografiju u potocima špilja i zatvorenim sustavima koji nisu izloženi svjetlu. Kretanjem termalnih trasera (prijenos topline) injektiranog u vodeni medij upravljaju tri mehanizma: kondukcija, radijacija i konvekcija. Prijenos topline može se aproksimirati Fourierovim zakonom (analogno Fickovom zakonu u 2. *Poglavlju*), koji kaže da se toplina kreće iz područja visoke energije u područja niske energije [20]. Potrebno je upotrijebiti odgovarajući volumen termalnog trasera kako ne bismo poremetili energiju protoka i kako bismo postigli odgovarajuću koncentraciju toplinskog trasera. Uglavnom kroz procese toplinske disperzije, molekularno stanje vodenog okoliša narušeno je bočnim i uzdužnim angažmanom toplinske čestice u svojstvima miješanja fluida, a pritom slobodna konvekcija i

toplinska difuzija najviše doprinose širokom širenju toplinskog gradijenta. Richmannov zakon miješanja u okolini izložene topline izjednačava da će dva identična medija imati istu konačnu temperaturu nakon postizanja termodinamičke ravnoteže koja se postiže provođenjem topline. Toplina se prvenstveno infiltrira u tlo na mjestima veće propusnosti zbog toplinske vodljivosti tla (0,37 do 1,42 W/(cm·K)), što povećava faktor emisije topline u tim područjima [42,80]. Za pokuse toplinskog praćenja, voda je zagrijana u kotlu na temperaturi od približno 80°C i ubrizgana kroz čaše (~ 20 mL) i štrcaljke na izmjeranim točkama. U pokusima je prosječna temperatura nadzemnog protoka bila u rasponu od 18,0–20,0 °C. Temperatura vode u fazi detekcije točke potonuća bila je približno 75-85°C raspoređena putem ubrizgavanja.

### 3.2.2. Obojeni traseri

Implementacija ovog trasera tijekom eksperimentalnog postupka predviđeno je za poboljšanje kvalitativnog stanja slika, u cilju definiranja površinskih brzina toka vode. Volumen otopljenog spoja dobiven je dodavanjem crvene prehrambene boje (10 mL karmozin boje (E122)) u šalicu od 200 ml i razrjeđivanjem s vodom iz slavine. Smjesa je zatim zagrijana i podijeljena u doze za praćenje od 20 mL. Čestice otopljenih tvari upravljaju mehanizmom advektivno-disperzijskog transporta, koji je u ovim uvjetima izraženiji zbog veće kinetičke energije [37]. Dvostruki traser je pod utjecajem hidro-dinamičke i toplinske disperzije, koja pokazuje varijabilnost u prostoru i vremenu zbog hrapavosti površine.

## 3.3. Eksperimentalna metodologija

Ovaj odjeljak daje sažetak eksperimentalnih ispitivanja izvedenih u svrhu istraživanja problema gubitka vode, kroz određivanje praćenja kretanja vode prema točki propusnosti. U svrhu provedbe planiranih metoda bit će potrebno predložiti ulazne podatke i parametre, relevantne za problem koji pokušavamo ispitati. Nakon toga definiran je integrirani pristup koji eksperiment dijeli u dvije faze. Prva faza sastoji se od navodnjavanja kroz koje ćemo ispitati ponašanje prirodnog kretanja vode (otjecanje, plitki potoci, itd.). A u drugoj fazi, spojiti ćemo navodnjavanje s primjenom termalnog trasera, uz korištenje instrumenata za praćenje prednjeg ruba trasera.

### 3.3.1. Laboratorijski uvjeti

Definiranje logistike za eksperimentalnu metodu istraživanja gubitka vode u određenim površinskim točkama, važno je za ispravan prikaz prirodnih uvjeta, stoga je potrebno definirati parametre eksperimenata. Slučaj studije uključuje podesivo istjecanje plitkog sloja vode, preko ravne površine tla, s jednom ili više planiranih drenažnih šupljina, koje se sastoje od sitnog ili krupnog tipa zrnatog punjenja. Stoga, kako bismo izvršili sažetu procjenu eksperimentalnih pokusa, moramo odrediti uvjete pod kojima će se svaki eksperiment izvesti. Prema tome, bitni su sljedeći parametri:

### ***Brzina protoka istjecanja***

Ovo je jedan od glavnih pokretača za postizanje stanja laminarnog protoka vode, što opisuje postavku koju pokušavamo simulirati. Prije početka procesa navodnjavanja bitno je odrediti odgovarajuću brzinu istjecanja, koja će biti dovoljna za sredstva eksperimentalnog ispitivanja, zbog ograničene geometrije površine tla. Ispust mora biti postavljen tako da ima dovoljno vremena za procjenu hidroloških uvjeta prije nego što voda prekrije eksperimentalno tlo. To je jednako manjim Reynoldsovim brojevima koji diktiraju uvjete usmjerenog protoka, koji se ne postižu u eksperimentu zbog neujednačenih brzina i dubina vode [90]. Ako se brzina istjecanja približi uvjetima turbulentnog protoka, to bi moglo poremetiti istraživanje eksperimenta, a u slučaju vrlo niskog stacionarnog protoka, vrijeme cijelog eksperimenta se značajno produljuje (što je nepovoljno u vremenski ograničenim okolnostima). Održavanje naznačene brzine protoka je imperativ za nas kako bismo kvalitativno i kvantitativno odredili ponašanje hidrološkog modela [8]. Nakon ubrizgavanja obojenog trasera, hidro-dinamička disperzija je određena brzinom protoka, tako da se istjecanje mora regulirati tako da ne uzrokuje nepravilnosti u širenju čestice otopljene tvari[37]. U tu svrhu, konstantno istjecanje primijenjeno za poplavu rezultat je spremnika vode koji stoji na fiksnoj visinskoj razlici od 1,5 metara u odnosu na dovodnu kutiju. A za provedbu druge faze eksperimenta, trebalo je kalibrirati brzinu istjecanja termalnog trasera, kako bi bio primjenjiv u poplavljenom okruženju. Primjenom termalnog trasera mijenjaju se dinamička svojstva vode, pa je potrebno voditi računa o odabiru povoljnog protoka, koji bi trebao biti nekoliko magnituda manji od propisanog protoka za navodnjavanje.

### ***Ispuna drenažne šupljine***

Propusnost će biti vodeći čimbenik u određivanju krivulje progresije naših eksperimenata. Unutar vrtače namjerava se postaviti porozni medij koji će posredovati pri crpljenju površinske vode. Brzina procjeđivanja u drenažnoj šupljini ovisit će o granulo-metrijskom sastavu materijala korištenih kao ispuna. S obzirom na to, u pokusima će se koristiti grubo zrnati materijal koji predstavlja kontrast u odnosu na okruženje glinene teksture, a bit će razvrstan u skupine ovisno o veličini zrna. To je uključivalo grubi šljunak i grubi pijesak, kako bi se utvrdile varijacije u vremenu između pristupa i izlaska iz drenažne šupljine. U pokusima će se koristiti materijal koji predstavlja kontrast u odnosu na okruženje fine teksture, a bit će razvrstan u skupine ovisno o veličini zrna. To je uključivalo grubi šljunak i grubi pijesak, kako bi se utvrdile varijacije u vremenu između ulaska i izlaska iz drenažne šupljine. Promjer drenažne šupljine mora se odabrati prema kapacitetu ispune u najpropusnijem stanju jer je volumen šupljine ograničen ovisno o prostoru između zrna [85]. Sloj zemlje oko ispune, kao i medij za filtriranje, morali su biti dobro zbijeni, kako bi se spriječilo popuštanje rubova zemlje ili kolaps zrnate strukture, kao posljedica ubrzanog protoka na tom mjestu ili vode. pritisak. Zrnati materijali čine najbolje rješenje za filtriranje za laminarnog toka vode , zbog svojih prevladavajućih drenažnih svojstava [23]. Zbog gravitacijske sile blizu rubova drenažne šupljine, brzina tekućine raste eksponencijalno, uzrokujući povećanje gradijenta energije od kretanja između grubo oblikovanih zrnaca. Zbog turbulencije ili općenito, vode koja brzo teče u drenažnu

šupljinu, gornji sloj zrna se uzdiže pri čemu uzgon nadvladava utjecaj tromosti, koji ga vuče prema dnu. U slučaju da ispuna nije dobro zbijena, više vode ulazi u drenažnu šupljinu, iako ovisno o viskoznosti vode, kao i o veličini i gustoći zrnaca, što utječe na brzinu taloženja zrnaca [66]

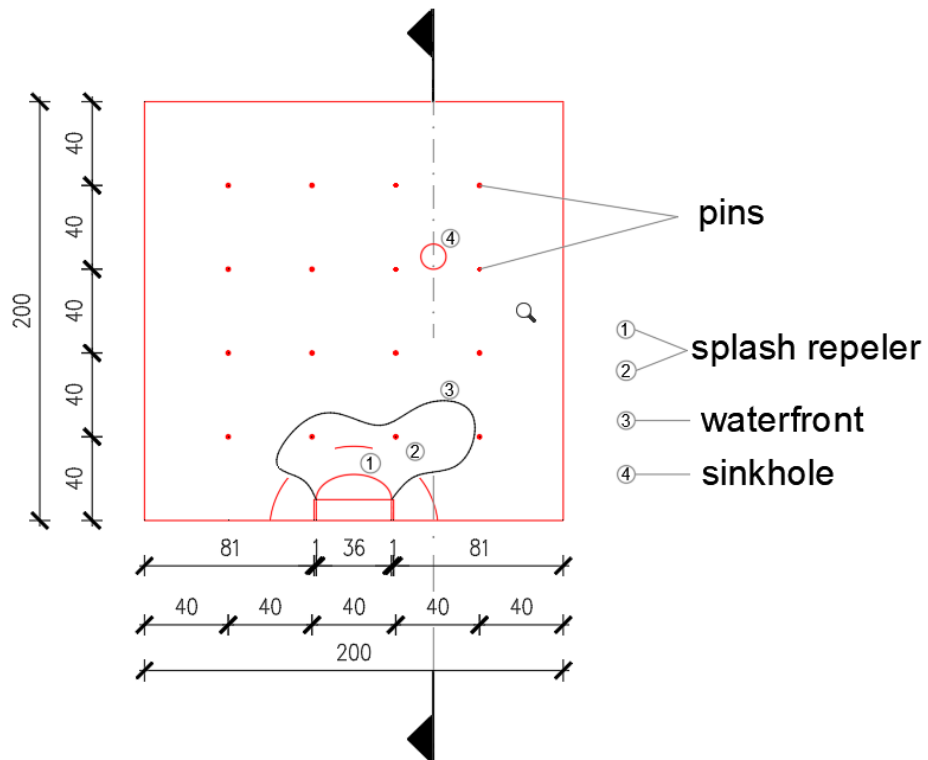
### ***Razmještaj drenažnih šupljina***

Ovaj je parametar važan za proširenje mreže za preusmjerenje vode i omogućuje istovremeno promatranje različitih hidro-dinamičkih i fizikalnih promjena koje se događaju u pojedinačnim drenažnim šupljinama ili između njih. Ovisno o broju drenažnih šupljina koje odaberemo, smanjujemo vrijeme detekcije, zbog povećanja pristupačnih puteva prema točki propusnosti. To je predstavljeno kroz protočnu dužinu, koja odgovara razini hidrauličke povezanosti u kanalu tla i na koju najviše utječu topografski čimbenici tla [84]. S obzirom na to da nemamo vegetacijski pokrov, a mikro-topografske značajke nisu izražene zbog izravnate i neispucane površine, to doprinosi ukupnoj povezanosti potencijalnih putova otjecanja. Povezanost tokova vode dobro funkcionira u povećanju brzina oko površine i ukupnog protoka sustava [1,84]. Broj drenažnih šupljina će se uzastopno povećavati nakon niza eksperimenata, a promjer drenažnih šupljina također će se zadržati istim kako bi geometrijski uvjeti pod kojima se izvodi eksperiment ostali neizmjenjivi.

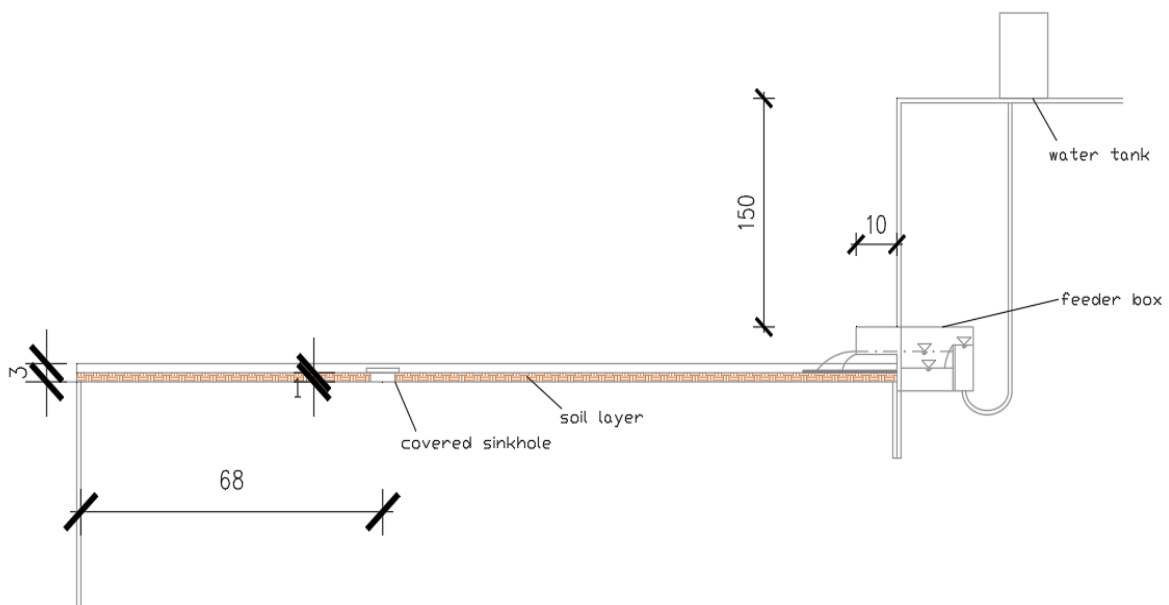
### **3.3.2 Faza navodnjavanja**

Nakon uvođenja parametara opisanih u "*Odjeljku 3.3.1*", oni se implementiraju u fazi navodnjavanja našeg eksperimenta. Fizički model smješten u laboratoriju hidraulike uspostavljen je tijekom nekoliko tjedana za eksperimentalna ispitivanja koja uključuju zračno natapanje površine tla. Kako bismo opisali vremensku i prostornu varijabilnost kretanja vode kroz površinu, morali smo uhvatiti proces koji je u tijeku u stvarnom vremenu i nakon toga odrediti održive reprezentativne vremenske korake. Poplava je uglavnom obavljena tijekom kasnijih jutarnjih sati, zbog boljeg osvjjetljenja u laboratoriju. Drenažna šupljina ili nije bila izgrađena u fazi navodnjavanja ili je zatrpana. Određene točke na površini tla označene su sa 16 pribadača, postavljenih na jednakoj udaljenosti od 40 cm jedna od druge i rubova kvadratnog žlijeba, kao što je prikazano na *Slici 3.3*. Ova je formacija predstavljala mrežu sa svakom pribadačom kao izvoristem za ubrizgavanje dvostrukog trasera, negdje nakon što obala prođe označenu točku. Istjecanje vode pokrenuto je okretanjem ventila spremnika za vodu, čime se počela puniti kutije za navodnjavanje do određene razine. U tom trenutku voda je počela istjecati na nizvodnom kraju kvadratnog žlijeba uz konstantan protok od  $Q_F = 0,145$  L/s, prikazan na *Slici 3.4*. GoPro kamera je počela snimati, prateći napredovanje valne fronte preko površine tla. Voda je polako počela prekrivati označenu točku na površini, kroz lateralno i medijalno širenje, a kao što je spomenuto dvostruki traser je ubrizgan nakon širenja vodenog pokrova. Širenje uzorka otopine u vodi zabilježeno je za procjenu brzina nadzemnog protoka na različitim točkama, praćenjem kretanja prednjeg ruba trasera. Injekcije trasera ponovljene su na istim mjestima kako bi se mogla izvršiti procjena brzine s minimalnom marginalnom pogreškom. Proces navodnjavanja je trajao sve dok voda nije prekrila cijelu površinu i dok se nije postigla prosječna dubina od oko 1-2 cm. Tada bi se zaustavio dotok vode i iskopala bi se vrtača pomoću cilindra od 5 cm, tako da se poplavljena površina može koristiti u drugoj fazi pokusa. Poplavljeno područje služi kao ploha za vizualizaciju hidrauličkih procesa putem aplikacija za praćenje. Razdoblje navodnjavanja variralo bi ovisno o sadržaju vlage u tlu, na

primjer, ako je tlo zasićeno, tada bi voda ravnomjerno postigla određenu dubinu u kraćem vremenskom razdoblju, kao rezultat zasićenja i viška infiltracije (razmotreno u 2. *Poglavlju*). U tom slučaju, zasićeno ili mokro tlo je poželjnije sa stajališta uštede vremena nego suhi sloj tla.



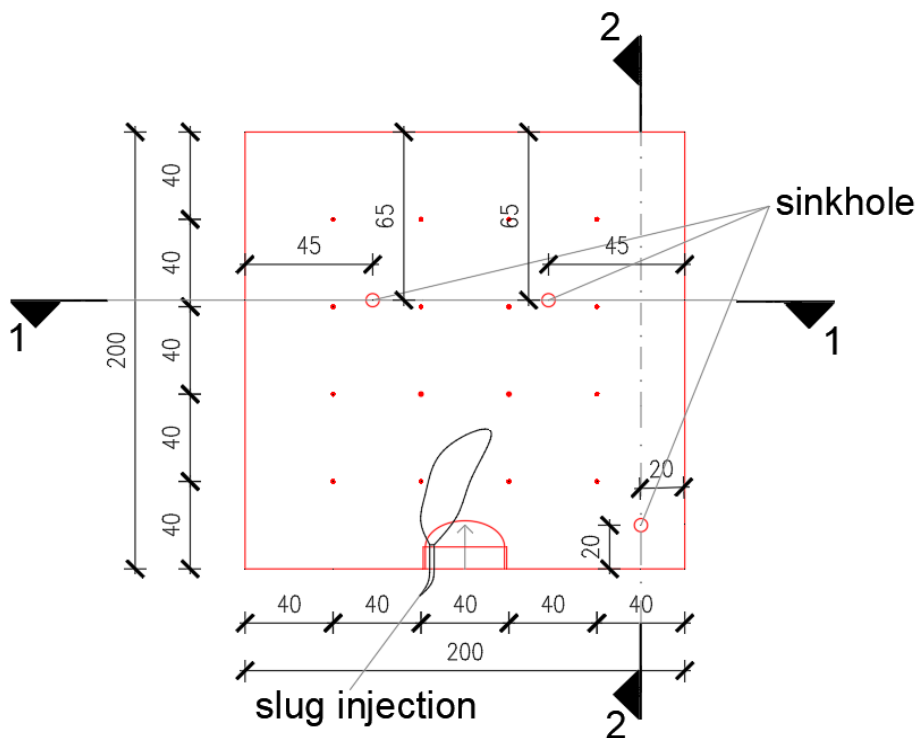
Slika 3.3 Tlocrt kvadratnog zemljanog žlijeba tijekom faze navodnjavanja ( *M* 1:100)



Slika 3.4 Poprečni presjek laboratorijske postave tijekom faze navodnjavanja ( *M* 1:100)

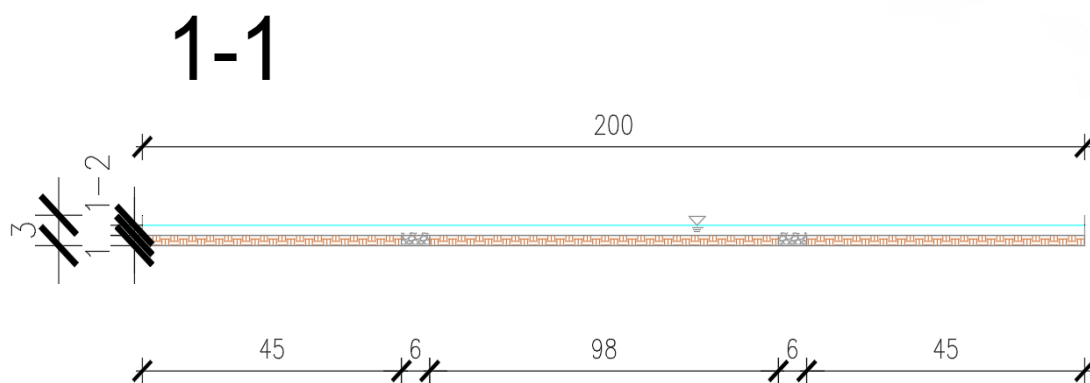
### 3.3.3 Faza detekcija točke propusnosti korištenjem termalnog trasera

Druga faza eksperimenta nastavak je eksperimentalnog pokusa opisanog u prethodnom *Odjeljku 3.3.2*. Laboratorijski parametri opisani u *Odjeljku 3.3.1* kombinirat će se u studijskom slučaju za svako eksperimentalno ispitivanje koje uključuje otkrivanje točke propusnosti i mijenjati nakon svakog eksperimenta tako da se testiraju različiti uvjeti. Stoga se kombinacije parametara prave s jednom od dviju vrijednosti, protoka tople, tri vrste materijala ispune drenažne šupljine i jedne do tri predviđene pozicije drenažnih šupljina. Iz *Slike 3.5* vidljivo je da je svaka vrtača iskopana na određenom mjestu u ravnini tla, nakon čega se puni granuliranim materijalom različite propusnosti, kao što je prikazano na *Slici 3.6* i *Slici 3.7*. Prvi pokusi su rađeni s kombinacijama koje su uključivale 1 drenažnu šupljinu, a nakon toga su naknadno iskopane drenažne šupljine nakon testiranja svakog mogućeg skupa kombinacija koje su uključivale jednu ili više drenažnih šupljina. Položaji drenažnih šupljina odabrani su u skladu s kretanjem vode zabilježenim u *Odjeljku 3.3.2* tako da su postavljeni na udaljenosti (predloženoj na *Slici 3.5*) koja omogućuje jasnu koncentraciju i tok termalnog trasera, vidljivim kroz infracrvenu sliku.

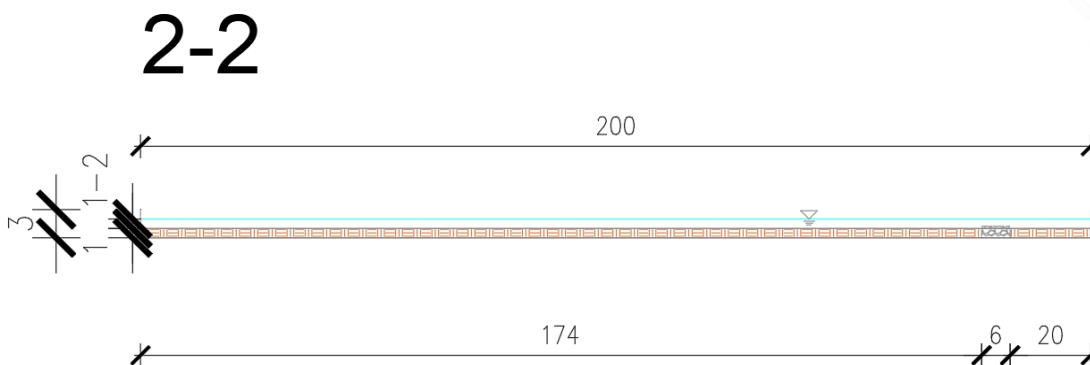


*Slika 3.5 Tlocrt kvadratnog zemljanog žlijeba sa 3 drenažne šupljine tijekom faze detekcije (M 1:100)*





Slika 3.6 Horizontalni presjek kvadratnog zemljanog žlijeba kroz 2 nizvodne drenažne šupljine tijekom faze detekcije (M 1:100)



Slika 3.7 Horizontalni presjek kvadratnog zemljanog žlijeba kroz 1 uzvodnu drenažnu šupljinu tijekom faze detekcije (M 1:100)

Prije primjene termalnog traseira potrebno je konfigurirati brzinu istjecanja putem volumetrijskog mjerenja. Tijekom istjecanja tople vode nekoliko uzoraka je izmjereno tijekom raspona od 10 sekundi i zatim izvagano da se odredi vrijednost protoka istjecanja. Nakon čega je napravljena usporedba između protoke, te su u narednim pokusima korištene dvije brzine protoka:  $Q_{D1}=0,025$  L/s i  $Q_{D2}=0,035$  L/s, termalnog traseira. Kako bismo provjerili je li okvir infracrvene kamere centraliziran tako da hvata rubove kanala, stavili smo 4 šalice vruće vode na svaki kut kanala. Vruća voda je implementirana u vodenu površinu nastalu navodnjavanjem kvadratnog žlijeba, kroz injektiranje na uzvodnom kraju kvadratnog žlijeba, kao što se može vidjeti na Slici 3.5. Za početni eksperiment prvo je korištena niža brzina protoka, a zatim viša vrijednost; ovaj se redoslijed održavao tijekom svih pokusa. Infracrvena kamera bilježila je kretanje prednjeg ruba traseira sve dok nije dosegao točku (ili točke) propusnosti, kao i nakon toga kako bi dokazala točnost eksperimenta.

## 4. ANALIZA I REZULTATI

Ovo se poglavlje sastoji od analize i komentiranja rezultata prikupljenih iz eksperimentalnih ispitivanja provedenih u 3. Poglavlju i podijeljen je u dvije faze. U prvom dijelu ovog poglavlja rezultati su prikazani vremenskim slijedom kretanja vode, kao i grafikonima i mapama koje označavaju svojstva i procese na bazi vode. Drugi dio poglavlja, prikazuje rezultate termografskog postupka za otkrivanje točke propusnosti u kvadratnom zemljanom žlijebu, zajedno sa opisom tih rezultata.

### 4.1 Faza navodnjavanja

Prva faza eksperimenta opisuje sustav plitke vode, procjenjujući glavne aspekte vode koja se širi preko površine tla. Vizualne snimke i temperaturne slike služe kao osnova za izvlačenje kvantitativnih i kvalitativnih podataka. Kod eksperimenata izvedenih na kvadratnom zemljanom žlijebu, validacija podataka ovisi o uvjetima i opremi koja se koriste tijekom eksperimentalne procedure [86]. Analiza faze navodnjavanja provodi se od trenutka kada voda stupi u žlijeb, te sve dok ne prikupimo posljednji podatak.

#### 4.1.1 Površinsko širenje vode

Slijed na *Slici 4.1* predstavlja razvoj rive (prednjeg ruba vodene površine) od vremena neposredno nakon početka eksperimenta, te sve dok se ne poplavi zemljana površina. Vizualni slučajevi potopljene površine, odabrani su na temelju veličine akumulirane vode na površini tla i vremenske razlike između pojedinih slučajeva poplavljene površine. Spomenuti faktori objašnjavaju kontinuirano širenje rive koja je prikazana kroz slijed slika, koje imaju odgovarajuću mjernu vremensku i prostornu razliku između područja prekrivenih vodom.



t=0s



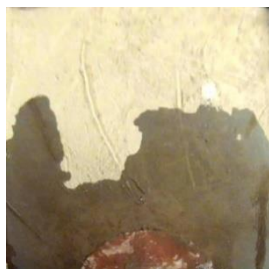
t=30s



t=60s



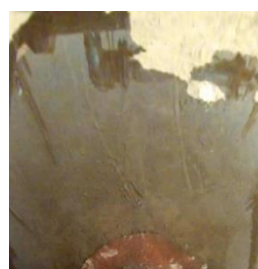
t=120s



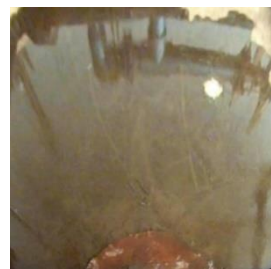
t=180s



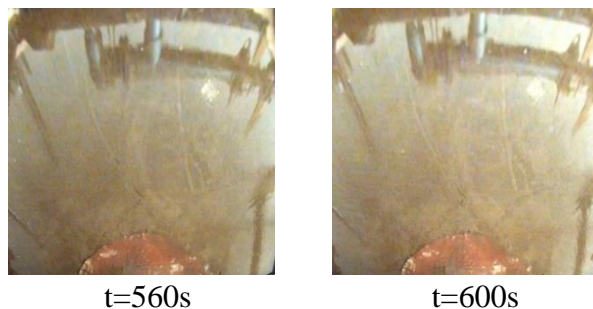
t=240s



t=360s



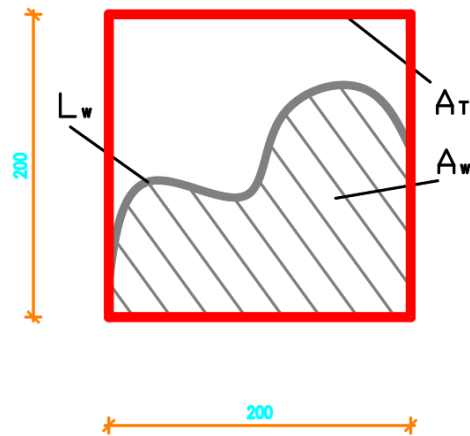
t=480s



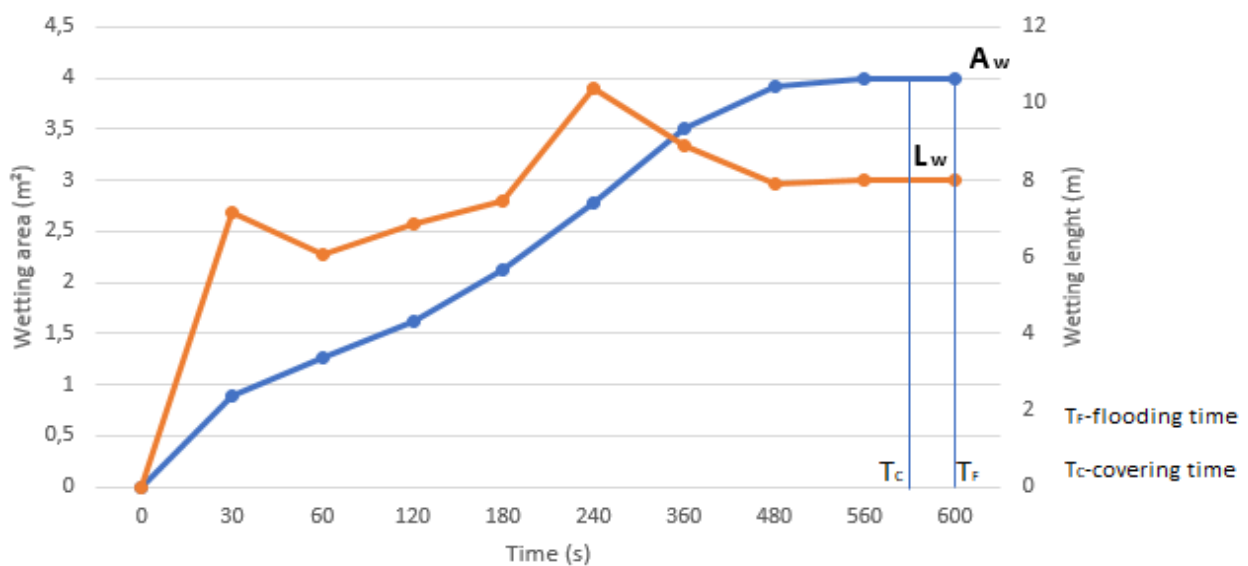
Slika.4.1 Tlocrtni prikaz širenja plitkog vodenog sloja preko zemljane površine

Na početku eksperimenta, brzina rive odgovara brzini izlivanja vode, zbog zanemarivog trenja između vodenog sloja i glatke prostirke. Voda koja izlazi iz dovodne kutije na uzvodnom dijelu, kreće se prvenstveno u uzdužnom smjeru prema nizvodnom dijelu kvadratnog žlijeba. Iako je na početku protok preusmjeren bočno zbog neravnomjernog istjecanja vode iz dovodne kutije, sve dok protok istjecanja ne ostvari jednoličnu izljevnu površinu. Tijekom prvih 20 sekundi, riva se prostire u svim smjerovima, kao posljedica koncentriranog kretanja vode kroz jaruge i druge nepravilnosti (malene depresije, pukotine, brazde) na površini tla. Sa prolaskom vremena brzina rive postupno se smanjuje, zbog trenja uzrokovanog heterogenom hrapavošću površine, s iznimkama na mjestima gdje se brzina povećava zbog povezivanja susjednih tokova ili 'streamlininga'. U vremenskoj točki od 30 sekundi, na *Slici 4.3*, može se primijetiti da je ostvaren eksponencijalni porast poplavljenog područja i opsega, prilikom uspoređivanja vrijednosti prirasta trenutnog vremenskog inkrementa s onima koji slijede. Veća vrijednost opsega rive je rezultat nepravilnog plašnog protoka preko kvadratnog žlijeba, a brzi porast poplavljenog područja je produkt brzine rive koja se postepeno smanjuje, s tim da je u tom vremenu još na maloj udaljenosti od točke istjecanja [91]. Nakon polu-minutne dionice (30 sekundi), vodeni tokovi sa svih strana su spojeni, te se plašni protok nastavlja širiti bez diskontinuiteta na rivi, kao što je prikazano na *Slici 4.3*. s padom vrijednosti na funkciji opsega potopljene površine. Od prvih 30 sekundi do 120 sekundi, poplavljeno područje se širi ujednačenom brzinom, budući da se zbog spore brzine infiltracije, većina volumena vode distribuira na površini, pri čemu se volumen vode povećava u određenim spuštenim područjima [92]. Tijekom vremena između 60 i 120 sekundi, riva doseže rubove kvadratnog žlijeba i počinje se širiti prema nizvodnom kraju kao što je prikazano na *Slici 4.1*, te za to vrijeme, razvoj poplavljenog opsega je gotovo linearno, *Slika 4.3*. Na samom rubu kvadratnog žlijeba brzina je 0, zbog 'no-slip' uvjet na tom mjestu, tako da je kretanje vode određeno nadolazećim tokom i njegovom refleksijom od rub žlijeba, što rezultira povećanjem volumena duž ruba [26]. Porast poplavljenog područja relativno je linearan tijekom 4 minute, točnije od 120 sekundi do 360 sekundi, kako je prikazano na *slici 4.3*. Za to vrijeme se doseže maksimalna vrijednost poplavljenog opsega, zbog neznatno nadvišene površine i teksture na lijevom dijelu kvadratnog zemljanog žlijeba, koja se s vremenom poplavi uslijed uspona razine vode. Jednom kada voda dođe do drenažne šupljine, polako počinje infiltrirati u zrnatu strukturu. Zbog različite konzistencije drenažne šupljine i tla, voda se kreće oko ruba šupljine i spaja zajedno s vodenim tokom s lijeve strane koji se proširio do nizvodnog kraja žlijeba (*Slika 4.1*). Na *Slici 4.3*, do 480-te sekunde, riva postepeno napreduje, dok se poplavljena površina povećava u vrijednosti, a opseg se smanjuje. Od tog vremena voda na nizvodnom kraju doseže značajnu dubinu (blizu 3 cm) i nastavlja se jednoliko širiti prema donjem desnom kutu. Proces prekrivanja posljednjeg kuta kvadratnog žlijeba i drenažne šupljine traje 2 minute, zbog stope procjeđivanja kroz šupljinu i zakrivljene površine duž desnog ruba žlijeba. To se događa u vremenskom intervalu od 480 do 600 sekundi, gdje funkcije površine i opsega na *Slici 4.3* postižu približno konstantnu vrijednost. Eksperiment je dovršen u 600 sekundi, te je za to vrijeme sloj vode postigao

značajnu visinu od ~ 5 cm. To predstavlja dobar vremenski okvir kada se uzima u obzir erozivna energija koju bi kultivirao veći protok, kao i optimalni protok podešen ovisno izlaznoj površini[93]. Na temelju osnovne stope infiltracije za tlo od pješčane ilovače (20-30 mm/h) i uzimajući u obzir trajanje eksperimenta, možemo utvrditi da voda nije infiltrirala duboko u profil tla da uspori površinsko otjecanje prilikom curenja na dnu kvadratnog zemljanog žlijeba.



Slika.4.2 Ilustrativna skica potopljene površine

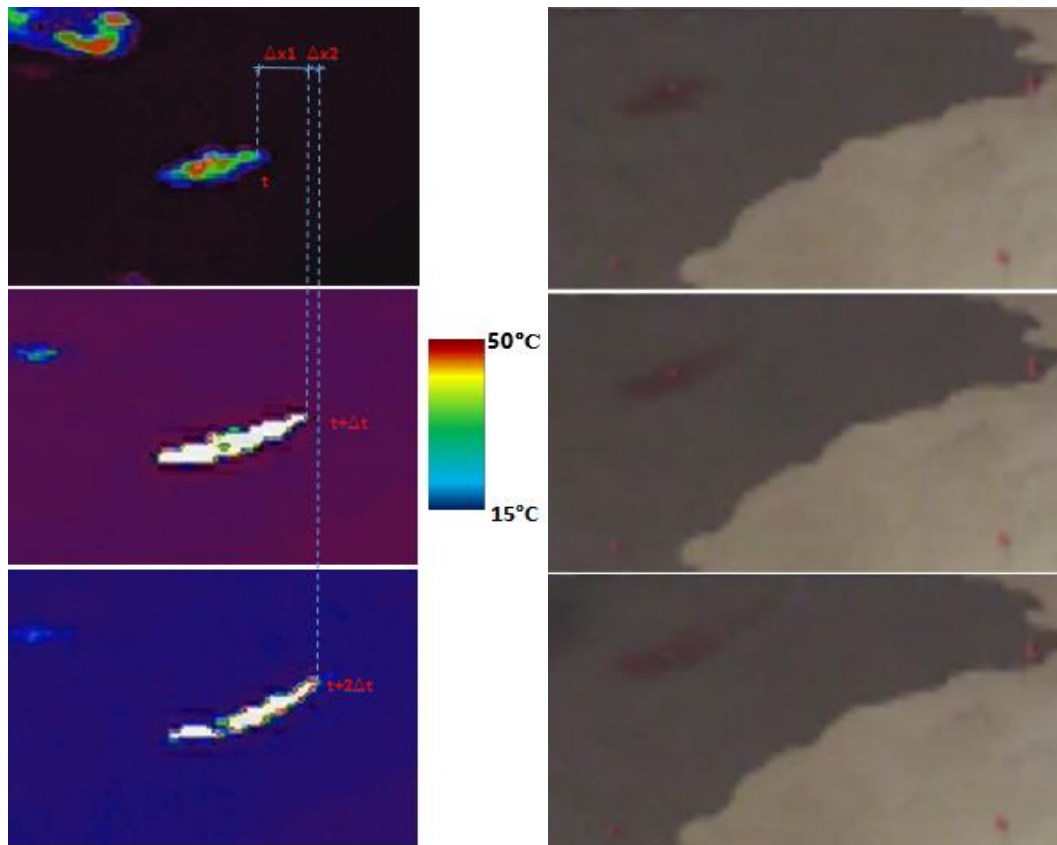


Slika.4.3 Graf razvoja poplavljene površine ( $A_w$ ) i poplavljenog opsega ( $L_w$ ), sa legendom

#### 4.1.2 Polje brzina

Brzine plitkog nadzemnog protoka su definirane infracrvenim termografskim snimanjem i softverskom analizom kretanja vode. Proces praćenja kretanja neprozirnog uzorka proveden je s obojenim i termalnim traserom. Međutim, termalni traser je omogućio jasnije rezultate u odnosu na obojeni traser, koji je pretrpio gubitak transparentnosti, kao što je prikazano na Slici 4.4. Brzina termalnog uzorka uzeta kao primjer, iz Slike 4.4, izračunata je kroz uobičajenu jednadžbu brzine  $v = \Delta x / t$ . Pri čemu vrijednost  $\Delta x_1$  predstavlja udaljenost između vodećeg ruba uzorka za vrijeme ( $t$ ) i vremena ( $t + \Delta t$ ), a vrijednost  $\Delta x_2$  predstavlja udaljenost između

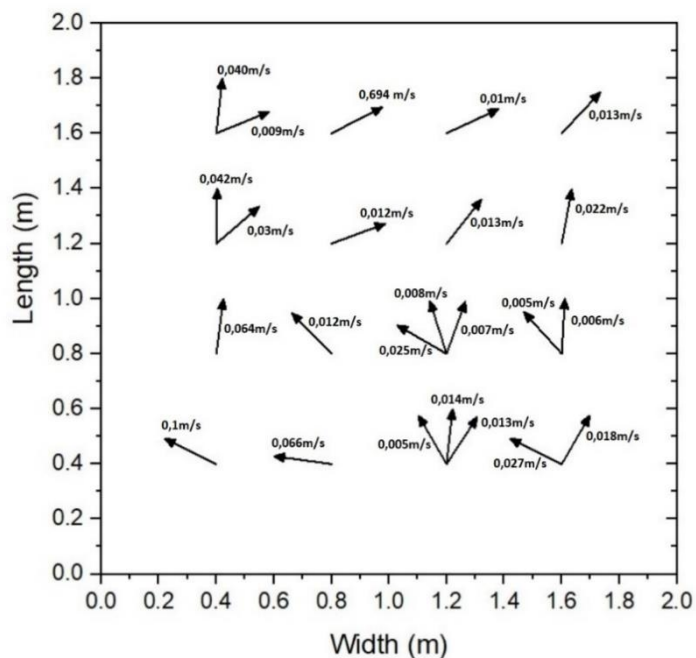
vodećeg ruba uzorka za vrijeme ( $t$ ) i vremena ( $t+2\Delta t$ ) [37,47]. Slike su snimljene jedna za drugom u sukcesiji, sa intervalom od 1 sekunde. Na mjestu ubrizgavanja, termalni uzorci su se širili kroz vodeni medij, zbog vodećih procesa konvekcije i termalne difuzije. Nakon kretanja termalnog uzorka, toplinska energija se s prenosi i s vremenom gubi, zbog istovremenih procesa: kondukcije, radijacije i evaporacije [25,94]. Budući da se ubrizgavanje vrućeg bojila dogodilo malo, nakon što je riva prešla mjesto označeno pribadačom, kretanje toplinskog uzorka je vrlo izražajno. To je rezultat toplinske energije koja ulazi u vlažno tlo stvarno brzo (uslijed plitke dubine poplavljenog područja), jer ono ima isti koeficijent emisije kao i voda [77].



*Slika 4.4 Usporedba transportnog vremena termalnog ( lijevo ) i obojenog ( desno ) trasera*

Da bismo shvatili ponašanje toka vode tijekom faze navodnjavanja, promatrajući promjenu vrijednosti i smjera brzine počevši od svake točke ubrizgavanja trasera, definirali smo mapu brzina *Slika 4.5*. Dužina putovanja svakog termalnog uzorka, od njegove točke ubrizgavanja, izračunata je korištenjem softverskih aplikacija. Prvo su za svaku injekciju trasera odabrane tri reprezentativne slike, predstavljene kao termografske projekcije, snimljene u trenucima koji pokazuju razvoj termalnog traga. Za svaki termalni uzorka, vektor pomaka je konstruiran u AutoCAD-u, povezivanjem početnog vodećeg ruba trasera (gornji prikaz- *Slika 4.4*) s projiciranom koordinatom koja definira vodeći rub trasera nakon navedenog razdoblja (donji prikaz -*Slika 4.4*). Koordinate vodećeg ruba termalnog uzorka morale su biti definirati za približno istu temperaturu, koja odgovara za oba termalna uzorka, kao što je prikazano na *Slici 4.4*. Nakon što je na slici imenovan vektor pomaka, korekcija slike vektora je izvršena putem CamScannera koji omogućuje mijenjanje perspektive slike. Te je dalje slika obrađena u GIMP softveru za precizno prilagođavanje i mjerenje dužine putovanja uzorka s obzirom na stvarnu

geometriju kvadratnog žlijeba. Kroz ovaj postupak i ručno izračunavanje definirane su vrijednosti dužine putovanja uzorka trasera, kao i vrijednost vektora brzine i njegov smjer u odnosu na rubove kvadratnog žlijeba. Gibanje i raspodjela energije vrućeg bojila ovisi o topografskim, hidrauličkim i toplinskim karakteristikama okoline, koje su isto tako važne za definiranje vektora brzine na *Slici 4.5*. Mapa brzine je konstruirana zadavanjem vrijednosti i smjera brzine izmjerene termografskim praćenjem traga vruće vode počevši od svake točke u mreži predstavljene pribadačama. Gledajući *Sliku 4.5* možemo vidjeti da brzina doživljava najviše vrijednosti tijekom početne faze navodnjavanja i duž cijele lijeve strane kvadratnog žlijeba. Razlog za to je veća brzina protoka na lijevoj strani kvadratnog žlijeba, ali također i nekonzervativni aspekt termalnog trasera, koji doprinosi nižoj toplinskoj difuziji za veće vrijednosti protoka (npr [37]). Zbog volumena od 20 ml i temperaturnog praga od oko 50 ° C, termalni uzorak je držao veću temperaturu duže bez iščezavanja. Prema tome je u tim slučajevima bio više izražajni na infracrvenoj slici, nego u slučaju kada smo zabilježili niže brzine (npr. [44,45]). U nekim točkama ubrizgavanja trasera na *Slici 4.5*, širenje termalnog traga je usmjereno u dva ili tri smjera, zbog varijacija u profilu brzina u tim točkama [26]. Također je važno istaknuti da ubrizgavanje trasera igra veliku ulogu u zadavanju smjera vektora brzine. U slučaju nižih brzina protoka u točki ubrizgavanja se dešava poremećaja protoka, zbog diskontinuiteta među strujnicama, a za veće vrijednosti brzine, vruće bojilo se samo uklopi sa protočnim linijama toka vode (npr. [45,77]). U slučajevima kada konvekcija i difuzija nadmašuju brzinu navodnjavanja, dešava se bočno i uzdužno odvajanje vektora brzine. Značajno niže vrijednosti brzine vide se u drugom i gornjem redu na *Slici 4.5*, kao posljedica kratke duljine putovanja termalne oznake kroz veće vremensko razdoblje, prema rivi (koja se širi polako) ili rubu kvadratnog žlijeba. Termalni uzorak točno na vrhu ili veoma blizu rive imat će veće vrijeme koncentracije, zbog energije koju topla vode razmjenjuje s tlom, dok se kreće. Nakon nekoliko injekcija trasera, potrebno je razdoblje hlađenja tako da poplavljeno područje postigne toplinsku ravnotežu kroz hlađenje vode.



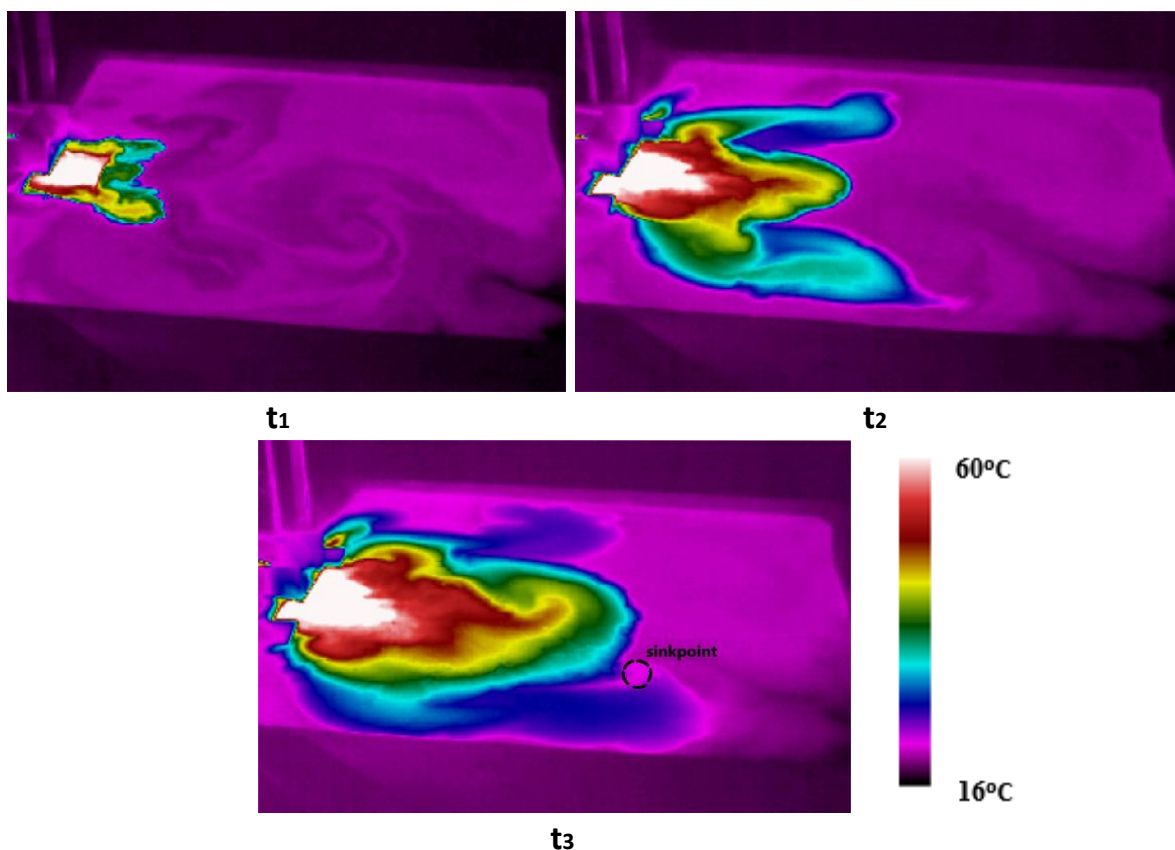
*Slika 4.5 Mapa brzina*

## 4.2 Faza detekcije točke propusnosti

Pojedinačna analiza svih eksperimentalnih proba navedenih u *Poglavlju 3.*, koji su određeni kombinacijom varijabilnih parametara, je preopširna za potrebe ovog magistarskog rada. Zato ćemo tijekom naše analize pregledati slučajeve s najpovoljnijim i najobuhvatnijim rezultatima. Sve za potrebu kvantitativne i kvalitativne razrade procesa detektiranja za sve tri pozicije drenažne šupljine u kvadratnom zemljanom žlijebu. Svi naknadno opisani eksperimentalni slučajevi imali su veću propusnost drenažne šupljine.

### 4.2.1 Analiza detekcije za slučaj 1 drenažne šupljine

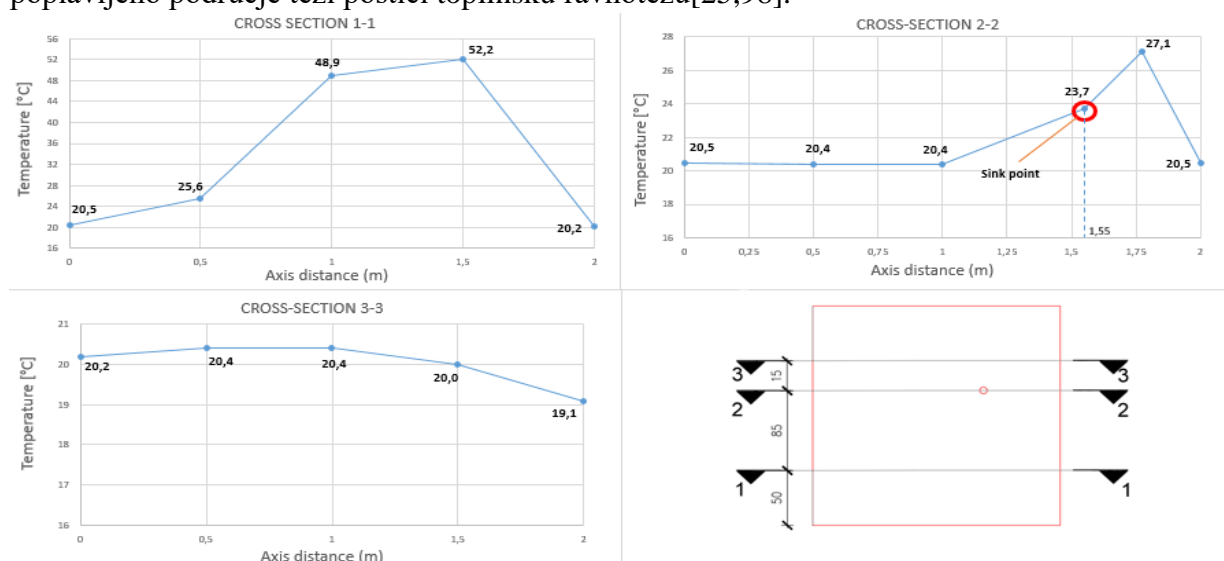
Infracrvene termografske figure prikazane na *Slici 4.6.*, prezentiraju kretanje tople vode prema drenažnoj šupljini, koja se sastoji od zrna šljunka; u zadanom vremenskom okviru, pod konstantnim protokom istjecanja  $Q_{D2}$  (spomenutog u *Odjeljku 3.3.3*). S obzirom da je prvi set eksperimenata izveden samo za jednu drenažnu šupljinu, imali smo 4 različita slučaja za analizu. Slučaj koji je doprinio najpovoljnijim rezultatima je onaj na *Slici 4.6.*, koji uključuje veći protok istjecanja i veću propusnost drenažne šupljine.



Slika 4.6 Praćenje kretanja termalnog traseera prema drenažnoj šupljini

Prije injektiranja tople vode, voda koja se pokriva površinu tla nakon navodnjavanja, počinje se kretati (privlačiti) prema izgrađenoj drenažnoj šupljini koja u ovom slučaju pokazuje visoku stopu propusnosti. Kretanje vode prema ovoj točki je stanje činjenice da se voda kreće od položaja višeg hidrostatskog tlaka prema nižem hidrostatskom tlaku [24]. To, uz gravitaciju i

brzinu istjecanja trasera je jedan od čimbenika koji utječu na smjer u kojem će se termalni uzorak širiti. Što se tiče brzine istjecanja na Slici 4.6., tijekom početne faze  $t_1$  počinju se formirati tri probojne krivulje sa obje strane i u sredini termalnog traga; ova formacija je izraženija u kasnijim fazama  $t_2=58$  s i  $t_3=2,07$  min. To se događa, zbog velike brzine kojom topla voda istječe i počinje se širiti u uzdužnom smjeru. Iako neposredno nakon početnog unosa tople vode smjer strujanja malo odstupa, zbog poremećaja stvorenog sudarom od poplavljenju površinu, te se počinje širiti s obje strane središnje osi kvadratnog žlijeba. Osim navedenih faktora, termalna svojstva vode također imaju utjecaj na oblikovanje termalnog traga. Kao što je već spomenuto, zbog velikog protoka istjecanja i privlačnih sila prema točki propusnosti, promatramo razvoj termalnog traga, ali ti čimbenici također pouspješuju brzinu uzdužne hidrodinamičke disperzije (konvekcija + difuzija) [42,96]. U trenutku  $t_1$  na Slici 4.6., ovaj se fenomen ne može prepoznati zbog: - akumuliranja tople vode na uzvodnom kraju, - velikog specifičnog toplinskog kapaciteta vode (više vremena potrebno za zagrijavanje i hlađenje), -malog vremenskog razdoblja širenja topline u odnosu na početak eksperimenta. Naredna infracrvena slika snimljena u trenutku  $t_2$  daje uočljiviji oblik termalnog traga. Zbog svojstava miješanja i raspodjele kinetičke energije, razvijene probojne termalne krivulje sa obje strane od središnje osi, pokrivaju veću površinu ali s nižom vrijednošću temperature u usporedbi sa termalnom krivuljom u sredini. Područje oko središnje osi zadržava povišenu temperaturu, zbog konstantne visoke brzine istjecanja, koja koncentrira protok uzdužno[98]. Slika snimljena u trenutku  $t_3$  predstavlja približno vrijeme otkrivanja točke propusnosti, koja je zapažena izduživanjem vodećeg ruba termalnog traga prema toj točki i smanjenom temperaturom desnog probojnog temperaturnog traga oko te točke. Za daljnju analizu temperaturnog gradijenta, za pojedinu točku na poplavljenoj površini za promatrani slučaj u vremenu  $t_3$  (Slika 4.6.), konstruirani su temperaturni grafovi na odgovarajućim poprečnim presjecima kao što je prikazano na Slici 4.7. Prema Slici 4.7., najveće vrijednosti temperature postignute su najbliže uzvodnom kraju kvadratnog žlijeba, na udaljenosti od 1-1,5m, zbog već navedenih razloga. U razini s točkom propusnosti vrijednosti temperature su usklađene na lijevoj strani žlijeba i zatim doživljavaju eksponencijalni uspon od sredine prema desnoj strani žlijeba. Registrirana vrijednost temperature na točki propusnosti je  $T=23,7^{\circ}\text{C}$  u skladu s izduženim temperaturnim tragom, prikazanim na Slici 4.6. Za konačni poprečni presjek, vrijednosti temperature oko poplavljenog područja uglavnom su ujednačene, s većim vrijednostima nego na početku eksperimenta, jer poplavljeno područje teži postići toplinsku ravnotežu[25,98].

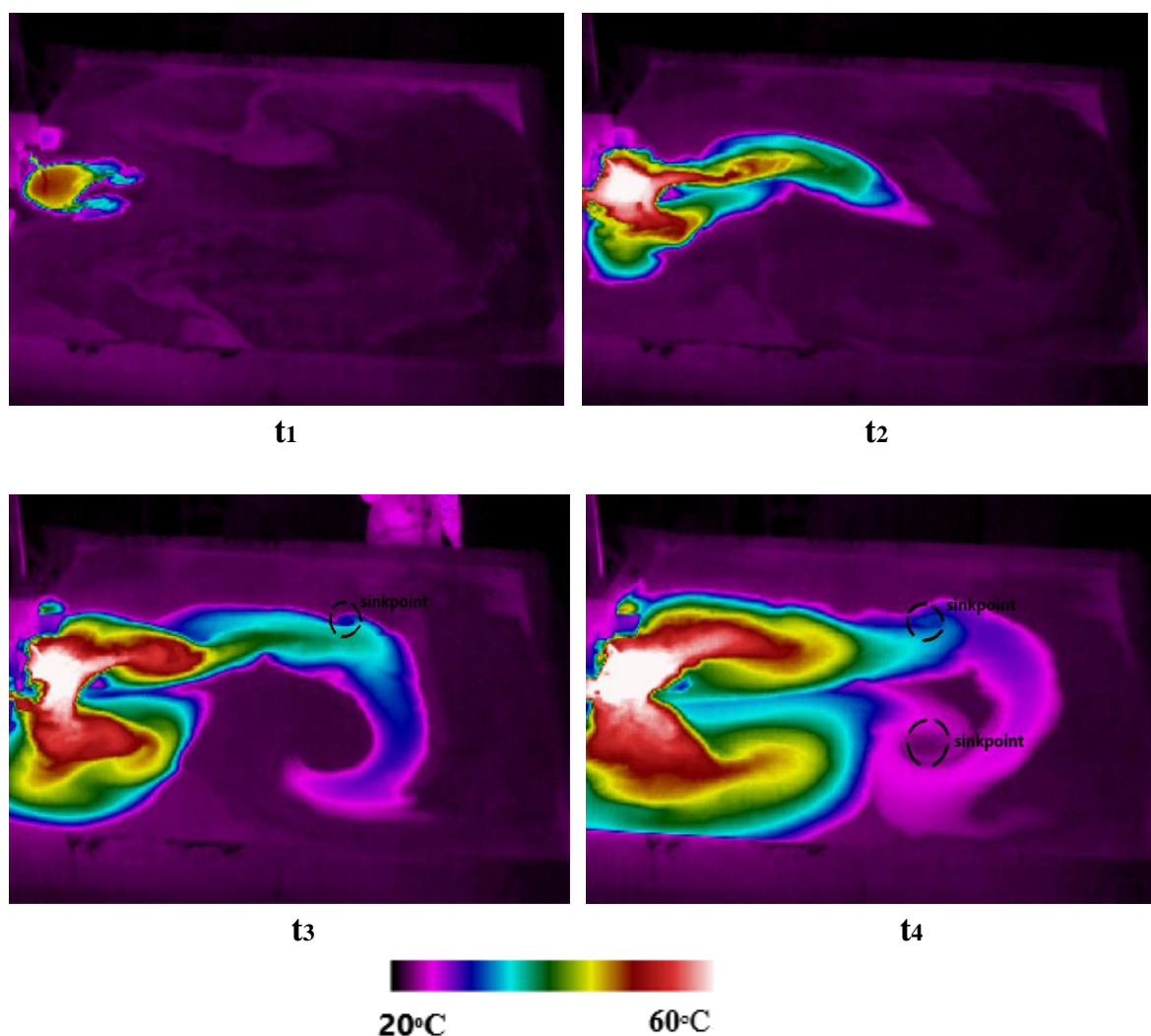


Slika 4.7 Temperaturni graf za svaki definirani poprečni presjek poplavljene površine



## 4.2.2 Analiza detekcije za slučaj 2 drenažne šupljine

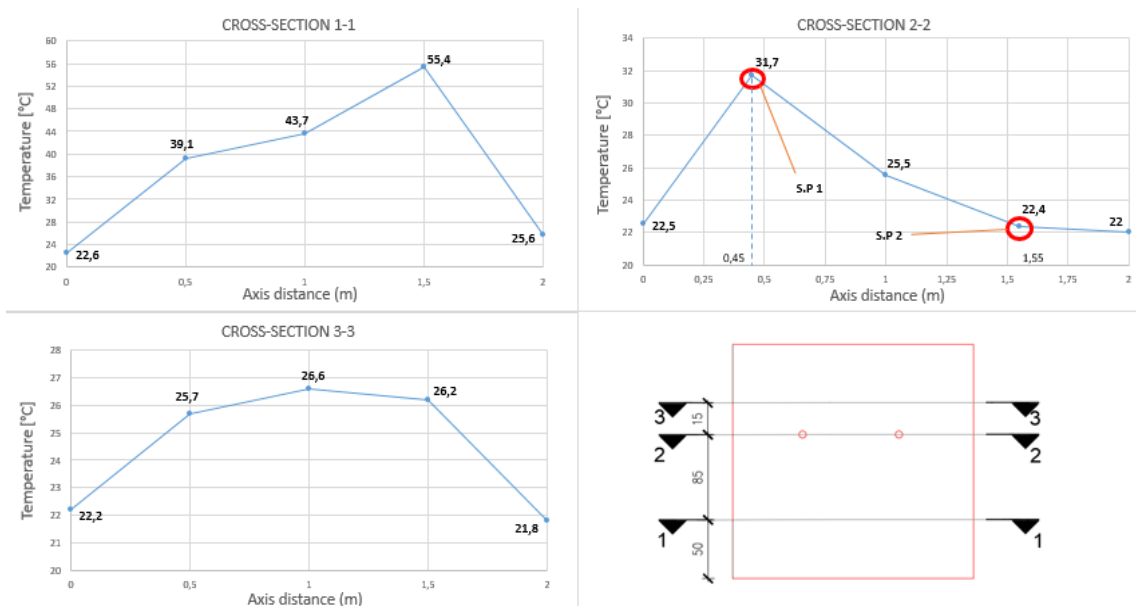
Infracrvene termografske figure na *Slici 4.9* prezentiraju kretanje tople vode prema drenažnim šupljinama, koje se sastoje od zrnaca šljunka; u traženom vremenskom okviru, pod konstantnim istjecanjem  $Q_{D1}$  (spomenuto u *Odjeljku 3.3.3*). Drugi set eksperimenata proveden je za dvije drenažne šupljine, jednu simetričnu u odnosu na prethodno iz *Odjeljka 4.2.1.*, što je doprinijelo 6 različitih slučajeva za analizu. Slučaj koji je pridonio najpovoljnijim rezultatima (zbog kvalitetnog odgovora eksperimentalne metode) je onaj na *Slici 4.8.*, koji uključuje manji protok istjecanja i veću propusnost drenažnih šupljina.



*Slika 4.8* Praćenje kretanja termalnog traseru prema dvama drenažnim šupljinama

U odnosu na prethodni Odjeljak 4.4.2., ovaj eksperiment stvara novi put za izlazak vode, čime se povećava sila privlačenja vode prema drenažnim šupljinama. Budući da su obje drenažne šupljine istog promjera i konzistencije, postižu ravnotežu u brzini procjeđivanja[24]. Kao što

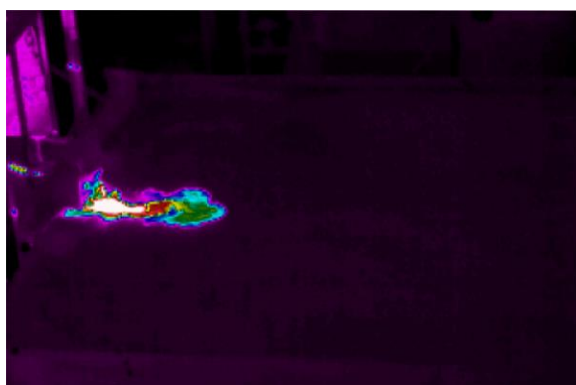
možemo vidjeti u trenutku  $t_1$  na *Slici 4.8.*, pri sporijoj brzini istjecanja termalni trag se koncentrira u blizini uzvodnog kraja žlijeba, te se formiraju dvije krivulje proboja slijedeći privlačnu silu iz simetričnih drenažnih šupljina. S vremenom, niže stope istjecanja najviše pridonose bočnom širenju termalnog traga, istovremeno povećavajući uzdužno širenje u oba smjera[97]. U trenutku  $t_2=39$  s postoji jasna razlika između dviju krivulja proboja koja je istaknuta visokim vrijednostima temperature, pri čemu lijeva krivulja ima veći doseg od desne. Razlog tome je pristupačnost rute do drenažne šupljine, koja ovisi o površinskim nepravilnostima na lijevoj strani kvadratnog žlijeba, što povećava protok prema toj točki (kao što se vidi na *Slici 4.1.*). Položaj lijeve drenažne šupljine otkriven je u vremenskoj točki  $t_3=1,25$ min, formiranjem vrtloga na *Slici 4.8.* Ovo se događa kao rezultat Coriolisovog efekta, kada vodeći rub termalnog traga dođe blizu drenažne šupljine, on se pridružuje vrtložnom strujanju koje postepeno povećavanja gibanje tj rotacijski moment sa približavanjem sredini drenažne šupljine[99,100]. U ovom slučaju, vidimo još jednu krivulju proboja koja se formira produženjem termalnog traga od lijeve drenažne šupljine, gdje se pod vrtložnim momentom, nadolazeći tok tople vode preusmjerava prema desnoj drenažnoj šupljini, također i pod utjecajem privlačne sile i termalne disperzije[98]. Konačno u vremenu  $t_4=2,42$ min detektirana je desna drenažna šupljina, na isti način kao i ona nasuprot njoj. Ovdje se vodeći rub termalnog traga s donje desne strane žlijeba, koji se kroz vrijeme polagano ubrzavao, spaja s onim koji dolazi s lijeve strane žlijeba. Kada govorimo o distribuciji topline po kvadratnom žlijebu, budući da niže vrijednosti protoka koreliraju s višom stopom bočne disperzije, u vremenskoj točki  $t_2$  i  $t_3$ , uočljivo je da je temperatura uglavnom ravnomjerno raspoređena duž uzvodnog dijela površine[42]. Ovdje je iznimka lijeva krivulja proboja termalnog traga, koja doživljava višu temperaturu na većoj površini, zbog koncentracije toka na toj strani, kao što se vidi na *Slici 4.8.* Vrijednost temperature drenažne šupljine u vremenskoj točki  $t_3$  na *Slici 4.8.* je  $T=30,5^\circ\text{C}$  jer toplinski kapacitet duž tog puta brže dostiže značajnu vrijednost. Za daljnju analizu toplinskog gradijenta, u svakoj točki na poplavljenoj površini za promatranu točku u vremenu  $t_4$  (*Slika 4.8.*), konstruirani su toplinski grafovi na određenim poprečnim presjecima kao što je prikazano na *Slici 4.9.* Prema *Slici 4.9.*, najviše vrijednosti temperature postignute su najbliže uzvodnom kraju žlijeba na udaljenosti od 1-1,5 m, zbog naglašenog bočnog širenja na početka pokusa, što je pridonijelo povećanju temperatura tijekom vremena. Na poprečnom presjeku u razini točaka propusnosti, vrijednost temperature na lijevoj točki propusnosti je viša nego na desnoj točki propusnosti. Razlog tome je razlika u toplinskom gradijentu u svakoj točki gdje je za lijevu drenažnu šupljinu, vrijednost temperature oko tog područja dosegla određeni prag  $T=31,7^\circ\text{C}$ , a na desnoj drenažnoj šupljini se održava umjerena temperatura  $T=22,4^\circ\text{C}$  uslijed vrtložnog kretanja[103]. Na posljednjem presjeku na *Slici 4.9.*, vrijednosti temperature su uglavnom različite duž širine površine žlijeba, a to je zbog veće stope miješanja tople vode s vodom sobne temperature na uzvodnom kraju, kao rezultat vrtložnog momenta.



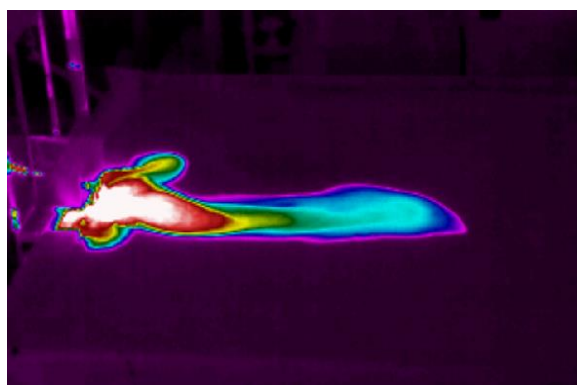
Slika 4.9 Temperaturni graf za svaki definirani poprečni presjek poplavljene površine

### 4.2.3 Analiza detekcije za slučaj 3 drenažne šupljine

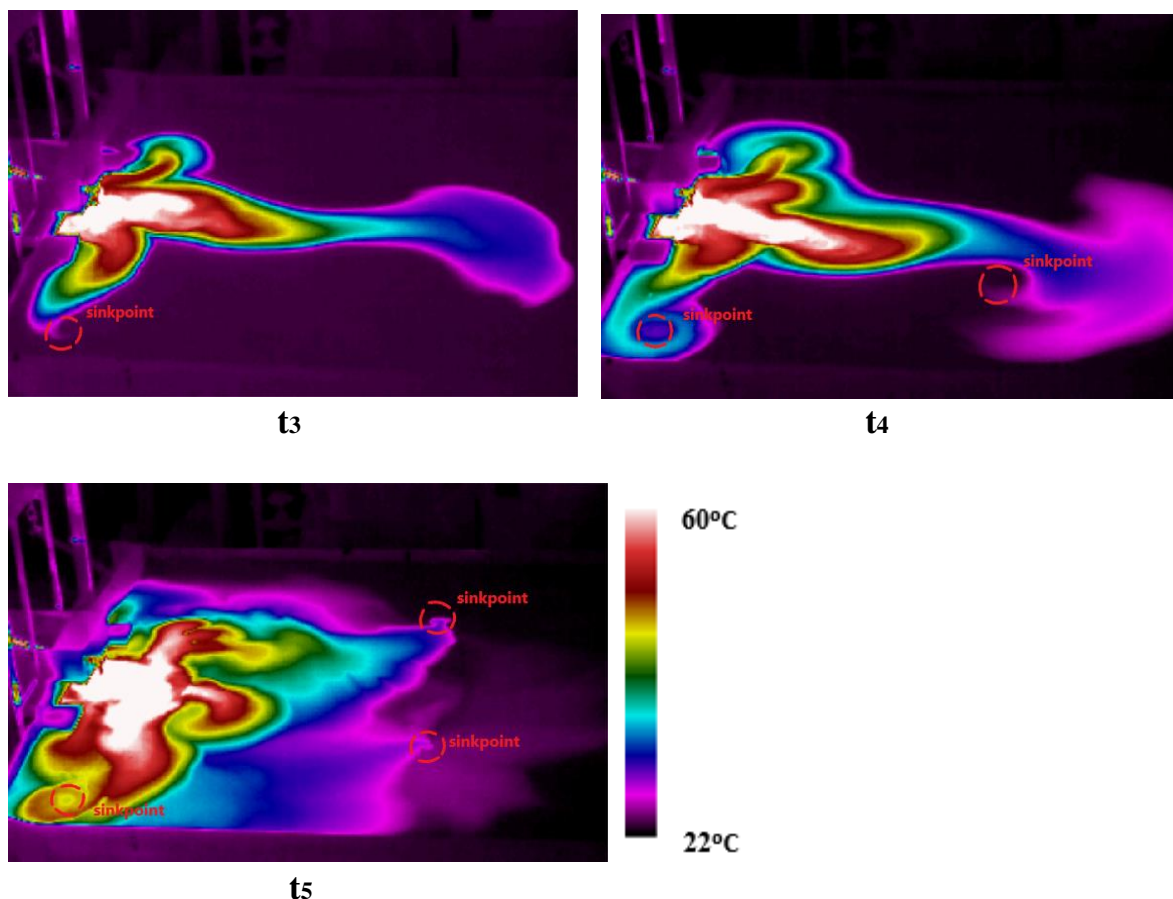
Infracrvene termografske figure na *Slici 4.10.*, prezentiraju kretanje tople vode prema drenažnim šupljinama, koje se sastoje od zrnaca šljunka; u zahtijevanom vremenskom okviru, pod konstantnim istjecanjem  $Q_{D2}$  (spomenuto u *Odjeljku 3.3.3*). Treći set eksperimenata izveden je za tri drenažne šupljine, dvije šupljine iz prethodnog *Odjeljka 4.2.2.*, zadržane su na istoj poziciji s dodatnom drenažnom šupljinom postavljenom u uzvodnom desnom kutu. Ova eksperimentalna formacija pridonijela je 8 različitih slučajeva za analizu. Slučaj koji je pridonio najpovoljnijim rezultatima je onaj na *Slici 4.10.*, koji uključuje veći protok istjecanja i veću propusnost drenažne šupljine.



t<sub>1</sub>



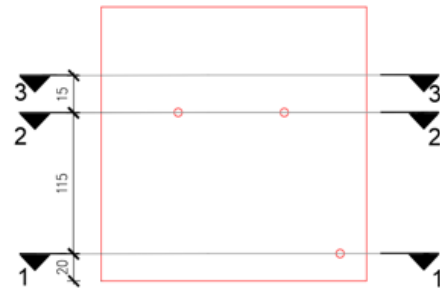
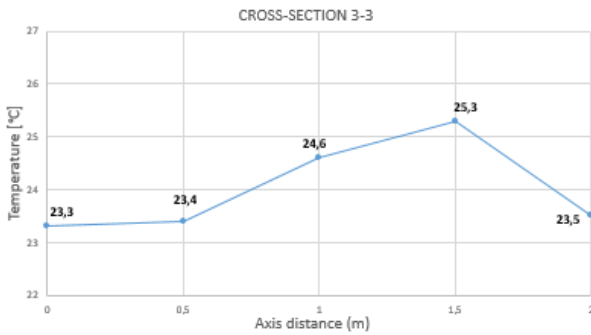
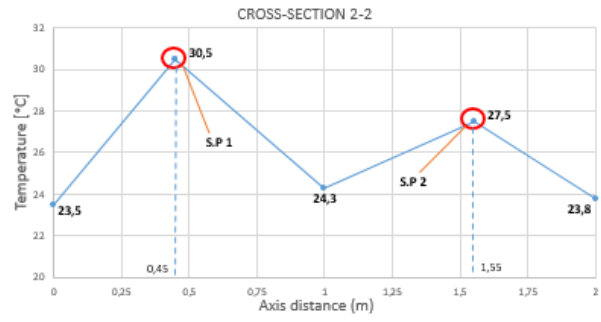
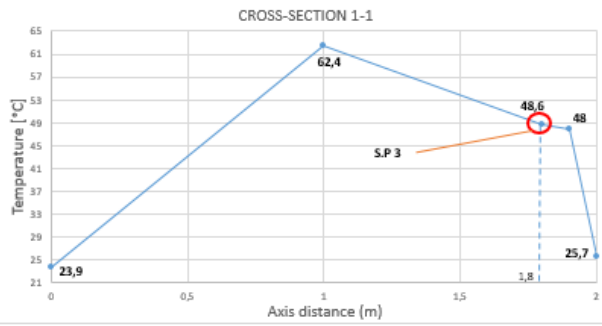
t<sub>2</sub>



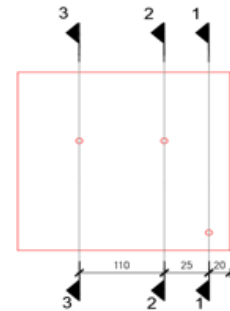
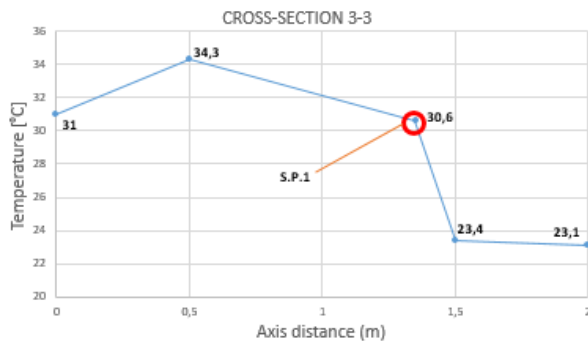
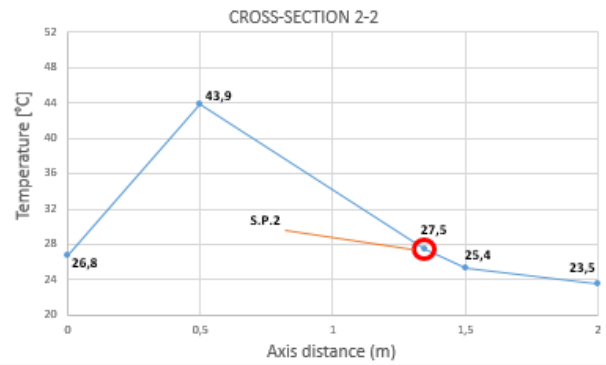
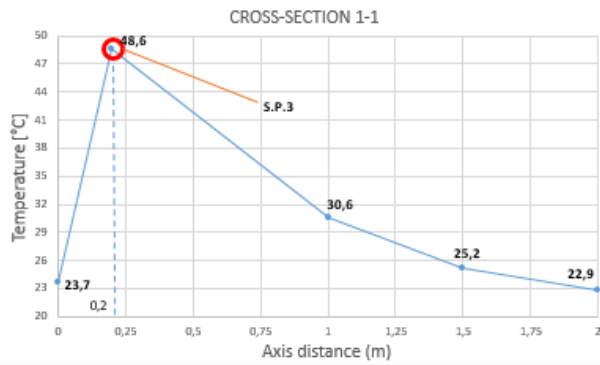
Slika 4.10 Praćenje kretanja termalnog trasera prema trima drenažnim šupljinama

Prethodno spomenuti fenomen privlačenja vode u prijašnjim odjeljcima, sada je povećan prisutnošću treće drenažne šupljine[24]. Lokacija je definirana u blizini kuta kvadratnog žlijeba, u namjeri, kako bi se testirala efikasnost bočnog širenja termalnog trasera. Slika 4.10. pokazuje da se u početnoj fazi  $t_1$  termalni trag širi uglavnom uzduž sredine žlijeba, s prekidima među putanjama čestica tople vode vidljivim na prednjem rubu trasera zbog učinka disperzije[42]. To se nastavlja još neko vrijeme, kao što možemo vidjeti u vremenskoj točki  $t_2=28$  sekundi, zbog porasta protoka uzrokovanog privlačnim silama nizvodnih drenažnih šupljina i velikog protoka istjecanja. U to vrijeme također možemo vidjeti krivulju proboja koja se formira s obje strane termalnog traga, što je s jedne strane uzrokovano privlačnom silom drenažne šupljine, ali također i turbulencijom nastalom na uzvodnom kraju, kao posljedica visoke temperature. Detekcija prve drenažne šupljine je zabilježena u  $t_3=1,04$  min, a karakterizirana je izduživanjem vodećeg ruba termalnog traga, uzrokovanog zaokretanjem, tj kovitlanjem toka oko drenažne šupljine, što je povećano u kasnijim fazama  $t_4$ ,  $t_5$ . U to vrijeme termalni trag se nastavlja širiti niz sredinu, zbog privlačne sile simetričnih i identičnih drenažnih šupljina, sve dok ne dosegne nizvodni kraj žlijeba, prije vremena  $t_4$ . Sljedeća drenažna šupljina je detektirana u vremenskoj točki  $t_4=1,57$  min, preko zabilježenog vrtložnog gibanja, termalne krivulje oko drenažne šupljine koja je proširila svoj doseg od srednjeg i nizvodnog dijela površine nakon refleksije od rub žlijeba[95,96]. Nakon toga, detekcija zadnje drenažne šupljine ne nastupa dulje vrijeme, jer je tok termalnog trasera koncentriran duž već uspostavljene rute. Konačno, detekcija se registrira u vremenu  $t_5=6,20$  minuta, kao rezultat širenja topline u područja niže temperature i djelovanja sila privlačenja prema toj točki, što stvara vrtlog[101]. Temperaturni gradijent je uglavnom bio u skladu s protokom termalnog trasera tijekom eksperimenta. U početnim fazama

$t_1$  i  $t_2$ , zbog velike brzine u srednjem području, visoka temperatura uglavnom se održava blizu uzvodnog kraja i opada s duljinom. To je zbog primarnog mehanizma evaporacije i kondukcije, pod kojim traser gubi vrijednost temperature, kao i sekundarnog mehanizma hidro-dinamičke disperzije koja pouspješuje miješanje s okolnom vodom[25,98]. Samo u vremenskoj točki  $t_3$  i  $t_4$  dolazi do bočnog širenja termalnog traga na uzvodnom kraju, zbog akumuliranja tople vode na ispustu. Prva otkrivena drenažna šupljina u trenutku  $t_3$  ima temperaturu od  $T=25,2^{\circ}\text{C}$ , nakon čega sljedeća otkrivena drenažna šupljina u trenutku  $t_4$  ima temperaturu od  $T=23,8^{\circ}\text{C}$ . Termalni trag koji je bio vođen duž cijele dužine poplavljene površine žlijeba, odbija se od uzvodni rub i miješa se s nizvodnom okolnom vodom. Time se povećava površina i učinkovitost distribucije topline zbog promjene vrijednosti toplinskog kapaciteta u tom području. U trenutku  $t_5$  područje visoke temperature se proširilo zbog miješanja tople vode i povezivanja tokova tople vode. Visoka temperatura u prethodnom vremenu  $t_4$  ohladila se oko točke propusnosti, te samo sa toplinskom vezom koja seže iz uzvodnog područja. Iz *Slike 4.10.* je u trenutku  $t_5$  također vidljivo da je lijeva drenažna šupljina otkrivena pomoću proširene toplinske krivulje koja se reflektirala od nizvodni rub žlijeba u trenutku  $t_4$  [95]. Za daljnju analizu toplinskog gradijenta, u svakoj točki na poplavljenoj površini za promatranu točku u vremenu  $t_5$  (*Slika 4.10.*), konstruirani su temperaturni grafovi na određenim poprečnim presjecima kao što je prikazano na *Slici 4.11.* i *Slika 4.12.* Zbog velikog područja raspodjele temperature, temperaturni grafovi konstruirani su i za 'x' i za 'y' smjer poprečnog presjeka. Prema *Slici 4.11.* i na *Slici 4.12.*, najveće vrijednosti temperature postignute su najbliže uzvodnom kraju žlijebova na udaljenosti od 1-1,9m, zbog dugog vremenskog perioda potrebnog za eksponencijalni rast temperature u tom području. Na ovom presjeku vrijednost temperature uzvodne drenažne šupljine je  $T=48,6^{\circ}\text{C}$  što je maksimalna vrijednost u uzdužnom smjeru promatranog presjeka(*Slika 4.12.*), ali ne i u bočnom smjeru (*Slika 4.11*). Na poprečnom presjeku u razini nizvodnih točaka propusnosti vrijednost temperature na lijevoj drenažnoj šupljini je viša, nego na desnoj drenažnoj šupljini, što je vidljivo na *Slici 4.11*. Razlog tome je naglašeno povećanje temperature oko lijeve drenažne šupljine, gdje je temperatura  $T=30,6^{\circ}\text{C}$ , što vidimo na *Slici 4.10.*, zbog koncentracije protoka. Na desnoj drenažnoj šupljini temperatura  $T=27,5^{\circ}\text{C}$  niža je nego na desnoj zbog hlađenja i povlačenja toka u ovom području. Obje vrijednosti temperature ne pokazuju maksimalne vrijednosti u uzdužnom smjeru, zbog prevladavajućih visokih temperatura u uzvodnom području. Na posljednjem presjeku na *Slici 4.9.*, vrijednosti temperature uglavnom su različite duž srednje-desne strane površine žlijeba, zbog spomenute refleksije od nizvodni dio žlijeba.



Slika 4.11 Temperaturni graf za svaki definirani poprečni presjek poplavljene površine u smjeru osi  $x$



Slika 4.12 Temperaturni graf za svaki definirani poprečni presjek poplavljene površine u smjeru osi  $y$

#### 4.2.4 Opis rezultata

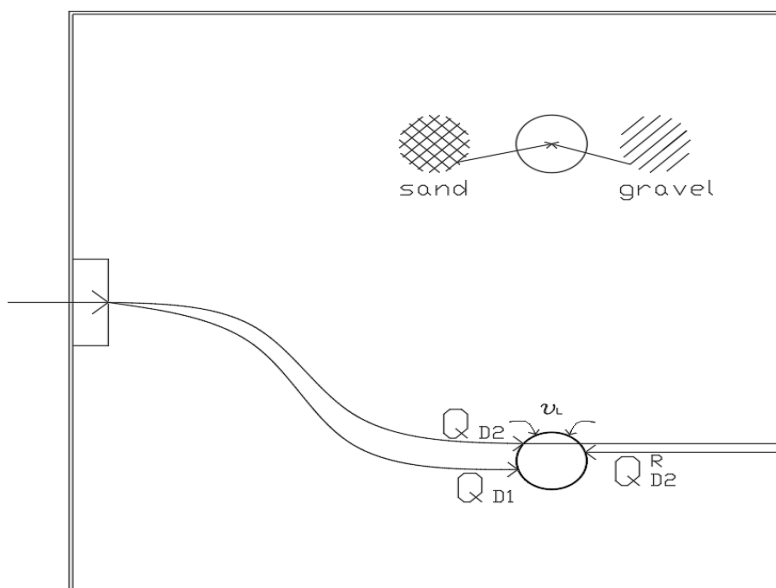
Exper. order	Tracer discharge	Tracer mater.	Sinkhole position	Sinkhole filling	Detection	Detection time	Sinkhole temperature	Discharge
1	$Q_{in}=0,025$ L/s	Thermal		sand	yes	7,56min	29,6-31°C	0,0213L/s
2	$Q_{in}=0,025$ L/s	Thermal		gravel	yes	6,38min	30-30,8°C	0,0594L/s
3	$Q_{in}=0,035$ L/s	Thermal		sand	no		28,8-29,4°C	0,0126L/s
4	$Q_{in}=0,035$ L/s	Thermal		gravel	yes	2,29min	24-25,5°C	0,0715L/s
5	$Q_{in}=0,025$ L/s	Thermal		sand	L-yes R-no	L=1,77min	L=26,5-27,2°C R=25,6-26,8°C	$Q_L=0,024$ L/s $Q_R=0,024$ L/s
6	$Q_{in}=0,025$ L/s	Thermal		gravel	yes	L=2,21min R=3,04min	L=30,8-32°C R=22-23,2°C	$Q_L=0,05$ L/s $Q_R=0,028$ L/s
7	$Q_{in}=0,025$ L/s	Thermal		L-sand R-gravel	yes	R=56sec	L=20-21°C R=25,5-27°C	$Q_L=0,024$ L/s $Q_R=0,08$ L/s
8	$Q_{in}=0,035$ L/s	Thermal		sand	no		L=27,6-28,1°C R=26,1-27,2°C	$Q_L=0,031$ L/s $Q_R=0,028$ L/s
9	$Q_{in}=0,035$ L/s	Thermal		gravel	yes	L=2,04min R=2,51min	L=27,4-28,8°C R=23,6-24,1°C	$Q_L=0,04$ L/s $Q_R=0,031$ L/s
10	$Q_{in}=0,035$ L/s	Thermal		L-sand R-gravel	L-no R-yes	R=42sec	L=21,5-22,1°C R=23,4-24°C	$Q_L=0,025$ L/s $Q_R=0,032$ L/s
11	$Q_{in}=0,025$ L/s	Thermal		L-gravel R-gravel B-sand	L-yes R-yes B-yes	L=2,03min R=2,22min B=3,05min	L=29,4-30,1°C R=29,6-30°C B=23,8-24,6°C	$Q_L=0,031$ L/s $Q_R=0,027$ L/s $Q_B=0,016$ L/s
12	$Q_{in}=0,025$ L/s	Thermal		gravel	L-yes R-yes B-yes	L=5,53min R=3,21min B=1,37min	L=27,9-28,6°C R=25,2-26,5°C B=23,9-24,5°C	$Q_L=0,025$ L/s $Q_R=0,038$ L/s $Q_B=0,040$ L/s
13	$Q_{in}=0,025$ L/s	Thermal		L-sand R-sand B-gravel	L-no R-yes B-yes	R=2,44min B=1,23min	L=21,3-22°C R=22,4-23,2°C B=24,6-25,6°C	$Q_L=0,004$ L/s $Q_R=0,012$ L/s $Q_B=0,038$ L/s
14	$Q_{in}=0,025$ L/s	Thermal		sand	no		L=25,1-25,8°C R=27,2-27,9°C B=27,7-28,6°C	$Q_L=0,002$ L/s $Q_R=0,004$ L/s $Q_B=0,006$ L/s
15	$Q_{in}=0,035$ L/s	Thermal		L-gravel R-gravel B-sand	L-yes R-yes B-no	L=1,21min R=1,21min	L=29,1-29,7°C R=29,4-30,4°C B=23,1-23,5°C	$Q_L=0,024$ L/s $Q_R=0,03$ L/s $Q_B=0,011$ L/s
16	$Q_{in}=0,035$ L/s	Thermal		gravel	L-yes R-yes B-yes	L=6,25min R=2,06min B=1,1min	L=27,1-28,3°C R=24,8-25,7°C B=23,5-24,8°C	$Q_L=0,023$ L/s $Q_R=0,033$ L/s $Q_B=0,042$ L/s
17	$Q_{in}=0,035$ L/s	Thermal		L-sand R-sand B-gravel	L-no R-yes B-yes	R=1,17min B=1,46min	L=21-22,5°C R=22,9-23,5°C B=23,8-25,2°C	$Q_L=0,006$ L/s $Q_R=0,016$ L/s $Q_B=0,039$ L/s
18	$Q_{in}=0,035$ L/s	Thermal		sand	L-no R-no B-yes	B=15,05min	L=25,4-26,2°C R=28,6-30,4°C B=28,1-29,2°C	$Q_L=0,003$ L/s $Q_R=0,009$ L/s $Q_B=0,007$ L/s

Tablica 4.1. Rezultati analize procesa detekcije drenažne šupljine putem uporabe termalnog traseru za sve kombinacije definiranih parametara

*Tablica 4.1.* predstavlja sve ključne vrijednosti hidrauličkog praćenja prema drenažnoj šupljini u prostorno ograničenom okruženju, dobivenih iz izvođenja niza eksperimenata, koristeći varijabilne parametre. Svaki stupac u *Tablici 4.1.* odnosi se na geološke, hidrološke, toplinske i numeričke parametre koji definiraju uvjete svakog eksperimentalnog pokusa koji je brojčano označen u svakom redu. Osim parametara u *Tablici 4.1.*, ostali važni aspekti koji daju uvid u ponašanje i procese u eksperimentalnom postupku su: -topografija - brzina vodećeg ruba trasera – protočna duljina -brzina protoka -brzina disperzije -termalni gradijent [42,55].

Podaci mjereni ručno ili putem softverskog programa smješteni su u posljednja 4 stupca *Tablice 4.1.* Vrijeme otkrivanja registrirano je u trenutku kada je infracrvena slika snimila određeni događaj ili promjenu termalnog uzorka oko drenažne šupljine, što je odstupalo od konstantnog načina ponašanja. Vrijeme detektiranja je definirano kao razlika između početka snimanja infracrvene kamere, što je u nekim slučajevima dalo nekoliko sekundi kašnjenja u odnosu na početak eksperimenta i vremena otkrivanja. Temperaturna vrijednost prilikom detekcije drenažne šupljine je definirano kao maksimalna i minimalna temperatura izmjerena unutar i okolo promjera drenažne šupljine. Vrijednosti protoka u posljednjem stupcu *Tablice 4.1.*, koje odgovaraju volumenu procjeđivanja iz drenažne šupljine, mjerene su ručno nakon što je otkriće registrirano. Nisu svi eksperimenti provedeni s željenim ishodom, s time da, upravo za svaki set eksperimenata, postojao je jedan slučaj, za koji detektiranje drenažne šupljine nije bilo registrirano. Proces detektiranja sam po sebi je definiran naglom promjenom kontinuiteta kretanja ili temperature (npr. stvaranja vrtloga, toplinske regulacije) oko drenažne šupljine[99,101]. U *Tablici 4.1.*, postoji veza između prve skupine testova koji su izvedeni s 1 drenažnom šupljinom i druge skupine testova izvedenih s 2 drenažne šupljine, u kojima su obje grupe eksperimenata izvedene s većim pražnjenjem  $Q_{D2}$ . Zbog niskog učinka vakuuma na položaju drenažne šupljine i koncentriranog protoka duž središnje osi kvadratnog žlijeba, drenažna šupljina nije uzvratila nikakav odgovor u odnosu na termalni traser koji teče preko ili oko njegove blizine, čak i nakon disperzije topline. U slučaju eksperimenta s 3 drenažne šupljine i nižim protokom istjecanja  $Q_{D1}$ , termalni uzorak nije doživio nikakve velike promjene, s tim da se vodeći rub termalnog trasera samo neznatno iskrivi ili ide iznad drenažnih šupljina. Zbog početne koncentracije protoka niz središnju osi, proces disperzije s vremenom se uglavnom fokusira bočno, pri čemu je područje visokih temperatura stagniralo bez divergencije, što omogućava otkrivanje drugih drenažnih šupljina[97,98]. Promatrajući podatke iz *Tablice 4.1.*, možemo izvući odnos između temperature drenažne šupljine, ovisno o ispuni šupljine i protoku istjecanja trasera. Naime, ta se razlika objašnjava pomoću primjerom iz *Slike 4.14.*, prema kojem možemo imenovati 2 slučaja studije. U slučaju niže propusnosti (pijeska) i dva protoka istjecanja, viši  $Q_{D2}$  proizvest će više vrijednosti temperature na drenažnoj šupljini, od donjeg  $Q_{D1}$ . Razlog tome je produžena protočna duljina, zbog refleksije toplinskog trasera od nizvodni kraj žlijeba ili u slučaju 1 drenažne šupljine, koncentracije protoka. To povećava učinkovitost disperzije prije i nakon drenažne šupljine i omogućuje unos vruće vode sa rute prije i nakon drenažne šupljine, zbog niskog vakuuma (gravitacija+hidrostatski tlak)  $v_L$  u tom trenutku[100]. Drugo, u slučaju veće propusnosti i dva protoka istjecanja, niži od oba,  $Q_{D1}$  proizvest će više vrijednosti temperature u drenažnoj šupljini od većeg protoka  $Q_{D2}$ . Razlog za to je prekid protočne duljine tijekom istjecanja  $Q_{D2}$  zbog većeg vakuum  $v_L$  na drenažnoj šupljini, što omogućava samo djelomični unos tople vode tijekom vremena putovanja trasera. Dok pražnjenje  $Q_{D1}$  održava rutu kontinuirane opskrbe prema točki propusnosti.





Slika 4.14. Demonstracija kretanja trasera prema točki propusnosti, za dva različita protoka istjecanja i materijala ispune

Odnos između temperature na drenažnoj šupljini i protoka procjeđivanja u *Tablici 4.1.*, se predočava kroz temperaturnu razliku u toj točki, kao i vrijednost temperature. Visoke vrijednosti temperature, prenose više kinetičke energije koja pouspješuje brzinu putovanja čestica vode ili momenta na središte drenažne šupljine[102]. Ovo uzastopno djelovanje doprinosi stvaranju vrtloga oko središta drenažne šupljine, uslijed Coriolisovog efekta. Kao što je već spomenuto, temperaturne vrijednosti na drenažnoj šupljini u *Tablici 4.1.* bili su uračunati kao razlika između maksimalnih i minimalnih vrijednosti temperature u tom trenutku. Dakle, veće razlike u temperaturi doprinijele su većim stopama odvodnje vode, zbog povećanja razmjera toplinskog gradijenta što poboljšava toplinsku vodljivost. Iako ovi spomenuti čimbenici nisu jedini koji utječu na vrijednost protoka procjeđivanja kroz drenažnu šupljinu, važni su jer utječu na promjene u toku oko drenažnih šupljina.

## 5. ZAKLJUČAK

Scenariji iscrpljivanja vode su problemi s kojima se treba svakodnevno baviti i rješavati, u sekcijama zadržavanja znatnih količina vode, kao što su retencijski bazeni, bare za zadržavanje, akumulacije s branama i poljoprivredna zemljišta. Stoga je od presudne važnosti razumjeti prirodu gubitka vode i odrediti mjesto potencijalnog curenja, ispuštanja i dubokog procjeđivanja. Problem identifikacije područja gubitka vode stalan je problem u znanstvenoj i inženjerskoj zajednici koji sve više uzima maha, kroz različite metode, od kojih je jedna detekcija kretanja korištenjem trasera. Uključenost ovog rada u problem koji je pri ruci, usredotočen je na korištenje termalnih trasera i tehnika praćenja za određivanje točke propusnosti u velikim plitkim rezervoarima. Kako bi se rekonstruirao ovaj realan vodeni sustav, područje testiranja postavljeno je kao fizički laboratorijski model. Navedeni fizikalni model sastojao se od kvadratnog zemljanog žlijeba 2x2 m koji je bio spojen na vodoopskrbni sustav kako bi se simulirao plitki tok vode preko čvrste površinu. Ciljevi rada postavljeni su oko kvalitativne i kvantitativne procjene protoka plitke vode i termalnog praćenja toka vode putem infracrvene termografije. Pokusi su provedeni u nizu, pri čemu je cilj prve faze pokusa bio istražiti navodnjavanje površine tla. Tijekom druge faze, cilj pokusa je bio ispitati i analizirati metodu korištenja termalnog trasera za otkrivanje drenažne šupljine. Značajan i pouzdan broj informacija dobiven je ponavljanjem eksperimenata u slučaju da uvjeti nisu bili ispravni ili da se slike nisu mogle pravilno obraditi. Za prvu fazu eksperimenta korištena je pješćana ilovača niske propusnosti kako bi se prilagodili površinama velikih plitkih rezervoara. Zbog topografije površine, brzina istjecanja je prilagođena za postizanje laminarnog protoka, što je bilo potrebno za povećanje jasnoće i preciznosti snimanja. Pod tim uvjetima i s obzirom na dubinu žlijeba, postignuti su pozitivni rezultati, koji sumiraju karakteristike protoka, vrijeme navodnjavanja i brzinu vodećeg ruba toka vode. Iako je korišten dvostruki traser za poboljšanje učinkovitosti eksperimenta, analizirani su samo rezultati termalnog trasera zbog niske kvalitete snimanja obojenog trasera. Topografske značajke imale su veliki utjecaj na kretanje vodenog sloja dok je navodnjavanje trajalo, a točkasto injektiranje dvostrukog trasera korišteno je za određivanje vektora brzine u svakoj točki na površini žlijeba. Rezultati su pokazali da se u ranim fazama vodeni pokrov širio uglavnom u bočnom smjeru s istodobnim uzdužnim širenjem na desnoj strani središnje osi. Vrijednost površine i opsega vlaženja vodenog pokrova, doživjeli su skok tijekom prve dvije minute i sredine eksperimenta zbog nejednake brzine u različitim točkama vodećeg ruba rive. Najbrže širenje vodenog pokrova zabilježeno je na lijevoj strani središnje osi žlijeba, jer površinska morfologija na tom dijelu povećava brzinu do postizanja koncentriranog protoka. Plašni tok vode je uglavnom bio zabilježen na desnoj strani središnje osi prije drenažne šupljine, što se vidi kroz različite vrijednosti i smjerove brzine vektora u svakoj točki. Jedan od nedostataka ove eksperimentalne faze je neravnomjerno širenje vodenog pokrova što otežava injektiranje dvostrukog trasera bez ugrožavanja samoga, putem povezivanja susjednih vodenih tokova. U ovom slučaju, predlaže se korištenje linijskog ispusta vode koji prati širinu kanala od 2 m, umjesto sadašnjeg središnjeg ispusta koji pridonosi stvaranju nepravilnih linija protoka. Za drugu fazu eksperimenata razmatrani su drugi različiti traseri (obojeni, fluorescentni,

itd.), sve dok izbor nije pao na injektiranje termalnog trasera, zbog postojećeg infracrvenog termografskog sustava snimanja. Svaka grupa eksperimenata je provedena na temelju preliminarnih uvjeta definiranih kombinacijom zadane brzine istjecanja, ispune drenažne šupljine i broja drenažnih šupljina. Rezultati odabrani za analizu temelje se na mišljenju da prikazane slike jasno definiraju promjene temperature i kretanja trasera koje se događa do drenažne šupljine. Svaki reprezentativni rezultat za određeni broj drenažnih šupljina dao je priliku da se precizno opiše protok, brzina disperzije, toplinski gradijent i protočna duljina trasera. Eksperimenti su za veće vrijednosti protoka i propusnosti drenažne šupljine, proizveli jasnije ili informativnije infracrvene slike. Iako to nije vrijedilo za svaki eksperiment, jer, u slučaju 2 drenažne šupljine, i većeg protoka istjecanja trasera, informacije koje su se mogle prikupiti iz toplinskih slika bile zamršene, u smislu da se mnogo promjena događalo odjednom. Mnogi su čimbenici utjecali na kretanje termalnog trasera, ali da ih sažmemo, uglavnom je ovisilo o brzini protoka i razini disperzije. U sažetku rezultata utvrđeno je da je najranije vrijeme detekcije zabilježeno za slučaj sa 2 drenažne šupljine. Razlog tome bio je povećanje brzine vodećeg ruba trasera na koje su utjecale topografske značajke, sile privlačenja prema drenažnoj šupljini, učinkovitost disperzije i brzina istjecanja trasera. Toplinski gradijent bio je najrašireniji u slučaju niže propusnosti i nižeg ispuštanja trasera s višim vrijednostima temperature koncentriranim na maloj udaljenosti od ispusta. Za usporedbu, veća propusnost zajedno s većim protokom istjecanja trasera rezultirala je višim temperaturnim vrijednostima prožetim duž duljine toka prema točkama propusnosti, ali i s ograničenim toplinskim gradijentom preko površine kvadratnog žlijeba. Glavni razlog za to bio je taj što je brzina disperzije bila najuspješnija za niži protok istjecanja trasera, zbog očuvanja volumena(količine topline) trasera u slučaju većeg istjecanja trasera. Rezultati za protok procjeđivanja iz drenažne šupljine bili su dosta relativni s obzirom na broj drenažnih šupljina korištenih za svaki eksperiment. Uz navedeno, usporedbe se mogu napraviti u svakoj eksperimentalnoj grupi testiranoj za 1 ili više drenažnih šupljina ili između grupa. Jedna od najvažnijih karakteristika definiranih ovim eksperimentima, je ovisnost brzine procjeđivanja o temperaturi protočne linije do drenažne šupljine kao i razlike temperaturnih vrijednosti na tom mjestu. S obzirom na to u analizi rezultata, se može uočiti da u određenim slučajevima veće brzine istjecanja trasera neće rezultirati većom brzinom procjeđivanja. U suprotnosti manje brzine istjecanja trasera, ovisno o topografskim karakteristikama, te distribuciji topline, će pridonijeti veću stopu procjeđivanja. Naravno izniman utjecaj ima i veličina zrna ispune drenažne šupljine, koja ograničava protok vode na zadanu vrijednost, ovisno o maksimalnom volumenu koji je moguće procijediti kroz nju. U tim slučajevima veća brzina istjecanja trasera nije nužno bolja zato što brzina strujanja tople vode, nadilazi brzinu usisa u drenažnu šupljinu. Tehnika detektiranja točke propusti korištenjem termalnog trasera, drži prednost nad ostalim tehnikama praćenja( sol, fluorescentnog materijala i materijala neznatne gustoće), zbog jasnoće pregleda infracrvenih snimaka kao i neograničenog volumena termalnog trasera. Međutim zbog neiscrpnog dotoka toplinske energije, sami postupak može biti veoma intruzivan na postupak analize, zbog kaotične prirode, širenja vode. Uz to, još jedan od nedostataka je što ne omogućuje istovremeno snimanje realne i infracrvene slike, kao i ograničeno vrijeme izvedbe postupka zbog neprestanog podizanja temperature okoline. Ovo bi se moglo olakšati korištenjem konzervativnijih trasera koji omogućuju veći spektar

primjene u odnosu na okolinu, kao i korištenjem fizikalnih trasera koji su topljivi u vode, te pri toku ostavljaju prepoznatljiv trag vidljiv u stvarnom scenariju.

## 6. LITERATURA

1. Singh, V.P. Handbook of Applied Hydrology; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2017; 1440p.
2. Hamilton, S. (2014). hyter Loss. Water Intelligence Online, 13. doi:10.2166[CrossRef]
3. Water loss control, Julian Thornton Reinhard Sturm George Kunkel, P.E.(2008)
4. Kunkel Jr., G. A. (2016). M36 Water Audits and Loss Control Programs, Fourth Edition. doi:10.12999/awwa.m36ed4[CrossRef]
5. Hydrology and Floodplain Analysis: International Edition, 5th Edition, Philip B. Bedient; Wayne C. Huber; Baxter E. Vieux(2012)
6. Chow, V.T.; Maidment, D.R.; Mays, L.W. Applied Hydrology; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1988.
7. Leibundgut, C.; Maloszewski, P.; Külls, C. Tracers in Hydrology; Wiley-Blackwell: Hoboken, NJ, USA, 2009.
8. Khanna, M., & Malano, H. M. (2006). Modeling of basin irrigation systems: A review. Agricultural Water Management, 83(1-2), 87–99. doi:10.1016/j.agwat.2005.10.003[CrossRef]
9. Grigg, N. S. (2009). Total water management: leadership practices for a sustainable future. Water International, 34(2), 290–293. doi:10.1080/02508060902937512[CrossRef]
10. Abernethy, C. L. (2005). Financing river basin organizations. Irrigation and River Basin Management: Options for Governance and Institutions, 75–92. doi:10.1079/9780851996721.0075[CrossRef]
11. Irrigation and Water Resources Engineering, G.L.Asawa (2006)
12. Ward, F. A., & Pulido-Velazquez, M. (2008). Water conservation in irrigation can increase water use. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(47), 18215–18220. doi:10.1073/pnas.0805554105[CrossRef]
13. Yekti, M. I. (n.d.). Role of reservoir operation in sustainable water supply to Subak irrigation schemes in Yeh Ho River Basin. doi:10.18174/404538[CrossRef]
14. Huffman, R., Fangmeier, D., Elliot, W., & Workman, S. (2013). Soil and Water Conservation Engineering Seventh Edition. doi:10.13031/swce.2013[CrossRef]
15. Daus, M., Koberger, K., Koca, K., Beckers, F., Encinas Fernández, J., Weisbrod, B., ... Wieprecht, S. (2021). Interdisciplinary Reservoir Management—A Tool for Sustainable Water Resources Management. Sustainability, 13(8), 4498. doi:10.3390/su13084498[CrossRef]
16. Finley, S. (Ed.). (2016). Sustainable water management in smallholder farming: theory and practice. doi:10.1079/9781780646862.0000[CrossRef]
17. Younos, T., & Parece, T. E. (Eds.). (2016). Sustainable Water Management in Urban Environments. The Handbook of Environmental Chemistry. doi:10.1007/978-3-319-29337-0[CrossRef]
18. Sustainable management of reservoirs and preservation of water quality, Şahnaz Tiğrek1, Özge Göbelez, and Tuçe Aras (2009)
19. Votruba, L., & Broža, V. (1989). Preface- Water Management in Reservoirs, 7–8. doi:10.1016/s0167-5648(08)70627-0[CrossRef]
20. Steven C. Chapra, 1996, Surface water quality modeling, p.156
21. Shallow Water Hydrodynamics - Mathematical Theory and Numerical Solution for a Two-dimensional System of Shallow Water Equations. (1992). Elsevier Oceanography Series. doi:10.1016/s0422-9894(08)x7007-2[CrossRef]
22. Compensating for Wetland Losses Under the Clean Water Act. (2001). doi:10.17226/10134 [CrossRef]
23. Plate section. (2008). Earth Surface Processes, Landforms and Sediment Deposits. Bridge, John; Demicco, Robert ;doi:10.1017/cbo9780511805516.024 [CrossRef]
24. Fluid mechanics: fundamentals and applications / Yunus A. Çengel, John M. Cimbala(2004)

25. Free-Surface Flow, Environmental Fluid Mechanics, by Nikolaos D. Katopodes(2018)
26. Free-Surface Flow: Shallow water dynamics, Nikolaos D. Katopodes (2018)
27. P. Rowiński and A. Marion (eds.), Hydrodynamic and Mass Transport at Freshwater Aquatic Interfaces, GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences(2018), doi:10.1007/978-3-319-27750-9 [CrossRef]
28. Azab, A. M. (2012). Integrating GIS, Remote Sensing, and Mathematical Modelling for Surface Water Quality Management in Irrigated Watersheds. doi:10.1201/9780367807191[CrossRef]
29. Physical and Chemical Processes of Water and Solute Transport/Retention in Soils, Volume 56; Hussein Magd Eldin Selim, Donald L. Sparks (2001)
30. Rainfall-Runoff Processes;David G. Tarboton(2003) <https://hydrology.usu.edu/rrp/>
31. Pozrikidis,, C., & Gartling,, D. (2002). Fluid Dynamics: Theory, Computation, and Numerical Simulation. Applied Mechanics Reviews, 55(3), B55–B55. doi:10.1115/1.1470683
32. A Practical Approach to Water Conservation for Commercial and Industrial Facilities. (2006). doi:10.1016/b978-1-85617-489-3.x5001-2 [CrossRef] .
33. Gomi, T., Sidle, R. C., Miyata, S., Kosugi, K., & Onda, Y. (2008). Dynamic runoff connectivity of overland flow on steep forested hillslopes: Scale effects and runoff transfer. Water Resources Research, 44(8). doi:10.1029/2007wr005894
34. Jain, M. K., Kothyari, U. C., & Ranga Raju, K. G. (2004). A GIS based distributed rainfall–runoff model. Journal of Hydrology, 299(1-2), 107–135. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.04.024
35. Mujtaba, B.; de Lima, J.L.M.P. Laboratory testing of a new thermal tracer for infrared-based PTV technique for shallow overland flows. Catena 2018, 169, 69–79. [CrossRef]
36. Jodeau, M.; Hauet, A.; Paquier, A.; Le Coz, J.; Dramais, G. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. Flow Meas. Instrum. 2008, 19, 117–127. [CrossRef]
37. Abrantes, J.; Moruzzi, R.; Silveira, A.; de Lima, J.L. Comparison of thermal, salt and dye tracing to estimate shallow flow velocities: Novel triple-tracer approach. J. Hydrol. 2018, 557, 362–377. [CrossRef]
38. Zhang, G.-H.; Luo, R.-T.; Cao, Y.; Shen, R.-C.; Zhang, X. Correction factor to dye-measured flow velocity under varying water and sediment discharges. J. Hydrol. 2010, 389, 205–213. [CrossRef]
39. Tauro, F.; Grimaldi, S.; Petroselli, A.; Rulli, M.C.; Porfiri, M. Fluorescent particle tracers in surface hydrology: A proof of concept in a semi-natural hillslope. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2012, 16, 2973–2983. [CrossRef]
40. Tauro, F.; Pagano, C.; Porfiri, M.; Grimaldi, S. Tracing of shallow water flows through buoyant fluorescent particles. Flow Meas. Instrum. 2012, 26, 93–101. [CrossRef]
41. Lei, T.; Chuo, R.; Zhao, J.; Shi, X.; Liu, L. An improved method for shallow water flow velocity measurement with practical electrolyte inputs. J. Hydrol. 2010, 390, 45–56. [CrossRef]
42. Schuetz, T.; Weiler, M.; Lange, J.; Stoelzle, M. Two-dimensional assessment of solute transport in shallow waters with thermal imaging and heated water. Adv. Water Resour. 2012, 43, 67–75. [CrossRef]
43. Zhou, J.; Liu, G.; Meng, Y.; Xia, C.; Chen, K.; Chen, Y. Using stable isotopes as tracer to investigate hydrological condition and estimate water residence time in a plain region, Chengdu, China. Sci. Rep. 2021, 11, 2812. [CrossRef] [PubMed] Agronomy 2021, 11, 1444 15 of 15
44. de Lima, R.L.; Abrantes, J.R.; de Lima, J.L.; de Lima, M.I.P. Using thermal tracers to estimate flow velocities of shallow flows: Laboratory and field experiments. J. Hydrol. Hydromech. 2015, 63, 255–262. [CrossRef]
45. Abrantes, J.R.; Moruzzi, R.B.; de Lima, J.L.; Silveira, A.; Montenegro, A.A. Combining a thermal tracer with a transport model to estimate shallow flow velocities. Phys. Chem. Earth

Parts A B C 2019, 109, 59–69. [CrossRef]

46. Abrantes, J.R.C.B.; de Lima, J.L.M.P.; Montenegro, A.A.A. Performance of kinematic modelling of surface runoff for intermittent rainfall on soils covered with mulch. *Rev. Bras. Eng. Agrícola E Ambient.* 2015, 19, 166–172. [CrossRef]

47. De Lima, J. L. M. P., Zehsaz, S., de Lima, M. I. P., Isidoro, J. M. G. P., Jorge, R. G., & Martins, R. (2021). Using Quinine as a Fluorescent Tracer to Estimate Overland Flow Velocities on Bare Soil: Proof of Concept under Controlled Laboratory Conditions. *Agronomy*, 11(7), 1444.

48. de Lima, J.L.M.P.; Isidoro, J.M.G.P.; de Lima, M.I.P.; Singh, V.P. Longitudinal Hillslope Shape Effects on Runoff and Sediment Loss: Laboratory Flume Experiments. *J. Environ. Eng.* 2018, 144, 04017097. [CrossRef]

49. Popova, Z., & Kuncheva, R. (1996). Modeling in Water Losses Evaluation for Nonhomogeneous Furrow Set. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(1), 1–6. doi:10.1061/(asce)0733-9437(1996)122:1(1)

50. Wöhling, T., Singh, R., & Schmitz, G. H. (2004). Physically Based Modeling of Interacting Surface–Subsurface Flow During Furrow Irrigation Advance. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130(5), 349–356. doi:10.1061/(asce)0733-9437(2004)130:5(349) [CrossRef]

51. Li, G.; Abrahams, A.D.; Atkinson, J.F. Correction factors in the determination of mean velocity of overland flow. *Earth Surf. Process. Landf.* 1996, 21, 509–515. [CrossRef]

52. Dunkerley, D. Estimating the mean speed of laminar overland flow using dye injection-uncertainty on rough surfaces. *Earth Surf. Process. Landf.* 2001, 26, 363–374. [CrossRef]

53. Th. van Genuchten, M., & Leij, F. (2001). Solute Transport. *Soil Physics Companion*, 189–248. doi:10.1201/9781420041651.ch6 [CrossRef]

54. Appels, W. M., Bogaart, P. W., & van der Zee, S. E. A. T. M. (2017). Feedbacks Between Shallow Groundwater Dynamics and Surface Topography on Runoff Generation in Flat Fields. *Water Resources Research*, 53(12), 10336–10353. doi:10.1002/2017wr020727 [CrossRef]

55. Jirka, G. H. (2001). Large scale flow structures and mixing processes in shallow flows. *Journal of Hydraulic Research*, 39(6), 567–573. doi:10.1080/00221686.2001.9628285 [CrossRef]

56. Fang, X., Thompson, D. B., Cleveland, T. G., & Pradhan, P. (2007). Variations of Time of Concentration Estimates Using NRCS Velocity Method. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 314–322. doi:10.1061/(asce)0733-9437(2007)133:4(314) [CrossRef]

57. <https://vdocument.in/embed/v1/table-of-contents-institute-for-t-chapter-2-stormwater-section-2a-1-general.html> ;NRCS Velocity method;Design Manual

58. Overland flow;T.S. Steenhuis, ... M.T. Walter, in *Encyclopedia of Soils in the Environment*, 2005

59. Kampf, S. K., & Mirus, B. B. (2013). 9.3 Subsurface and Surface Flow Leading to Channel Initiation. *Treatise on Geomorphology*, 22–42. doi:10.1016/b978-0-12-374739-6.00228-1 [CrossRef]

60. Using artificial tracers to study water losses of ephemeral floods in small arid streams; Jens Lange, Chris Leibundgut, Tamir Grodek, Judith Lekach(1998)

61. Dabiri, D., & Pecora, C. (2019). Particle tracking techniques. *Particle Tracking Velocimetry*. doi:10.1088/978-0-7503-2203-4ch5 [CrossRef]

62. Vienken, T., Huber, E., Kreck, M., Huggenberger, P., & Dietrich, P. (2017). How to chase a tracer – combining conventional salt tracer testing and direct push electrical conductivity profiling for enhanced aquifer characterization. *Advances in Water Resources*, 99, 60–66. doi:10.1016/j.advwatres.2016.11.010 [CrossRef]

63. Lam, M. Y., Ghidaoui, M. S., & Kolyshkin, A. A. (2019). Hydraulics of shallow shear flows: onset, development and practical relevance. *Environmental Fluid Mechanics*, 19(5),

- 1121–1142. doi:10.1007/s10652-019-09682-0[CrossRef]
64. Tauro, F., Aureli, M., Porfiri, M., & Grimaldi, S. (2010). Characterization of Buoyant Fluorescent Particles for Field Observations of Water Flows. *Sensors*, 10(12), 11512–11529. doi:10.3390/s101211512[CrossRef]
65. Slug injections using salt in Solution, Moore, R.D. (2004)
66. Lick, W. (2008). Sediment and Contaminant Transport in Surface Waters. doi:10.1201/9781420059885[CrossRef]
67. Soil wettability and wetting agents . . . our current knowledge of the problem, Leonard F. DeBano, Joseph F. Osborn. Jay S. Krammes, John Letey(1967)
68. Persson, M., Haridy, S., Olsson, J., & Wendt, J. (2005). Solute Transport Dynamics by High-Resolution Dye Tracer Experiments-Image Analysis and Time Moments. *Vadose Zone Journal*, 4(3), 856–865. doi:10.2136/vzj2004.0129[CrossRef]
69. Hydraulic Structures, Sheng-Hong Chen(2009)
70. Zeleňáková, M., Diaconu, D. C., & Haarstad, K. (2017). Urban Water Retention Measures. *Procedia Engineering*, 190, 419–426. doi:10.1016/j.proeng.2017.05.358
71. Characterization of Biochar and Its Effects on the Water Holding Capacity of Loamy Sand Soil: Comparison of Hemlock Biochar and Switchblade Grass Biochar Characteristics O.-Y. Yu, M. Harper, M. Hoepfl, D. Domermuth(2017)
72. Effect of Surface Morphology on the Ordered Water Layer at Room Temperature, Chunlei Wang, Bo Zhou, Peng Xiu, and Haiping Fang; *The Journal of Physical Chemistry C* 2011 115 (7), 3018-3024, DOI: 10.1021/jp108595d
73. Yang, Z. (2018). Quantitative Assessment of Groundwater and Surface Water Interactions in the Hailiutu River Basin, Erdos Plateau, China. doi:10.1201/9780429487385
74. <https://chem.libretexts.org/@go/page/351246?pdf>
75. Th. van Genuchten, M., & Leij, F. (2001). Solute Transport. *Soil Physics Companion*, 189–248. doi:10.1201/9781420041651.ch6
76. Field, M. S. (2010). Simulating Drainage from a Flooded Sinkhole. *Acta Carsologica*, 39(2). doi:10.3986/ac.v39i2.105
77. De Lima, J. L. M. P., Abrantes, J. R. C. B., Silva, V. P., & Montenegro, A. A. A. (2014). Prediction of skin surface soil permeability by infrared thermography: a soil flume experiment. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 11(2), 161–169. doi:10.1080/17686733.2014.945325
78. Luxmoore, R. J., & Sharma, M. L. (1980). Runoff responses to soil heterogeneity: Experimental and simulation comparisons for two contrasting watersheds. *Water Resources Research*, 16(4), 675–684. doi:10.1029/wr016i004p00675
79. Shingubara, S., & Kawakubo, T. (1984). Formation of Vortices around a Sinkhole. *Journal of the Physical Society of Japan*, 53(3), 1026–1030. doi:10.1143/jpsj.53.1026
80. Rau, G.C. et al., 2014. Heat as a tracer to quantify water flow in near-surface sediments. *Earth-Science Reviews*, 129, pp.40–58. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.10.015>.
81. Bai, M., Xu, D., Zhang, S., & Li, Y. (2013). Spatial-temporal distribution characteristics of water-nitrogen and performance evaluation for basin irrigation with conventional fertilization and fertigation methods. *Agricultural Water Management*, 126, 75–84. doi:10.1016/j.agwat.2013.05.006
82. Recking, A., Piton, G., Montabonnet, L., Posi, S., & Evette, A. (2019). Design of fascines for riverbank protection in alpine rivers: Insight from flume experiments. *Ecological Engineering*, 138, 323–333. doi:10.1016/j.ecoleng.2019.07.019
83. Lewis, T. J., & Beck, A. E. (1977). Analysis of heat-flow data — detailed observations in many holes in a small area. *Tectonophysics*, 41(1-3), 41–59. doi:10.1016/0040-1951(77)90179-2



84. Mayor, Á. G., Bautista, S., Small, E. E., Dixon, M., & Bellot, J. (2008). Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: A tool for assessing potential water and soil losses in drylands. *Water Resources Research*, 44(10). doi:10.1029/2007wr006367
85. Palanisamy, B. & Workman, S.R., 2015. Hydrologic Modeling of Flow through Sinkholes Located in Streambeds of Cane Run Stream, Kentucky. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(5). Available at: [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0001060](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001060).
86. Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). Infrared Thermography. doi:10.1002/9780470682234
87. Águas de Coimbra. Quality Control of Water Intended for Human Consumption Municipality of Coimbra-Boavista Supply Area—1st Semester 2020; Technical Report; Águas de Coimbra, Coimbra, Portugal, (2020)
88. de Lima J.L.M.P., Abrantes, J.R.C.B. (2014). Using a thermal tracer to estimate overland and rill flow velocities. *Earth Surface Processes and Landforms* volume 39 issue 10 on pages 1293 to 1300
89. Appels W. M., Bogaart P. W., & van der Zee S. E. A. T. M. (2017). Feedbacks Between Shallow Groundwater Dynamics and Surface Topography on Runoff Generation in Flat Fields. *Water Resources Research* volume 53 issue 12 on pages 10336 to 10353
90. Gang L., Abrahams A.D., Atkinson J.F., (1996). Correction factors in the determination of the mean velocity of overland flow. *Earth Surface Processes and Landforms*, volume 21 issue 6 on pages 509 to 515
91. John R. Davis. (1961). Estimating Rate of Advance for Irrigation Furrows. *Transactions of the ASAE*, 4(1), 0052–0054. doi:10.13031/2013.41007
92. Maheshwari, B. L., & McMahan, T. A. (1992). Modeling Shallow Overland Flow in Surface Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(2), 201–217. doi:10.1061/(asce)0733-9437(1992)118:2(201)
93. Hillel, D. (1982). *Advances in Irrigation*-De Lima, J. L. M. P., Zehsaz, S., de Lima, M. I. P., Isidoro, J. M. G. P., Jorge, R. G., & Martins, R. (2021). Using Quinine as a Fluorescent Tracer to Estimate Overland Flow Velocities on Bare Soil: Proof of Concept under Controlled Laboratory Conditions. *Agronomy*, 11(7), 1444.
94. Vynnycky, M., & Maeno, N. (2012). Axisymmetric natural convection-driven evaporation of hot water and the Mpemba effect. *International Journal of Heat and Mass Transfer*
95. Pfister, L., McDonnell, J. J., Hissler, C., & Hoffmann, L. (2010). Ground-based thermal imagery as a simple, practical tool for mapping saturated area connectivity and dynamics. *Hydrological Processes*, 24(21), 3123–3132. <https://doi.org/10.1002/hyp.7840>
96. Dunckel, A. E., Cardenas, M. B., Sawyer, A. H., & Bennett, P. C. (2009). High-resolution in-situ thermal imaging of microbial mats at El Tatio Geyser, Chile shows coupling between community color and temperature. *Geophysical Research Letters*, 36(23). <https://doi.org/10.1029/2009gl041366>
97. Schuetz, T., & Weiler, M. (2011). Quantification of localized groundwater inflow into streams using ground-based infrared thermography. *Geophysical Research Letters*, 38(3), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2010gl046198>
98. Liang, D., Chen, J. M., Chong, K. J. Y., & McCorkell, C. (2012). Thermal imaging study of temperature fields in shallow flows. *Measurement*, 45(5), 1015–1022. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.01.042>
99. Pozrikidis, C. (2009). *Fluid Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-95871-2>
100. Field, M. S. (2010). Simulating Drainage from a Flooded Sinkhole. *Acta Carsologica*, <https://doi.org/10.3986/ac.v39i2.105>
101. Shingubara, S., & Kawakubo, T. (1984). Formation of Vortices around a Sinkhole. *Journal*

- of the Physical Society of Japan, 53(3), 1026–1030. <https://doi.org/10.1143/jpsj.53.1026>
102. Wu, X., Guo, Q., Cai, M., Zhu, Y., Zhang, J., & Dong, Z. (2020). Study on the influence of fracture flow on the temperature field of rock mass with high temperature. *Case Studies in Thermal Engineering*, 22, 100755. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100755>
103. Lewis, T. J., & Beck, A. E. (1977). Analysis of heat-flow data — detailed observations in many holes in a small area. *Tectonophysics*, 41(1–3), 41–59. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90179-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90179-2)