

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Storić

Split, 2025.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Marko Storić

**Slani i topli traser testovi u 3-D
fizikalnom modelu krškog vodonosnika**

Diplomski rad

Split, 2025.



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

STUDIJ: SVEUČILIŠNI DIPLOMSKI STUDIJ GRAĐEVINARSTVO

KANDIDAT: Marko Storić

MATIČNI BROJ: 0083223483

KATEDRA: Katedra za Privrednu hidrotehniku

KOLEGIJ: Modeliranje toka i pronosa u podzemlju

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Slani i topli traser testovi u 3-D fizikalnom modelu krškog vodonosnika

Opis zadatka: Student treba izraditi cjelokupnu analizu slanih i toplih trasera u Hidrotehničkom laboratoriju u Žrnovnici. U 3-D fizikalnom modelu u vanjskom dvorištu potrebno je izvršiti eksperimentalne simulacije slanih i toplih trasera s obzirom na lokaciju utiskivanja trasera, odabira krških kanala, početnu koncentraciju ili temperaturu trasera i djelovanja oborine. Sva mjerenja je potrebno grafički obraditi u post-procesorskom grafičkom programu Tecplot.

U Splitu, 15.03.2025.

Mentor:

Prof. dr. sc. Hrvoje Gotovac

Predsjednik Povjerenstva za završne i
diplomske ispite studija Građevinarstvo:
izv. prof. dr. sc. Ivan Balić



SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE

UNIVERSITY OF SPLIT
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING,
ARCHITECTURE AND GEODESY

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

kojom ja, Marko Storić, JMBAG: 0083223483, student Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu, kao autor ovog diplomskog rada izjavljujem da sam ga izradio samostalno pod mentorstvom prof. dr. sc. Hrvoja Gotovca.

U radu sam primijenio metodologiju znanstveno-istraživačkog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju rada. Tuđe spoznaje, zaključke, teorije, formulacije i grafičke prikaze koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u radu citirao sam i povezao s korištenim bibliografskim jedinicama.

(vlastoručni potpis studenta)

Slani i topli traser testovi u fizikalnom 3D modelu krškog vodonosnika

Sažetak:

Ovaj diplomski rad usmjeren je na analizu i kvantifikaciju transportnih fenomena u podzemnim vodama, s posebnim fokusom na analizu krških vodonosnika. Zbog izražene heterogenosti i anizotropije, krški sustavi predstavljaju jedan od najkompleksnijih hidrogeoloških okoliša za modeliranje, što ovo istraživanje čini iznimno relevantnim za razumijevanje dinamike podzemnih voda.

Eksperimentalni dio istraživanja temelji se na seriji laboratorijskih traserskih pokusa. Korišteni su slani i toplinski traseri, a izbor oba tipa temelji se na sposobnosti dostupne laboratorijske opreme koja pruža detekciju navedenih trasera. Pokusi su izvedeni pod strogo kontroliranim i varijabilnim uvjetima, uključujući definiranje početne koncentracije slanog trasera, rubnih i početnih uvjeta, definiranja inteziteta oborine te praćenje polja piezometarske visine, protoka, ovđborine i koncenbtracije soli/temperature na ekstezivnom broju mjernih senzora.

Temelj za analizu predstavljale su prolazne krivulje ovisne o vremenu i koncentraciji/temperaturi trasera, koje su generirane programskom obradom podataka prikupljenih sa senzora strateški raspoređenih unutar 3D fizikalnog modela. Grafička vizualizacija i analiza ovih krivulja provedena je pomoću softverskog paketa Tecplot. Ovi parametri su esencijalni za razvoj, kalibraciju i validaciju numeričkih modela advektivno-disperzijskog pronosa tvari u krškim sustavima.

Strogo kontrolirani laboratorijski uvjeti osigurali su visoku ponovljivost pokusa i pouzdanost prikupljenih podataka. Time ovaj rad predstavlja čvrst temelj za buduća, naprednija istraživanja. Moguće nadogradnje uključuju razvoj složenijih numeričkih, stohastičkih algoritama kao i simulacija sa strojnim učenjem temeljenih na ovim eksperimentalnim podacima, usporedbu rezultata s terenskim mjerenjima te primjenu stečenih spoznaja u praktične svrhe, poput procjene ranjivosti i zaštite izvorišta u kršu.

Ključne riječi:

Krški vodonosnik, hidrodinamika krša, advektivno-disperzijski pronos, laboratorijski fizikalni 3D model, slani traser, topli traser.

Salt and heat tracer tests in a physical 3D model of a karst aquifer

Abstract:

This thesis is focused on the analysis and quantification of transport phenomena in groundwater, with a special focus on the analysis of karst aquifers. Due to their pronounced heterogeneity and anisotropy, karst systems represent one of the most complex hydrogeological environments for modeling, which makes this research extremely relevant for understanding groundwater dynamics. The experimental part of the research is based on a series of laboratory tracer experiments. Salt and heat tracers were used, and the choice of both types was based on the ability of the available laboratory equipment to detect the mentioned tracers. The experiments were performed under strictly controlled and variable conditions, including defining the initial concentration of the saline tracer, boundary and initial conditions, defining the intensity of precipitation, and monitoring the fields of piezometric head, flow, precipitation and salt concentration/temperature on an extensive number of measuring sensors.

The basis for the analysis was transient curves dependent on time and tracer concentration/temperature, which were generated by software processing of data collected from sensors strategically arranged within the 3D physical model. Graphical visualization and analysis of these curves was performed using the Tecplot software package. These parameters are essential for the development, calibration and validation of numerical models of advective-dispersive transport of substances in karst systems.

Strictly controlled laboratory conditions ensured high reproducibility of the experiments and reliability of the collected data. This work thus represents a solid foundation for future, more advanced research. Possible extensions include the development of more complex numerical, stochastic and machine learning simulations based on these experimental data, comparison of the results with field measurements, and application of the acquired knowledge for practical purposes, such as vulnerability assessment and protection of karst springs.

Key words:

Karst aquifer, karst hydrodynamics, advective-dispersive transport, laboratory physical 3-D model, salt tracer test, heat tracer test.

S a d r Ź a j

1. UVOD.....	7
2. OPIS 3D FIZIKALNOG MODELA KRŠKOG VODONOSNIKA	9
2.1 GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE I SHEMA BAZENA	9
2.2 OPIS HETEROGENOG MATERIJALA U BAZENU	10
2.3 GEOMETRIJSKI RASPORED KRŠKIH KANALA I PIEZOMETARA	14
2.4 REGULACIJA VODE U VODOSPREMNICIMA	17
2.5 MJERENJE PROTOKA.....	19
2.6 SIMULACIJA OBORINE – KIŠE.....	21
2.7 PIEZOMETRI	25
2.8 BUŠOTINE	28
2.9 OPIS PARAMETARA MODELA – SVOJSTVA AGREGATA.....	31
2.10 OPIS IZVOĐENJA TRASER TESTA	34
2.11 KALIBRACIJA ODNOSA KONCENTRACIJE I ELEKTRIČNE VODLJIVOSTI TRASERA	40
3. TRASER TESTOVI.....	42
3.1 TRASER TEST 15	42
3.2 TRASER TEST 16	46
3.3 TRASER TEST 17	50
3.4 TRASER TEST 18	54
3.5 TRASER TEST 19	57
3.6 TRASER TEST 20	60
3.7 TRASER TEST 22	63
3.8 TRASER TEST 23	66
3.9 TRASER TEST 24	69
3.10 TRASER TEST 25	72

3.11 TRASER TEST 11	75
3.12 TRASER TEST 31	78
3.13 TRASER TEST 32	81
3.14 TRASER TEST 35	85
3.15 TRASER TEST 42	88
3.16 TRASER TEST 43	91
3.17 TRASER TEST 12	96
3.18 TRASER TEST 13	99
3.19 TRASER TEST 21	103
4. ZAKLJUČAK.....	107
Literatura	109

1. UVOD

Fenomeni tečenja i pronosa tvari u krškim vodonosnicima spadaju među najsloženije probleme u hidrogeologiji. Krški vodni sustavi, koji osiguravaju zalihe pitke vode, kako u našem kraju, tako i diljem svijeta, definirani su izraženom dualnošću hidrauličkih svojstava. U njima koegzistira sporo, pretežno laminarno tečenje kroz stijensku matricu niske propusnosti s brzim, često turbulentnim tokom unutar mreže proširenih pukotina, vrtača, kanala i kaverna. Ova hidrodinamička složenost krša uvjetuje iznimnu ranjivost za opskrbu pitkom vodom; onečišćenja unesena u krški sustav mogu, putem preferencijalnih putanja kroz kanalsku mrežu, prijeći velike udaljenosti u iznimno kratkom vremenu, uz minimalno samopročišćavanje, predstavljajući tako izravnu prijetnju kvaliteti vodnih resursa. Svugdje u tekstu koristiti dvostrano ravnanje!

Analiza i predviđanje transportnih procesa u kršu stoga predstavljaju znanstveni i inženjerski imperativ. Iako terenska istraživanja, posebice traserski pokusi, nude nezamjenjiv uvid u povezanost unutar vodonosnika i karakteristična vremena putovanja, njihova je interpretacija često limitirana nedostatnom prostornom i vremenskom rezolucijom podataka te inherentnom neizvjesnošću vezanom uz geometriju podzemnih tokova i rubne uvjete. S druge strane, numeričko modeliranje, kao moćan prediktivni alat, suočava se s fundamentalnim problemom nedostatka pouzdanih, visokokvalitetnih podataka potrebnih za kalibraciju i validaciju modela, što je izravna posljedica kompleksnosti i nepristupačnosti krškog podzemlja.

U tom kontekstu, fizikalni modeli u laboratorijskom mjerilu nameću se kao ključna spona između terenskih opažanja i numeričkih simulacija. Oni omogućuju istraživanje fundamentalnih hidrodinamičkih procesa u potpuno kontroliranim i ponovljivim uvjetima. Sustavnom promjenom ulaznih parametara moguće je izolirati i analizirati pojedinačne mehanizme koji upravljaju pronosom obečišćenja ili soli, što je na terenu gotovo nemoguće postići.

Ovaj rad predstavlja rezultate istraživanja provedenog na jedinstvenom, laboratorijskom 3D fizikalnom modelu krškog vodonosnika, osmišljenom upravo za simulaciju interakcije između matričnog i kanalskog toka. 3-D fizikalni model, smješten u podzemnom bazenu, sastoji se od heterogene porozne domene izgrađene od osam slojeva precizno definiranih frakcija agregata (fini i grubi kvarcni pijesak te šljunak), unutar koje je ugrađena mreža perforiranih i

neperforiranih cijevi koje simuliraju sustav krških kanala. Kretanje trasera praćeno je u realnom vremenu pomoću mreže senzora za protok, pieozemtrasku visinu, oborinu, električnu vodljivost i temperaturu, čiji su podaci prikupljeni i obrađivani putem SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) sustava.

Metodologija obrade i analize podataka provedenih eksperimenata osmišljena je s ciljem sustavne i usporedne evaluacije. Za svaki od 19 provedenih traserskih testova izrađen je zaseban analitički izvještaj koji je dokumentirao specifične uvjete i rezultate, dok je u fazi obrade provedena usporedna analiza testova sa sličnim početnim uvjetima kako bi se identificirali ključni obrasci ponašanja. Glavni dio svakog pojedinačnog izvještaja čini grafička prezentacija triju temeljnih aspekata hidrodinamičkog odziva sustava:

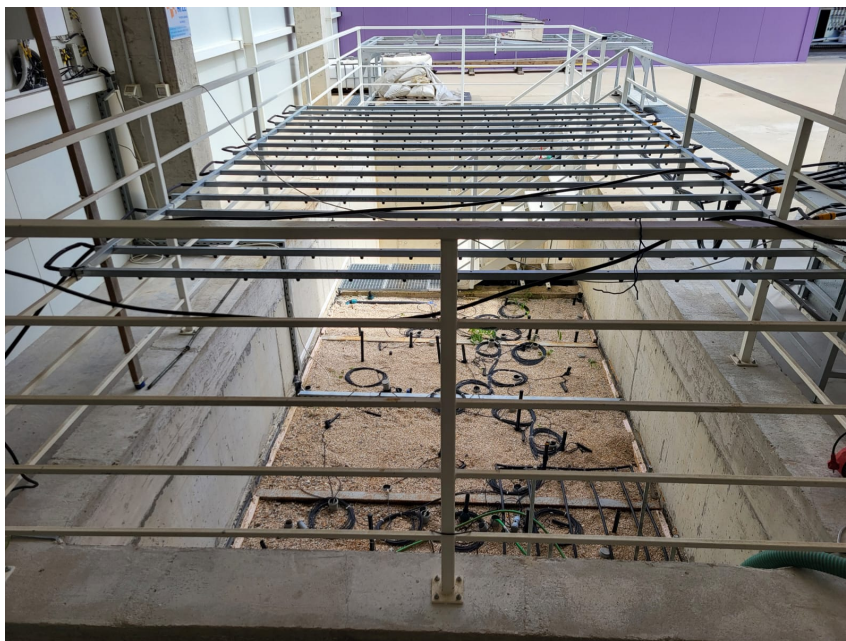
1. Vremenski niz mjerenih protoka, koji zasebno prikazuje protok kroz matričnu domenu i protok kroz aktivni (otvoreni) krški kanal;
2. Prikaz piezometarskih visina na odabranim lokacijama unutar modela radi uvida u polje hidrauličkog potencijala;
3. Prolazne krivulje trasera, prikazane kao promjena električne vodljivosti (za slane) ili temperature (za tople trasere) tijekom vremena na definiranim grupama senzora. Takav strukturirani pristup omogućio je detaljnu interpretaciju transportnih procesa.

Rezultati ovog istraživanja pružaju novi uvid u kompleksne transportne mehanizme u dvojno-poroznim sustavima. Generirani visokokvalitetni skupovi podataka predstavljaju vrijednu osnovu za testiranje i validaciju postojećih analitičkih i numeričkih modela pronosa/transporta u kršu. U konačnici, bolje razumijevanje ovih procesa doprinosi razvoju pouzdanijih alata za upravljanje i zaštitu osjetljivih krških vodnih resursa. Rad je strukturiran tako da nakon ovog uvoda slijedi detaljan opis eksperimentalnog postava, uključujući geometrijske karakteristike modela, svojstva materijala, opis hidrauličkog sustava i metodologiju izvođenja traser testova. Zatim se prikazuju i analiziraju dobiveni rezultati, nakon čega slijedi rasprava i zaključna razmatranja.

2. OPIS 3D FIZIKALNOG MODELA KRŠKOG VODONOSNIKA

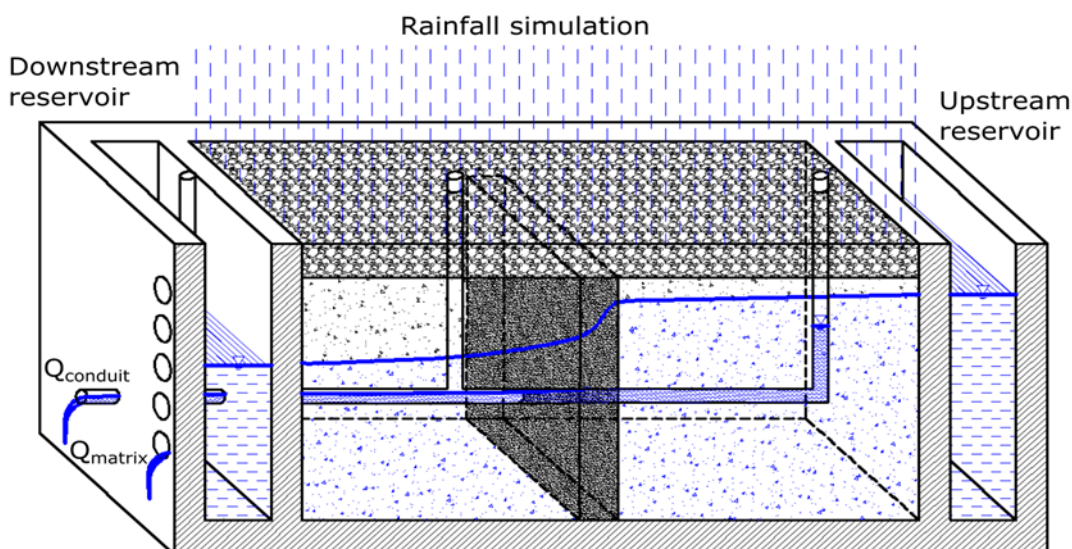
2.1 GEOMETRIJSKE KARAKTERISTIKE I SHEMA BAZENA

Za simulaciju tečenja i pronosa podzemne vode u krškom vodonosniku izgrađen je armirano-betonski bazen dimenzija: 5,66 (m) x 2,95 (m) x 2,00 (m), prikazan na slici 1. Bazen predstavlja 3D fizikalni model krškog vodonosnika, ispunjen agregatom različitih frakcija u različitim zonama te sustavom perforiranih i neperforiranih cijevi koje predstavljaju krške kanale. Agregat je raspoređen u osam horizontalnih slojeva, debljine od 25 cm. Utjecaj slijeganja nije razmatran. Ovaj 3D fizikalni model krškog vodonosnika nalazi se u Žrnovnici, u novom hidrotehničkom laboratoriju Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije, Sveučilišta u Splitu.



Slika 1: Fizikalni 3D model krškog vodonosnika.

Bazen se sastoji od tri dijela, dva vodospremnika (rezervoara) koji se nalaze na krajevima te središnjeg dijela koji je ispunjen agregatom (slika 2). Vodospremnici služe za definiranje Dirichletovih (prisilnih) rubnih uvjeta koji su na uzvodnom i nizvodnom kraju bazena određeni definiranom piezometarskom visinom vode u vodospremnicima.



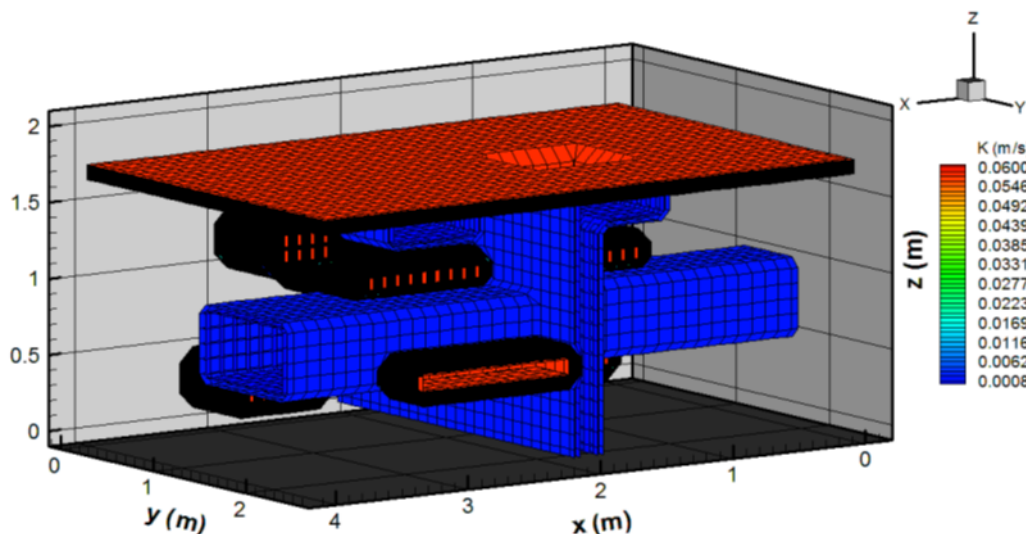
Slika 2: ovo mora biti boldano na svakoj slici Shema fizikalnog 3D modela bazena.

Iznad bazena instaliran je simulator oborine-kiše. Tečenje vode unutar domene (fizikalnog modela) odvija se kroz matricu i kanale u smjeru od uzvodnog prema nizvodnom rezervoaru. Dimenzije domene su $L_x = 4,0$ m, $L_y = 2,55$ m, te $L_z = 2,0$ m. U bazenu su također postavljeni donji piezometri za mjerenje piezometarske visine te gornji piezometri za mjerenje električne propusnosti i temperature. Svi mjerni uređaji su spojeni na Scadu, te u svakom trenutku imamo dostupne podatke o iznosima koncentracije soli, temperature, piezometarske visine, oborine i/ili protoka.

2.2 OPIS HETEROGENOG MATERIJALA U BAZENU

Kako bi simulirali kršku matricu između rezervoara, model je ispunjen heterogenim poroznim materijalom u osam slojeva po 25 cm. Korišteno je ukupno tri vrste različitih materijala, a to su: grubi kvarcni pijesak – GKP (67%) poroznosti $\eta = 0.325$, fini kvarcni pijesak – FKP (14%) poroznosti $\eta = 0.38$ i šljunak – Š (19%) poroznosti $\eta = 0.40$. Površinski sloj jedini je ispunjen cijeli od istovjetnog materijala, šljunka debljine 25 cm, kako bi simulirali prihranjivanje krškog vodonosnika. Funkcija ovog sloja jest smanjenje površinskog otjecanja i igra ulogu epikrša. U središnjem dijelu modela implementirana je zona ispunjena sitnim kvarcnim pijeskom, čija je svrha generiranje gradijenta tlaka i redukcija ukupnih brzina fluida unutar porozne sredine.

Preostali volumen modela dominantno zauzima krupni kvarcni pijesak, uz prisutnost diskretnih područja sastavljenih od dva druga dva materijala radi unosa efekta heterogenosti (slika 3).



Slika 3: Heterogenost poroznog medija.

Specifikacije veličine zrna korištenih materijala te njihov volumenski udio prikazani su u Tablici 1, dok Tablica 2 kvantificira zastupljenost svakog materijala unutar pojedinog konstruiranog sloja.

Tablica 1: ovo mora biti boldano na svakoj tablici Kvantifikacija korištenih materijala.

Materijal	Veličina zrna (mm)	Postotak ukupne zapremine (%)
Grubi kvarcni pijesak (GKP)	0-4	67,34
Fini kvarcni pijesak (FKP)	0,1-0,6	13,98
Šljunak	8-16	18,68

Tablica 2: Raspored korištenih materijala.

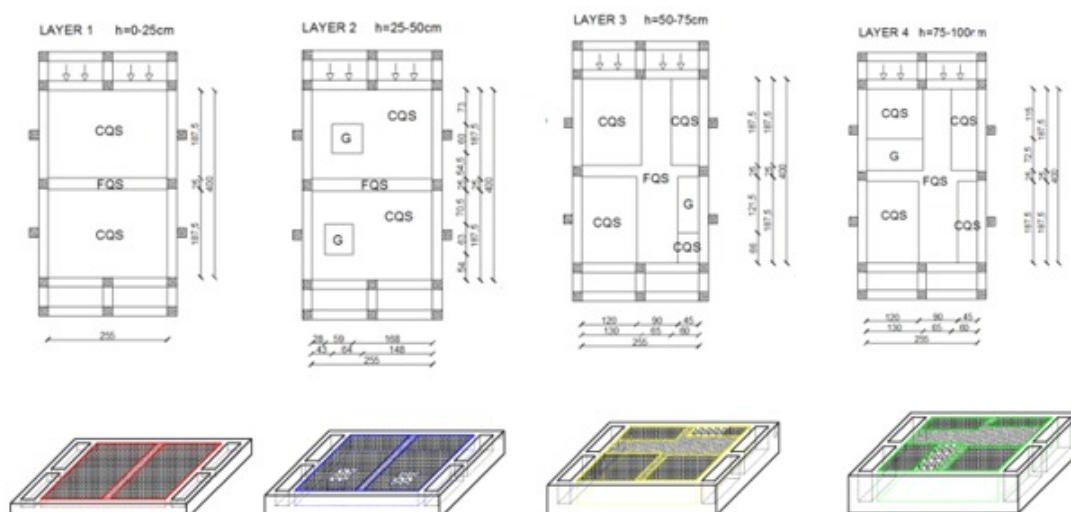
Redni broj sloja	Visinske kote slojeva (cm)	Debljina sloja (cm)	Vrsta materijala i raspored (%)		
			GKP	FKP	Šljunak
1	0-25	25	11,69	0,81	-
2	25-50	25	10,76	0,81	0,93
3	50-75	25	7,54	4,34	0,62
4	75-100	25	6,89	4,34	1,27
5	100-125	25	9,48	0,92	2,10
6	125-150	25	10,89	0,81	0,80
7	150-175	25	10,10	1,94	0,46
8	175-200	25	-	-	12,5

Bazen je punjen na način da se agregat odvajao drvenom građom kako ne bi došlo do neželjenog miješanja među različitim materijalima (slika 4).

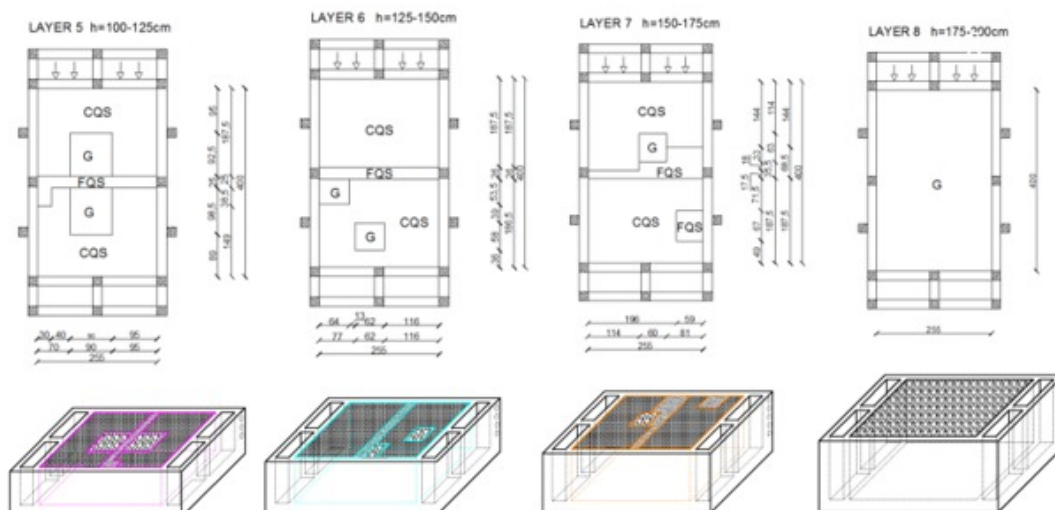


Slika 4: Proces punjenja bazena agregatom.

Na slikama 5 i 6 u nastavku prikazan je prostorni raspored prethodno navedenih osnovnih materijala kojima je ispunjen bazen po slojevima (vidi tablicu 1 i 2).



Slika 5: Shematski prikaz rasporeda materijala po slojevima od 1 do 4.

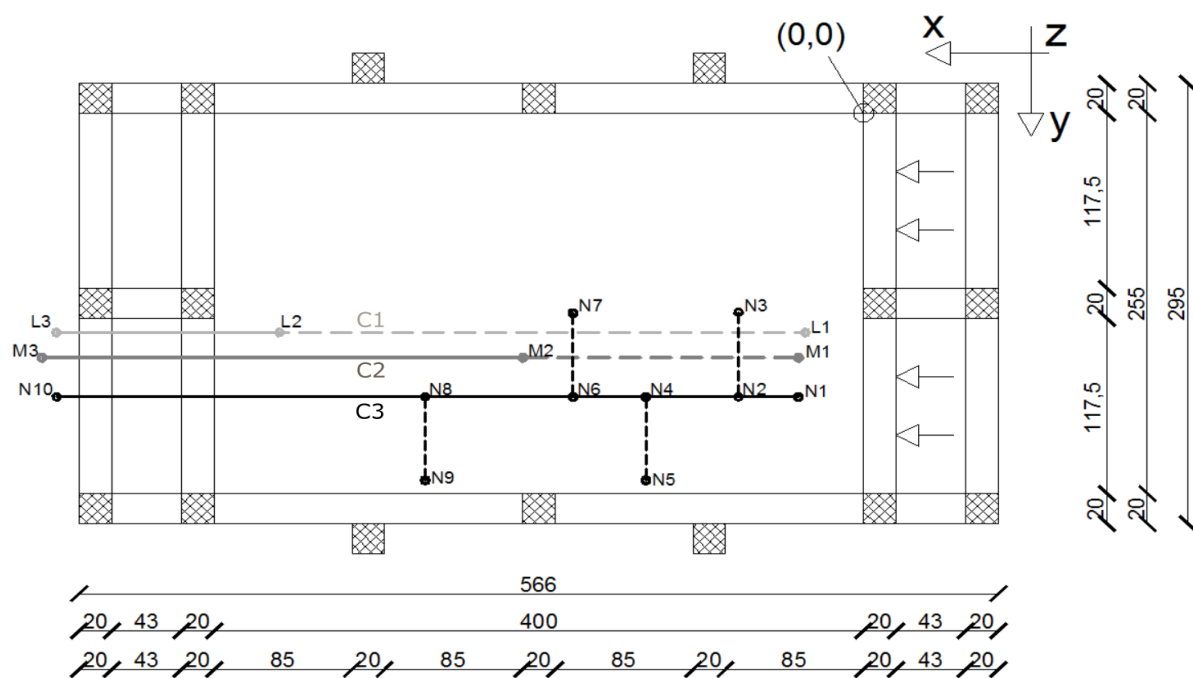


Slika 6: Shematski prikaz rasporeda materijala po slojevima od 5 do 8.

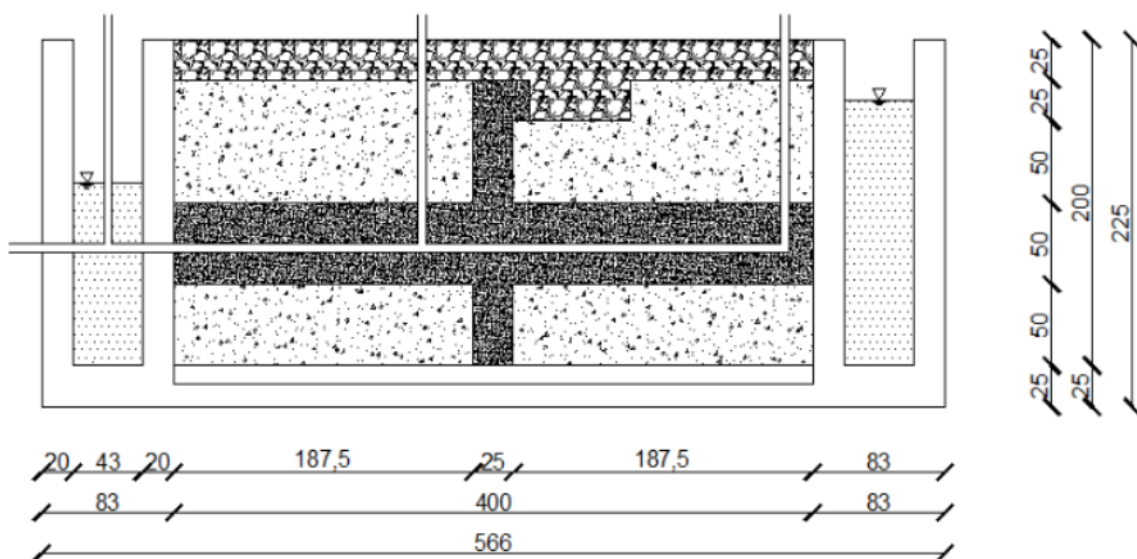
2.3 GEOMETRIJSKI RASPORED KRŠKIH KANALA I PIEZOMETARA

U 3-D fizikalni model su ugrađene plastične cijevi, na određenim dijelovima perforirane radi simulacije krških kanala, s vertikalnim cjevovodima za mjerenje piezometarske visine. Za osiguranje povezanosti između porozne matrice i krških kanala, perforirani dijelovi cijevi zaštićeni su geotekstilom i okruženi finim kvarcnim pijeskom.

Postavljene plastične cijevi koje simuliraju krške kanale označene su sa C1, C2 i C3 (slike 7 i 8). Cijevi C1 i C3 imaju promjer 0,0155 m (pola cola), dok cijev C2 ima promjer 0,042 m (dva cola). Isprekidane linije na slici 7 predstavljaju perforirane dijelove cijevi. Za cijevi C1 i C3, perforacije su ručno izrađene bušenjem rupa promjera 3 mm. C1 ima 80 perforacija ravnomjerno raspoređenih duž perforirane dužine cijevi, dok C3 ima 4 x 13 perforacija na 4 ogranka kako je prikazano na slici 7. Cijev C2 sastoji se od dva dijela: prvi je neperforirani dio PVC cijevi, a drugi je perforiran i služi kao drenažna cijev. Vrijednosti Manningovih koeficijenata za neperforirane dijelove cijevi su $n_M = 0.009 m^{1/3}$ za C1 i C3 cijevi, i $n_M = 0.015 m^{1/3}$ za C2 cijev. Manningov koeficijent za perforirani dio cijevi C2 nije naveden, stoga ga je potrebno numerički kalibrirati. Tablica 3 prikazuje koordinate točaka koje definiraju geometriju cijevi – krških kanala (prema slici 7). Slika 9 prikazuje izgled vanjskih dijelova kanala C1, C2 i C3 na fizikalnom modelu.



Slika 7: Tlocrt krških kanala (cijevi) u fizikalnom 3D modelu.



Slika 8: Poprečni presjek kroz kanal C2.

Tablica 3: Poprečni presjek kroz kanal C2.

Koordinate	$x[cm]$	$y[cm]$	$z[cm]$
L1	36	147	75
L2	360	147	71,5
L3	497	147	70
M1	40	164	75
M2	210	164	73
M3	506	164	70
N1	40	190	75
N2	77	190	74,6
N3	77	134	74,6
N4	134	190	74
N5	134	246	74
N6	179	190	73,5
N7	179	134	73,5
N8	270	190	72,5
N9	270	246	72,5
N10	497	190	70



Slika 9: Izlazni dio kanala (redom): C1(otvoren), C2 i C3(zatvoreni).

2.4 REGULACIJA VODE U VODOSPREMNICIMA

U vodospremnici se razine vode reguliraju preljevima podesivim po visini. Važno je osigurati stalnu i unaprijed definiranu piezometarsku visinu kako bi rubni uvjeti tijekom laboratorijskih testova ostali nepromijenjeni. Za sprječavanje rasta razine vode tijekom oborina i velikih protoka crpljenja, koji su potrebni za cirkulaciju vode, korišteni su preljevni lijevci velikih kapaciteta. Preljev funkcionira na način da lijevak održava konstantnu visinu, pa se višak vode ulijeva u njega te se izbacuje cijevima van bazena (slike 10 i 11).



Slika 10: Preljev u uzvodnom rezervoaru.



Slika 11: Preljev u nizvodnom rezervoaru.

2.5 MJERENJE PROTOKA

Od temeljne važnosti za praćenje trasera je poznavanje protoka u matrici i kanalima. Protok matrice je ukupna količina vode koja istječe iz nizvodnog rezervoara i mjeri se na preljevu koji održava fiksnu razinu niova vode. Fiksna razina rezervoara, osigurana preljevom velikog kapaciteta, znači da je matrični protok identičan protoku preljeva. Obje komponente, preljevna voda iz akumulacije (tj. ispuštanje matrice) i protok iz kanala, usmjeravaju se i mjere digitalnim protokomjerima instaliranim na nizvodnom dijelu modela. Mjerenje protoka matrice pruža ključne informacije koje su u praksi često nedostupne. Tijekom eksperimenta, kontinuirano se mjere protok i električna vodljivost. Mjerenjem električne vodljivosti dobivaju se podaci o načinu rasprostiranja slanog trasera unutar fizičkog modela. U usporedbi sa pravim krškim vodonosnicima, protok u kanalima smatra se glavnim izvorom, dok se protok matrice odnosi na ukupnu količinu vode koja teče pored glavnog izvora – kroz poroznu matricu, pukotine i naprsline. Na slikama 11 i 12 prikazani su mjerači protoka u matrici i kanalima.



Slika 12: Digitalni mjerač protoka kanala tipa ISOMAG.



Slika 13: Digitalni mjerač protoka matrice tipa ISOMAG.

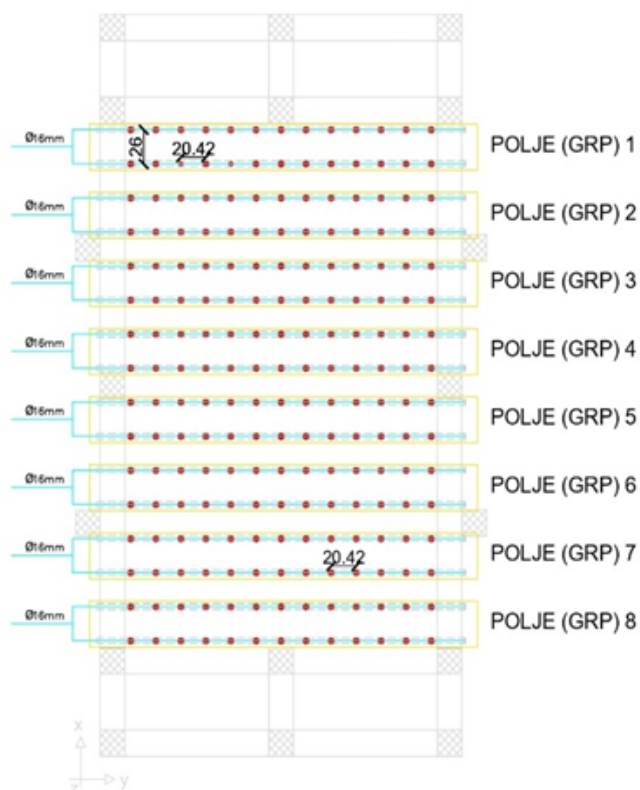
2.6 SIMULACIJA OBORINE – KIŠE

Za simulaciju oborina na cijelom gornjem dijelu modela koriste se integrirane prskalice postavljene iznad bazena s mogućnošću generiranja prostorno distribuiranih oborina, kako je prikazano na slici 14. Postavljen je raster od 16 x 13 prskalica, što daje ukupan zbir od 208 prskalica.



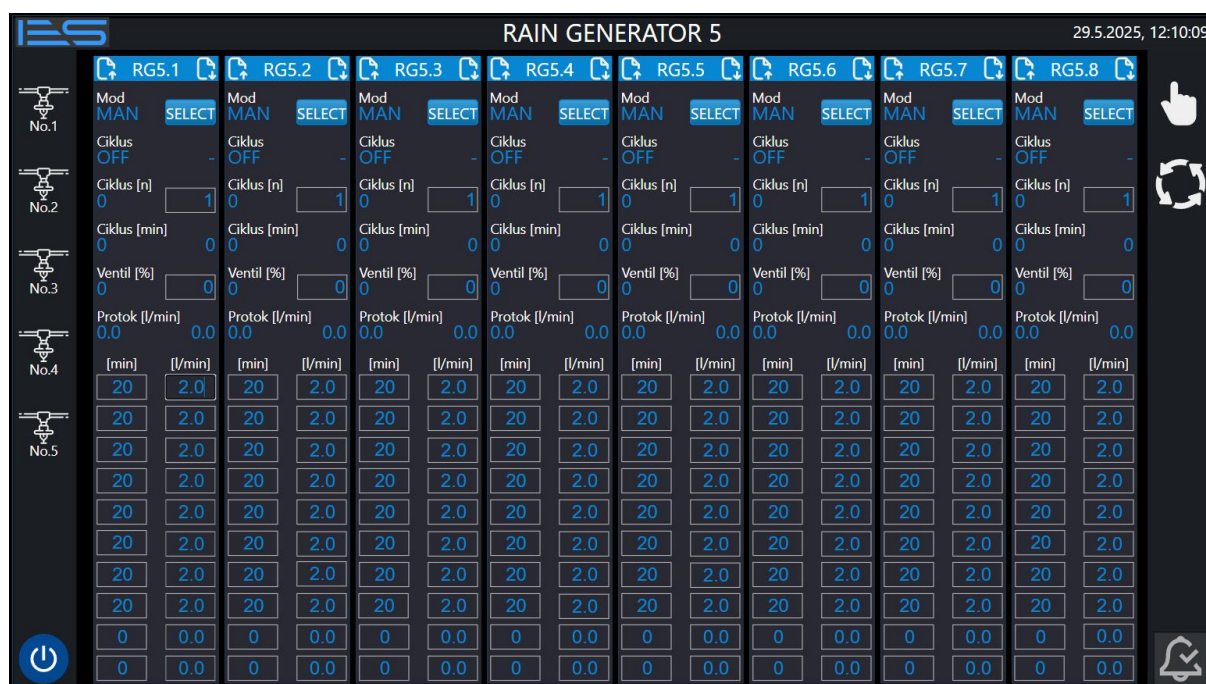
Slika 14: Prikaz modela prskalica nad bazenom.

U dužem smjeru bazena razmak između prskalica je 26 cm, a u kraćem smjeru razmak je postavljen na 20.42 cm. Dotok vode do samih prskalica odvija se kroz cijev promjera $\varnothing 16$ mm. Sustav prskalica podijeljen je na osam polja, pa tako postoji mogućnost definiranja zadane oborine u vremenu za sva polja. Navedeni geometrijski raspored prikazan je na slici 15.



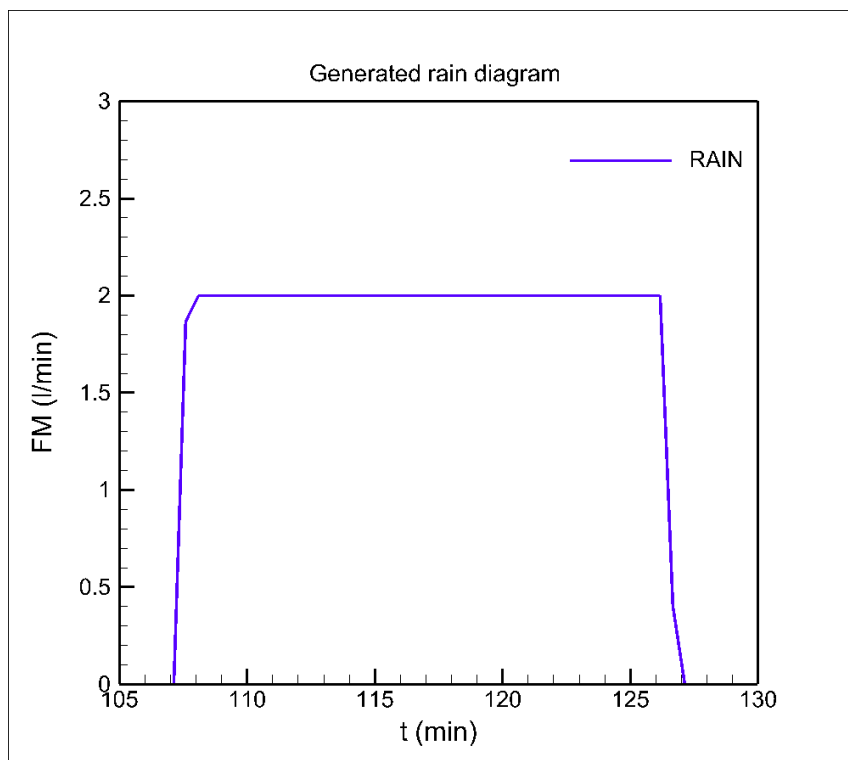
Slika 15: Prikaz sheme prskalica.

Protok i trajanje oborina precizno se zadaju, prate i reguliraju putem digitalnih mjerača protoka, a interaktivni računalni prikaz u stvarnom vremenu omogućen je putem IES Scade koja je posebno kreirana za naš laboratorij.



Slika 16: Interaktivni sustav praćenja i upravljanja oborinom u realnom vremenu - IES Scada.

Dijagram oborine, koji se koristi za sve testove u kojima je primijenjena simulacija kiše, kreiran je i kontroliran putem naprednog računalnog programa IES Scada. Korištenjem IES Scada sustava (slika 16) osigurana je visoka preciznost i ponovljivost uvjeta oborine, što je ključno za standardizaciju eksperimenata i komparativnu analizu rezultata različitih traser testova. Dijagram prikazan na slici 17 vizualno ilustrira npr. jednoliku raspodjelu intenziteta oborine tijekom definiranog vremenskog perioda. Ovakav pristup omogućuje dosljedno ispitivanje reakcije sustava na doprinos površinske vode te analizu njenog utjecaja na advekciju, disperziju i mobilizaciju trasera iz različitih dijelova modela, ovisno o specifičnoj konfiguraciji testa. Slika 18 prikazuje ventilski regulacijski spoj modela prskalica sa vodovodnom mrežom.



Slika 17: Generirani dijagram oborine na jednom polju.



Slika 18: Ventilski regulacijski spoj modela prskalica sa vodovodnom mrežom.

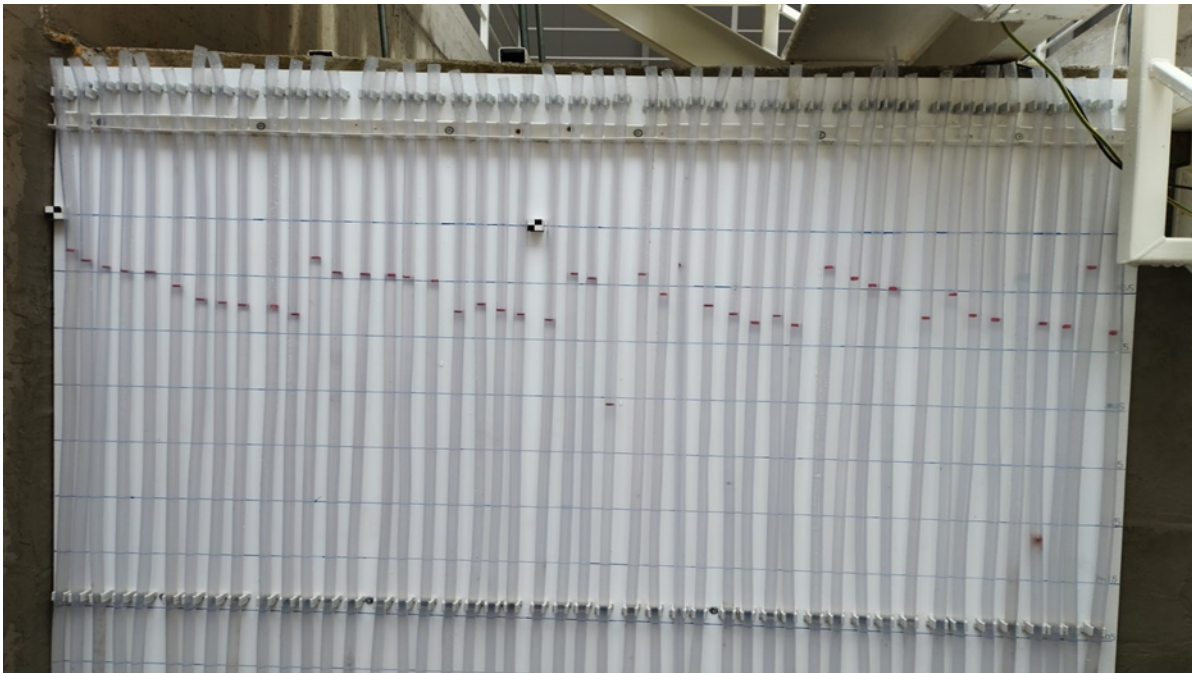
2.7 PIEZOMETRI

Raspodjela tlaka mjeri se u 44 fiksne točke pomoću tzv. donjih piezometara ugrađenih kroz temeljnu ploču i vertikalno podignutih u poroznoj matrici (slika 19). Ove su cijevi perforirane samo na svojim krajevima (unutar poroznog medija) i povezane s prozirnim cijevima (mjerilima razine vode) na prednjoj strani modela (slika 20). Razine vode u tim cijevima odražavaju vrijednosti piezometarske visine u specifičnim točkama unutar domene modela. Položaj svih instaliranih piezometara prikazan je na slici 21, a njihove koordinate navedene su u Tablici 4.

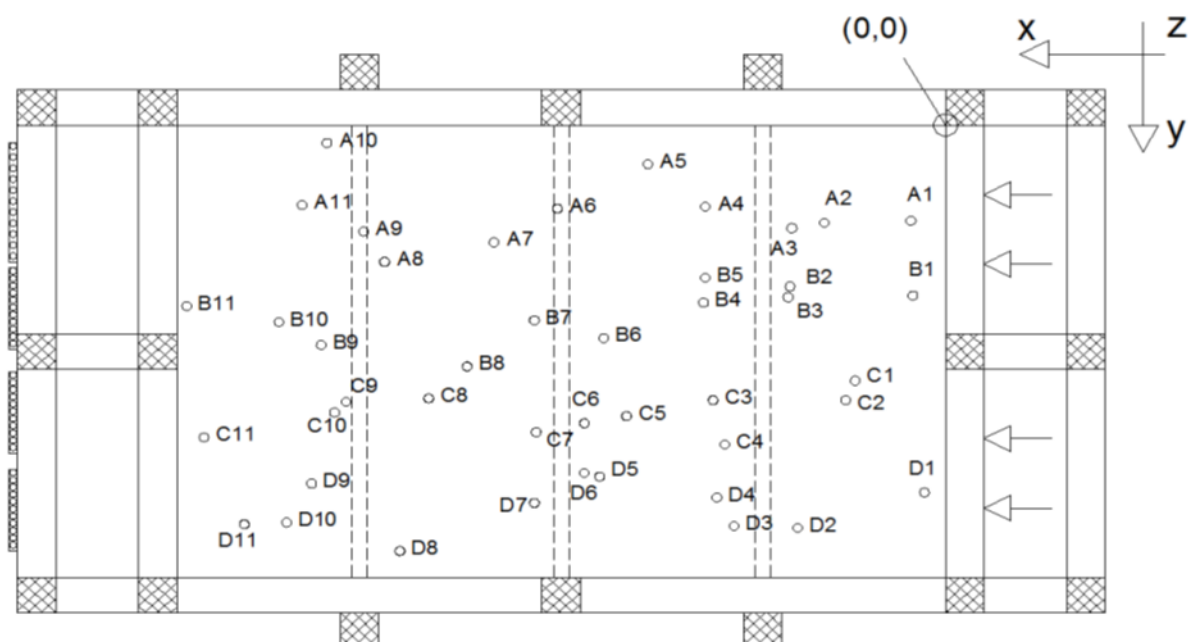
Tijekom eksperimenata, pokazalo se da neki piezometri ne rade ispravno i stoga su isključeni iz mjerenja. Vjerojatni uzroci su zarobljeni zrak ili začepljenje perforacija. Piezometri koji nisu korišteni su: A11, B8, C9, C10, D2, D9 i D10.



Slika 19: Prikaz ugradnje piezometara kroz temeljnu ploču.



Slika 20: Prikaz piezometarskih visina.



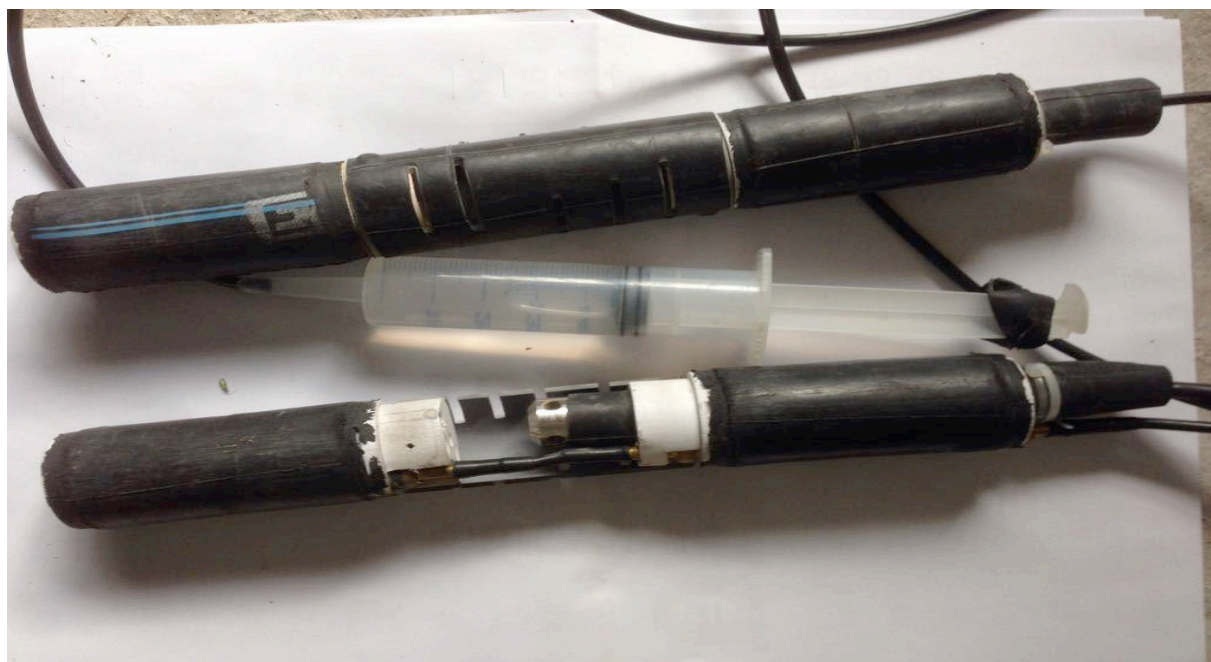
Slika 21: Prikaz položaja piezometara.

Tablica 4: Prikaz koordinata piezometara u poraznoj matrici.

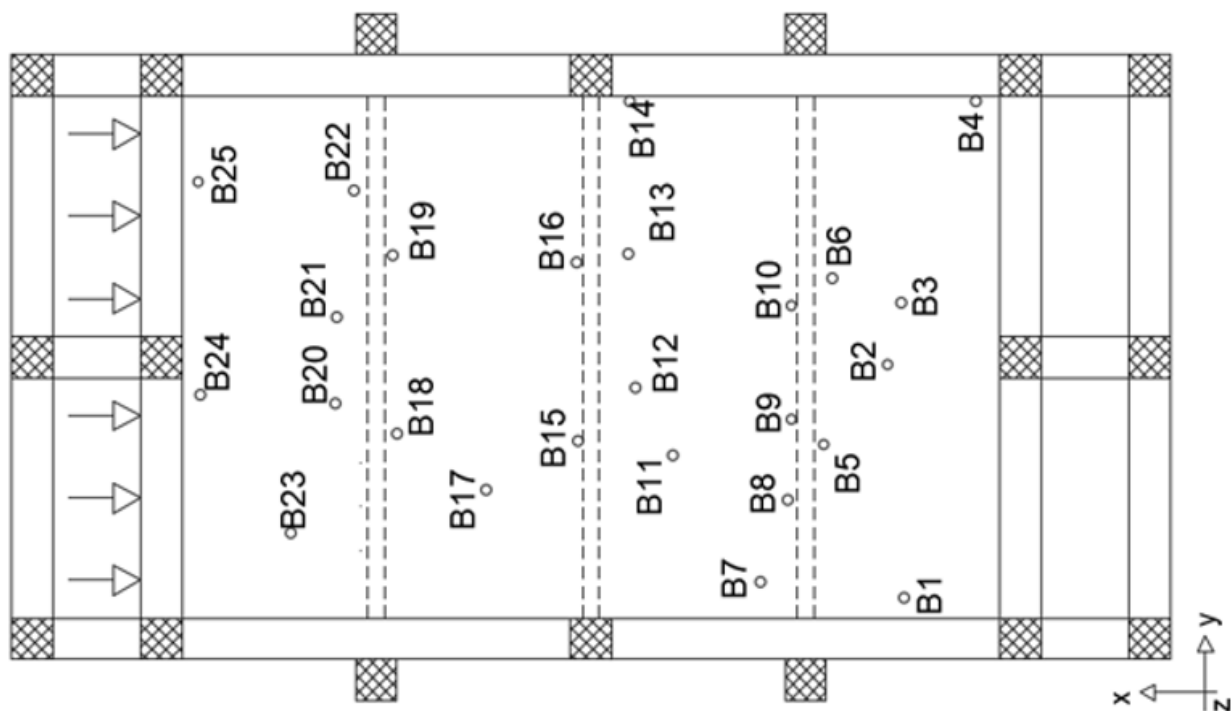
PIEZOMETAR	$x[cm]$	$y[cm]$	$z[cm]$	PIEZOMETAR	$x[cm]$	$y[cm]$	$z[cm]$
A1	17	54	77	C1	47	144	105
A2	63	54	100	C2	52	155	33
A3	80	58	32	C3	121	155	65
A4	125	46	75	C4	115	180	95
A5	155	22	100	C5	166	164	39
A6	202	47	42	C6	188	168	63
A7	235	66	65	C7	203	173	102
A8	292	77	106	C8	269	154	31
A9	303	60	33	C9	318	162	60
A10	322	10	100	C10	312	156	100
A11	335	45	70	C11	386	176	33
B1	17	96	33	D1	11	207	33
B2	81	91	65	D2	77	227	70
B3	82	97	100	D3	110	226	100
B4	126	100	33	D4	117	210	34
B5	125	86	65	D5	180	198	69
B6	178	120	100	D6	188	196	120
B7	216	110	43	D7	214	213	36
B8	249	136	60	D8	284	240	60
B9	325	124	100	D9	330	202	100
B10	347	111	33	D10	343	224	34
B11	395	102	60	D11	365	225	85

2.8 BUŠOTINE

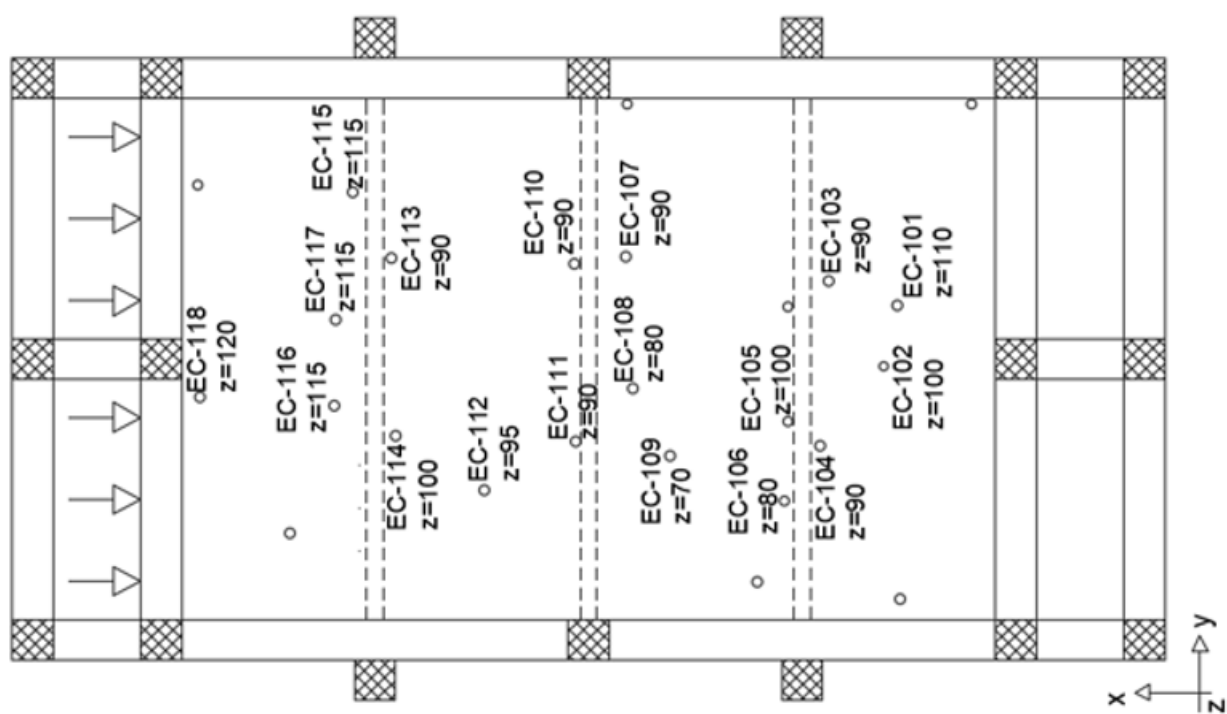
Dvadeset i pet potpuno perforiranih vertikalnih cijevi – gornjih piezometara postavljeno je za simulaciju praćenja trasera soli i topline. Kako bi se omogućila selektivna izolacija dijela cijevi (približno 10 cm) na željenoj dubini, koriste se bušotinski pakeri (slika 22). Pakeri su specijalizirani uređaji koji se koriste za izolaciju određenog djela bušotine. Oni su vrsta brtve koja se spušta u cijev bušotine i tamo stvara izdvojeni dio piezometra u kojem vršimo mjerenja. To omogućava postavljanje senzora tlaka ili crijeva za vodu na bilo kojoj dubini unutar bušotine za mjerenje tlaka ili provedbu parcijalnih crpnih testova. Dodatno, mjerenja električne vodljivosti i temperature provodit će se unutar bušotina tijekom traser testova. Preko električne vodljivosti posredno računamo koncentraciju soli u točkama, te dobivamo oblake rasprostranjenosti trasera. Raspored svih instaliranih bušotina prikazan je na slici 23, dok su njihove koordinate detaljno navedene u Tablici 5.



Slika 22: ECT senzori u pakerima za mjerenje električne vodljivosti i temperature.



Slika 23: Položaji bušotina u bazenu.



Slika 24: Vertikalni položaji pakera i oznake ECT senzora u bazenu.

Tablica 5: Prikaz položaja pakera i senzora.

Bušotina	Senzor	$x[cm]$	$y[cm]$	$z[cm]$
B1	-	353	10	-
B2	<i>EC 102</i>	345	124	100
B3	<i>EC 101</i>	352	154	110
B4	-	388	255	-
B5	<i>EC 104</i>	314	85	90
B6	<i>EC 103</i>	318	166	90
B7	-	282	17	-
B8	<i>EC 106</i>	296	58	80
B9	<i>EC 105</i>	298	97	100
B10	-	299	153	-
B11	<i>EC 109</i>	241	76	70
B12	<i>EC 108</i>	236	110	80
B13	<i>EC 107</i>	230	174	90
B14	-	219	254	-
B15	<i>EC 111</i>	196	87	90
B16	<i>EC 110</i>	204	172	90
B17	<i>EC 112</i>	150	58	95
B18	<i>EC 114</i>	105	90	100
B19	<i>EC 113</i>	103	177	90
B20	-	75	105	135
B21	<i>EC 117</i>	76	184	115
B22	<i>EC 115</i>	84	209	-
B23	-	53	42	-
B24	-	9	109	-
B25	-	8	213	-
POČETNA KONCENTRACIJA	<i>EC 118</i>	-	-	-
NIZVODNI REZERVOAR	<i>EC 119</i>	-	-	-
KANAL	<i>EC 120</i>	-	-	-

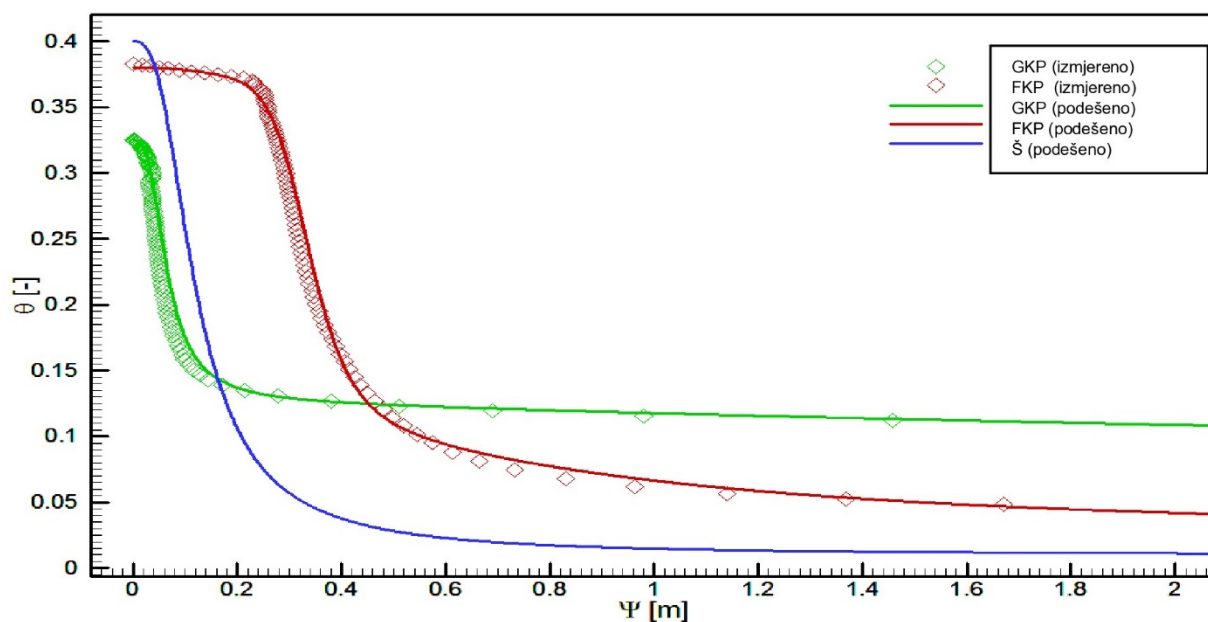
2.9 OPIS PARAMETARA MODELA – SVOJSTVA AGREGATA

Uzorci tla su ispitani u specijaliziranom laboratoriju za mjerenje parametara zasićenog i nezasićenog tla. Međutim, zbog izrazito visoke vodljivosti, rezultati za šljunak (Š) nisu dobiveni. Stoga su uz laboratorijski dobivene vrijednosti (za grubi kvarcni pijesak (GKP) i fini kvarcni pijesak (FKP)) izvedeni posebno dizajnirani Darcy-evi pokusi za sva tri materijala. Zatim je izvršena numerička kalibracija na dodatnim eksperimentima kako bi se dobile konačne vrijednosti. Tijekom numeričkih kalibracija, bilo je potrebno uzeti u obzir anizotropiju tla kako bi se dobili razumni rezultati. Tablica 6 prikazuje dobivene raspone i konačne vrijednosti za zasićene hidrauličke vodljivosti. Vrijednosti specifičnog koeficijenta skladištenja (S_s) preuzete su iz literature.

Tablica 6: Hidraulička vodljivost izmjereni raspon i izmjerene vrijednosti nakon kalibracije.

Materijal	Raspon mjerenja		Izmjerene vrijednosti	
	$K_{\min} \text{ (m/s)}$	$K_{\max} \text{ (m/s)}$	$K_H \text{ (m/s)}$	$K_V \text{ (m/s)}$
Grubi kvarcni pijesak	$4,14 \times 10^{-4}$	$8,00 \times 10^{-3}$	$3,40 \times 10^{-3}$	$1,26 \times 10^{-3}$
Fini kvarcni pijesak	$7,12 \times 10^{-5}$	$3,47 \times 10^{-4}$	$2,00 \times 10^{-4}$	$8,00 \times 10^{-5}$
Šljunak	$2,80 \times 10^{-2}$	$7,10 \times 10^{-2}$	$6,00 \times 10^{-2}$	$6,00 \times 10^{-2}$

Nezasićena svojstva tla opisuju se retencijskim krivuljama odnosa propusnosti, zasićenja i tlaka. Ove krivulje predstavljaju odnos između usisavanja tla i volumetrijskog sadržaja vode i prikazane su za tri korištena materijala na Slici 22. Izmjerene vrijednosti (za GKP i FKP) prilagođene su bimodalnim van Genuchtenovim modelom, dok je klasična (unimodalna) krivulja za šljunak (Š) dobivena literaturnim smjernicama i numeričkom kalibracijom. Vrijednosti van Genuchtenovih parametara dane su u tablici 7.



Slika 25: Krivulje zadržavanja vode za korištene materijale.

U Tablici 7 dani su parametri za sve tri vrste materijala:

K_H - tenzor hidraulične propusnosti u horizontalnom smjeru,

K_V - tenzor hidraulične propusnosti u vertikalnom smjeru,

S_S - koeficijent specifičnog uskladištenja,

θ_r - zaostali zapreminski sadržaj vode,

τ - parametar zakrivljenosti,

w_1 i w_2 - težinski faktori,

n_1 i n_2 - indeksi raspodjele veličine pora,

α_1 i α_2 - inverzna tlačna visina ulaznog zraka,

η - poroznost.

Tablica 7: Parametri nezasićenog tla za tri različita materijala tla: grubi kvarcni pijesak, fini kvarcni pijesak i šljunak.

Parametar	Grubi kvarcni pijesak	Fini kvarcni pijesak	Šljunak
$K_H (m/s)$	$3,40 \times 10^{-3}$	$2,00 \times 10^{-4}$	$6,00 \times 10^{-2}$
$K_V (m/s)$	$1,26 \times 10^{-3}$	$8,00 \times 10^{-5}$	$6,00 \times 10^{-2}$
$S_S (m^{-1})$	$1,00 \times 10^{-5}$	$1,00 \times 10^{-4}$	$1,00 \times 10^{-6}$
$\alpha_1 (m^{-1})$	18,00	3,00	10,00
$\alpha_2 (m^{-1})$	0,50	2,00	-
$n_1 (-)$	3,20	9,20	2,90
$n_2 (-)$	1,30	2,20	-
$w_1 (-)$	0,62	0,67	1,00
$w_2 (-)$	0,38	0,33	0,0
$\tau (-)$	2,96	2,295	0,50
$\eta (-)$	0,325	0,38	0,40
$\theta_r (-)$	0,005	0,02	0,01

2.10 OPIS IZVOĐENJA TRASER TESTA

Traser ispitivanja provedena u Hidrotehničkom laboratoriju Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta u Splitu mogu se klasificirati u dvije osnovne kategorije: ispitivanja pomoću slanog traseru i ispitivanja pomoću toplog traseru. Većina provedenih ispitivanja pripadala je prvoj skupini, tj. radilo se o ispitivanjima sa slanim traserom. Za potrebe ispitivanja sa slanim traserom, pripremana je otopina natrijevog klorida u vodi iz javnog vodovodnog sustava. Tipično, u približno 200 litara vode otapalo se oko 1 do 3 kilograma kuhinjske soli (NaCl), ovisno o željenoj koncentraciji otopine i specifičnim zahtjevima ispitivanja. Postupak pripreme otopine obuhvaćao je dva glavna koraka: prvo, grubo miješanje pomoću kinetičke energije struje vode koja se direktno upuštala u plastični spremnik (badanj, vidi sliku 26) s prethodno dodanom soli, te drugo, dodatno ručno miješanje pomoću drvene letve, kako bi se osigurala potpuna homogenizacija otopine. dvostruko ravnanje!!!!



Slika 26: Spremnik za vodu (badanj) iz kojega smo utiskivali slani traser u matricu.

U jednome od ispitivanja, iznimno je korišten veći volumen trasea pripremljen u plastičnom spremniku kapaciteta 1000 litara na slici 27. U tom slučaju, u vodu je dodano približno 10 kilograma kuhinjske soli (NaCl), čime je dobivena otopina slične koncentracije, ali veće količine, pogodna za provođenje kompleksnijih scenarija trasiranja.



Slika 27: Veliki spremnik za vodu kapaciteta 1000 litara.

Distribucija pripremljene otopine provedena je pomoću električne pumpe (slika 28), kojom je slani traser injektiran u fizikalni model na tri različita načina:

1. Utiskivanje u bušotinu B20 (slika 29).
2. Površinsko utiskivanje pomoću sustava prskalica, čime se traser disperzirao po površini terena (slika 30).
3. Utiskivanje izravno u horizontalni kanal C1 preko povezane vertikalne cijevi kojom su kanal C1 i površina međusobno povezani (slika 31).



Slika 28: Pumpa za injektiranje slanog trasera iz spremnika u matricu.



Slika 29: Bušotina B20.



Slika 30: Površinsko utiskivanje trasera preko sistema prskalica.



Slika 31: Utiskivanje u kanal CI.

Topli traser testovi izvedeni su tako da se približno 200 litara vode prethodno zagrijavalo u električnom bojleru. Postignuta početna temperatura otopine kretala se u rasponu od 35 °C do 37 °C. U tablici 8 u nastavku prikazani su svi traser testovi sa svim svojim glavnim značajkama. Traser testovi u tablici upisani su redoslijedom obrade.

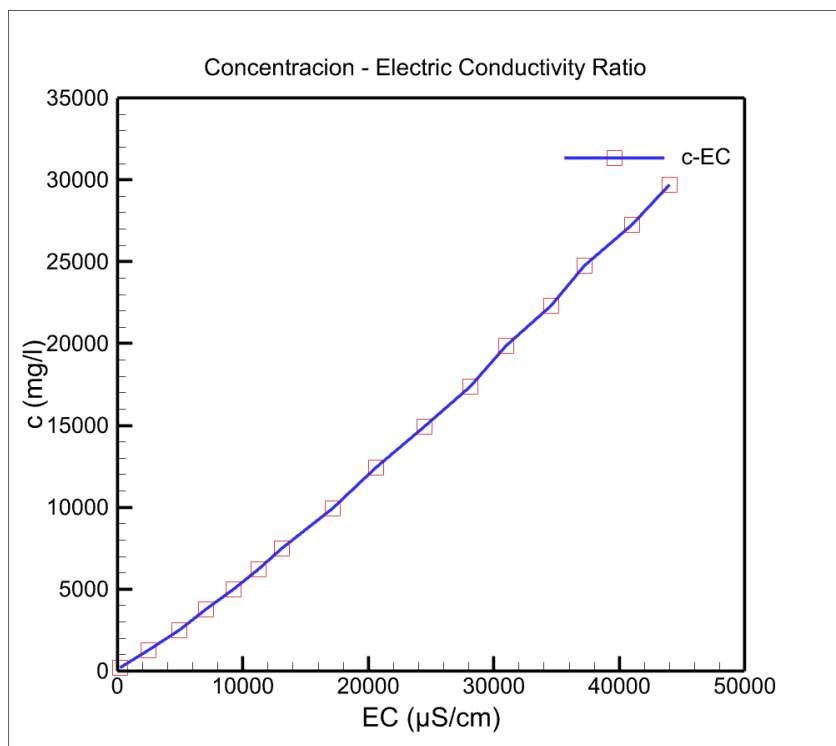
Broj testa	Vrsta testa	Tip utiskivanja	Početak traser testa	Vrijeme utiskivanja trasera	Kiša-trajanje	Kiša-intenzitet	Početna koncentracija/temperatura	Kanal
15	SLANI	B20	9:06	11:46-11:56	12:18-12:38	2l/min	29450 $\mu S/cm$	C1
16	SLANI	B20	9:00	11:29-11:40	12:11-12:31	2l/min	11750 $\mu S/cm$	C1
17	SLANI	POVRŠINSKO	7:00	8:55-9:13	9:34-9:54	2l/min	11740 $\mu S/cm$	C3
18	SLANI	POVRŠINSKO	13:42	14:12-14:24	-	-	11250 $\mu S/cm$	C3
19	SLANI	B20	10:34	11:25-11:36	11:56-12:16	2l/min	13310 $\mu S/cm$	C3
20	SLANI	B20	7:30	8:21-8:33	-	-	13540 $\mu S/cm$	C2
22	SLANI	B20	7:00	8:17-8:29	8:52-9:12	2l/min	13800 $\mu S/cm$	C2
23	SLANI	POVRŠINSKO	7:00	12:36-12:54	13:14-13:34	2l/min	11540 $\mu S/cm$	C2
24	SLANI	POVRŠINSKO	7:00	10:17-10:37	-	-	12150 $\mu S/cm$	C1
25	SLANI	POVRŠINSKO	7:00	11:00-11:24	11:43-12:03	2l/min	12560 $\mu S/cm$	C1
11	SLANI	B20	9:02	13:00-13:10	-	-	13500 $\mu S/cm$	C3
31	TOPLI	B20	11:00	13:56-14:07	-	-	35 °C	C1
32	TOPLI	B20	9:41	11:41-11:52	-	-	36 °C	C2
35	TOPLI	B20	9:42	11:33-11:44	-	-	37 °C	C3
42	SLANI	C1	8:39	10:35-10:46	-	-	29000 $\mu S/cm$	C1
43	SLANI	C1	10:36	11:54-12:40	-	-	17300 $\mu S/cm$	C1
12	SLANI	POVRŠINSKO	13:43	13:43-14:04	-	-	30000 $\mu S/cm$	C3
13	SLANI	POVRŠINSKO	12:40	13:40-14:05	14:25-14:45	2l/min	29500 $\mu S/cm$	C2
21	SLANI	POVRŠINSKO	9:32	10:32-10:52	-	-	13820 $\mu S/cm$	C2

Tablica 8: Evidencija provedenih traser testova

2.11 KALIBRACIJA ODNOSA MASENE KONCENTRACIJE I ELEKTRIČNE VODLJIVOSTI SLANOG TRASERA

U hidrogeološkim istraživanjima krških vodonosnika, praćenje pronosa/transporta tvari često se provodi pomoću traser testova, gdje se kao traser koristi sol (NaCl) zbog svoje topivosti i mjerljivosti. Električna vodljivost (EC) vodene otopine proporcionalna je koncentraciji otopljenih iona, što omogućuje njenu primjenu kao pouzdanog indikatora koncentracije trasera u vodi. Za preciznu interpretaciju terenskih i modelskih eksperimentalnih podataka, ključno je prethodno uspostaviti robustan kalibracijski odnos između koncentracije korištenog trasera i električne vodljivosti otopine. U tu svrhu, provedeno je laboratorijsko ispitivanje u kontroliranim uvjetima, gdje su pripremljene otopine natrijevog klorida (NaCl) različitih poznatih masenih koncentracija u običnoj vodi. Za svaku pripremljenu otopinu precizno je izmjerena električna vodljivost. Grafički prikaz dobivenih eksperimentalnih podataka, koji ilustrira ovisnost električne vodljivosti o koncentraciji NaCl , prikazan je na slici 32. Analiza prikazanih podataka potvrđuje blago nelinearan odnos između koncentracije soli i električne vodljivosti. U niskim koncentracijskim područjima, odnos je gotovo linearan, dok se pri višim koncentracijama primjećuje odstupanje od linearne ovisnosti.

Ova kalibracijska krivulja predstavlja temelj za konverziju izmjerenih vrijednosti električne vodljivosti u stvarne koncentracije trasera tijekom izvršenih laboratorijskih traser testova, osiguravajući preciznost u analizi transportnih procesa unutar krškog vodonosnika.

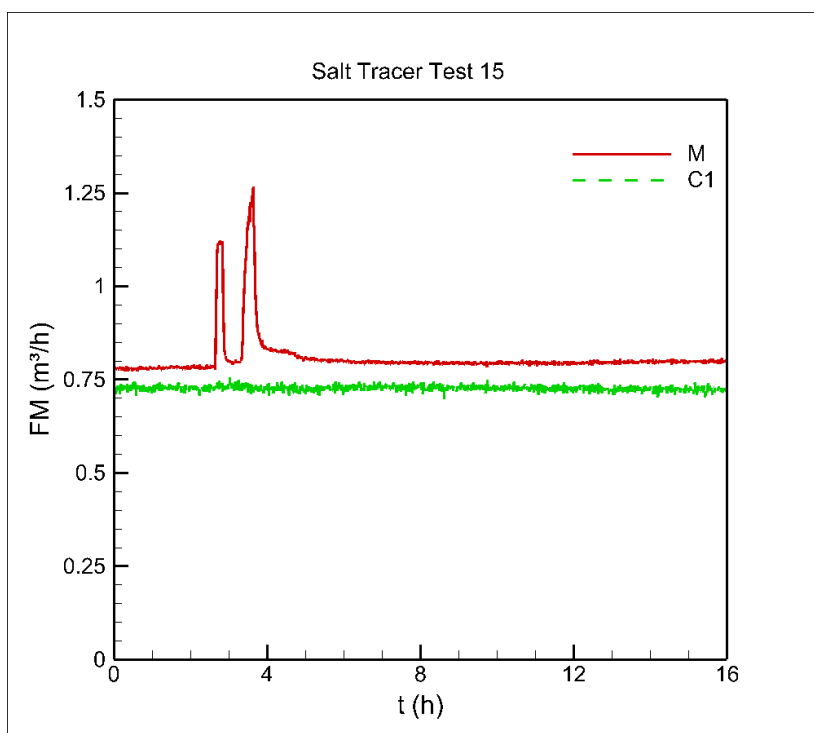


Slika 32: Odnos koncentracije i električne vodljivosti vodene otopine natrijevog klorida (NaCl).

3. TRASER TESTOVI

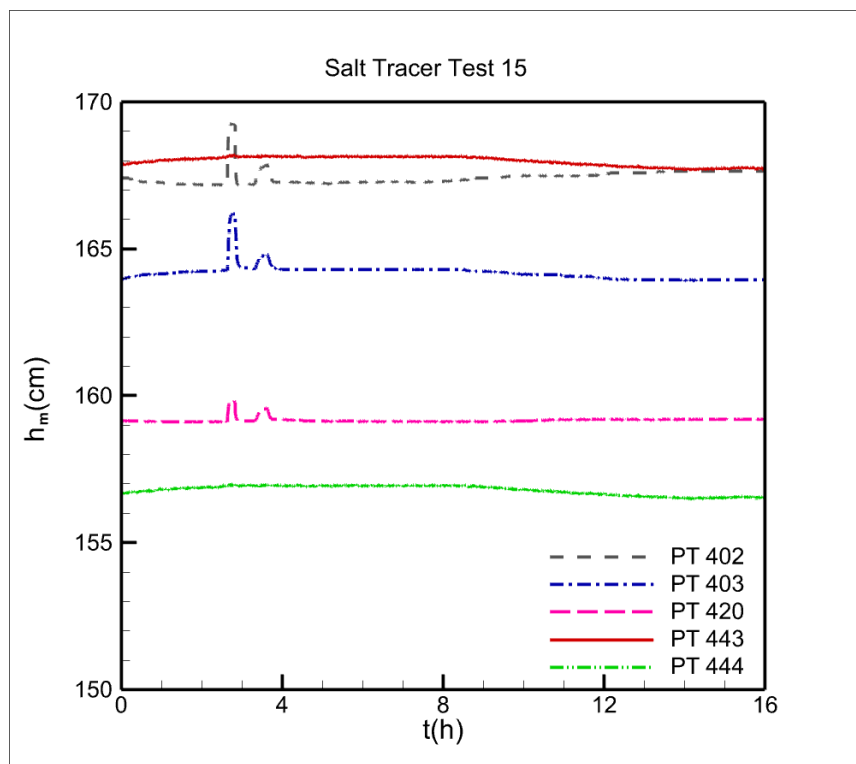
3.1 TRASER TEST 15

Početak utiskivanja slanog traseru je u 11:46 h, a završetak u 11:56 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16$ h. Slani traser se unosi sa malom protočnom pumpom direktno u bušotinu B20 sa mješavinom od cca 3 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $29\,450\,\mu\text{S}/\text{cm}$ kao što se može vidjeti na slici 35 (slika 35d), senzor ECT 118. Dodatno, puštena je umjetna kiša-oborina sa 25 prskalica raspoređenih na rasteru 0.85×0.85 m u vremenu od 12:18 h do 12:38 h, intenzitetom protoka $2\,\text{l}/\text{min}/\text{m}^2$. Otvoren je kanal C1.



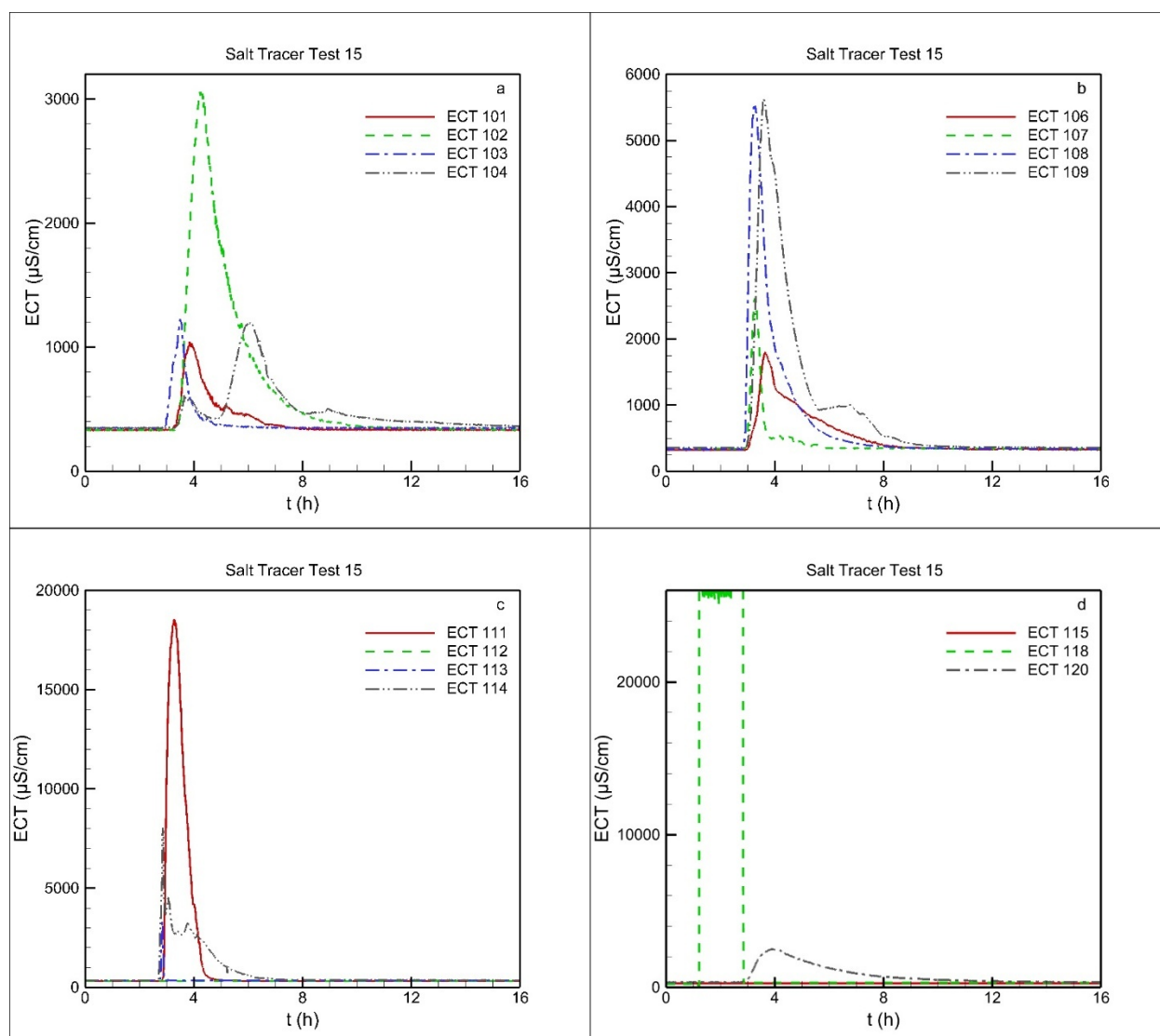
Slika 33: Protok u matrici i kanalu C1.

Prije utiskivanja slanog traseru uspostavljen je stacionarni protok u matrici (M) od $0.78\,\text{m}^3/\text{h}$ te u kanalu C1 od $0.72\,\text{m}^3/\text{h}$ (slika 33). Prilikom utiskivanja slanog traseru u B20 protok se u matrici povećao na $1.12\,\text{m}^3/\text{h}$, a u tijeku prihranjivanja s kišom također je došlo do još većeg povećanja protoka u maksimalnom iznosu od $1.28\,\text{m}^3/\text{h}$. Nakon završetka utiskivanja i simulacije kiše, protok u matrici postepeno se vratio na vrijednost blisku početnoj, oko $0.82\,\text{m}^3/\text{h}$. Protok u kanalu C1 se nije značajno mijenjao tijekom injektiranja traseru i umjetne kiše.



Slika 34: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.

Vodostaj u gornjem i donjem rezervoaru održavan je konstantnim. Na slici 34 su prikazane vrijednosti piezometarskih visina za neke od piezometara i rubni uvjeti tj. nivo vode u uzvodnom (PT 443) i nizvodnom (PT 444) rezervoaru.



Slika 35: Prikaz električne vodljivosti na senzorima

Na slici 35d je vidljivo da senzor ECT 118 prikazuje utisnutu koncentraciju slanog fluida u bušotini B20. Rezultati prolaznih krivulja koncentracije u vremenu pokazuju smanjenje koncentracije od uzvodnih bušotina prema nizvodnima, što je očekivana posljedica procesa advekcije i disperzije. Na slici 35d prikazana je koncentracija u kanalu C1 (ECT 120) gdje se vidi da je drenirana voda zaslanjena, prolazna krivulja je klasičnog log-normalnog tipa i dani rezultati pokazuju srednju trenutnu koncentraciju u kanalu jer smo mjerili koncentraciju na izlazu iz kanala. Maksimalna koncentracija vode u kanalu C1 jest 2555. Npr. senzor ECT 115 pokazuje da je koncentracija jednaka početnoj koncentraciji slatke vode cijelim tijekom traser testa, što znači da slani traser nije došao do tog senzora te na taj način možemo definirati prostornu raspodjelu oblaka slanosti. Na slici 35c vidi se veliki odziv slanosti u piezometru ECT 111 u odnosu na ostale piezometre. Npr. senzor ECT 114 pokazuje multimodalnost prolazne krivulje sa tri lokalna

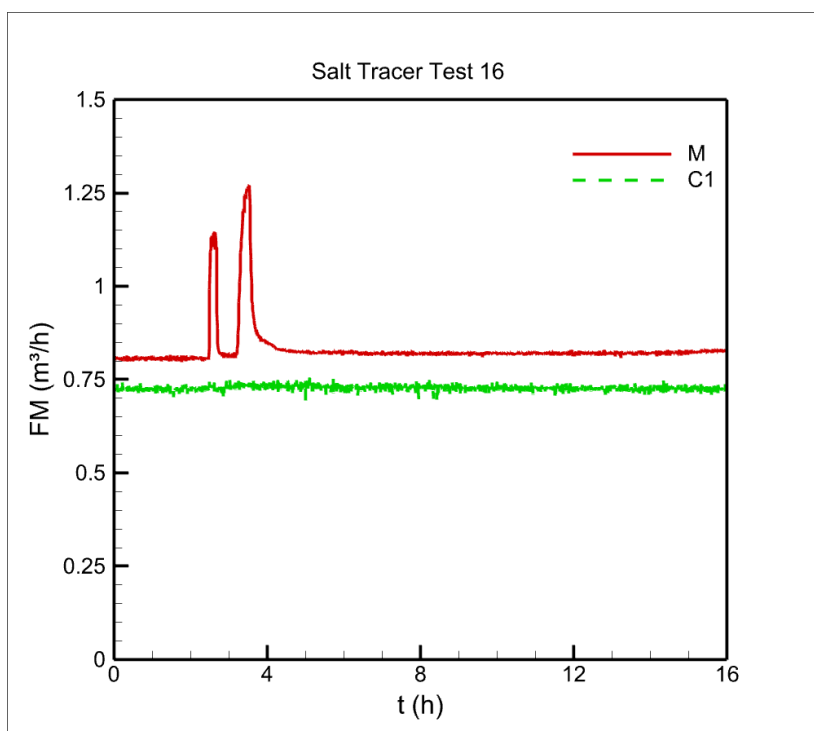
maksimuma. Nizvodni senzori na slikama 35a i 35b pokazuju sniženje koncentracije te veće vrijeme izloženosti slanosti. Na slici 35a senzor ECT 104 pokazuje bimodalnost, gdje je prvi mod posljedica utiskivanja soli u bušotinu B20, a drugi mod posljedica je djelovanja kiše.

Možemo reći da bliski piezometri mogu pokazati različite odzive slanosti, upravo zbog složenog polja tečenja između kanala i matrice, drugačijeg prostornog položaja pakera u kojem mjerimo slanost i točkastog karaktera mjerenja koncentracije.

Na prethodnim slikama 33-35 je prikazano trajanje traser testa cca 13 sati od početka utiskivanja kada se odigrala većina traser testa, što je prikazano činjenicom da su koncentracije u sensorima ponovno došle na početne vrijednosti. U zaključku cijeli traser test ne traje više od 24 sata, kada slatka voda potpuno ispere utisnuti slani traser.

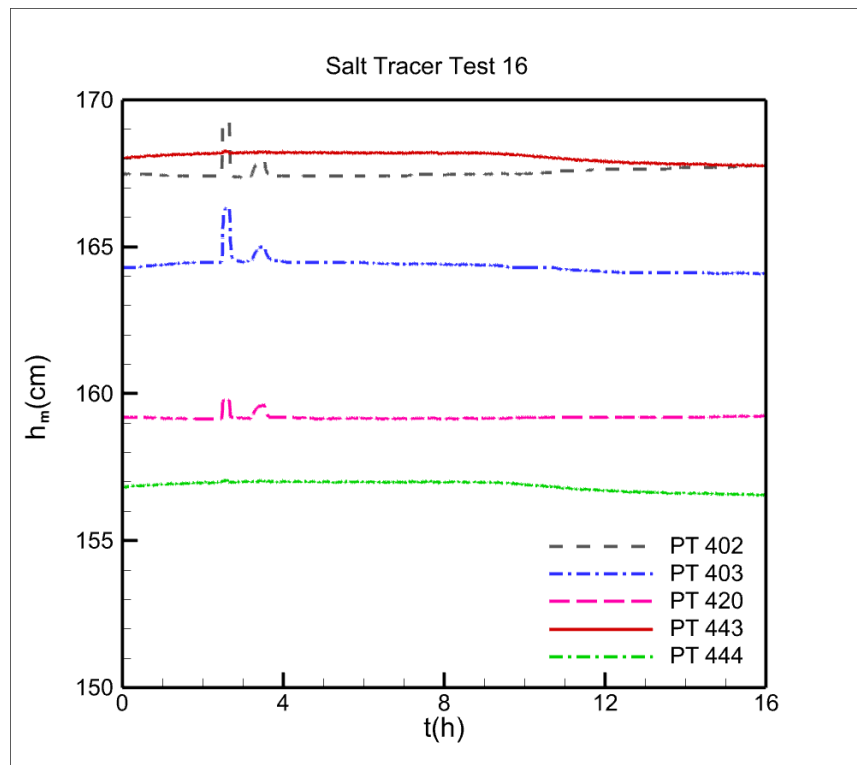
3.2 TRASER TEST 16

Početak utiskivanja slanog traseru je u 11:29 h, a završetak u 11:40 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16$ h. Slani traser se unosi s malom protočnom pumpom direktno u bušotinu B20 sa mješavinom od cca 1.5 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $11\,750\ \mu S/cm$ kao što se može vidjeti na slici 38 (Slika 38d). Dodatno, puštena je kiša-oborina sa 25 prskalica raspoređenih na rasteru 0.85×0.85 m u vremenu od 12:11 h do 12:31 h, intenzitetom protoka $2\ l/min/m^2$. Otvoren je kanal C1.

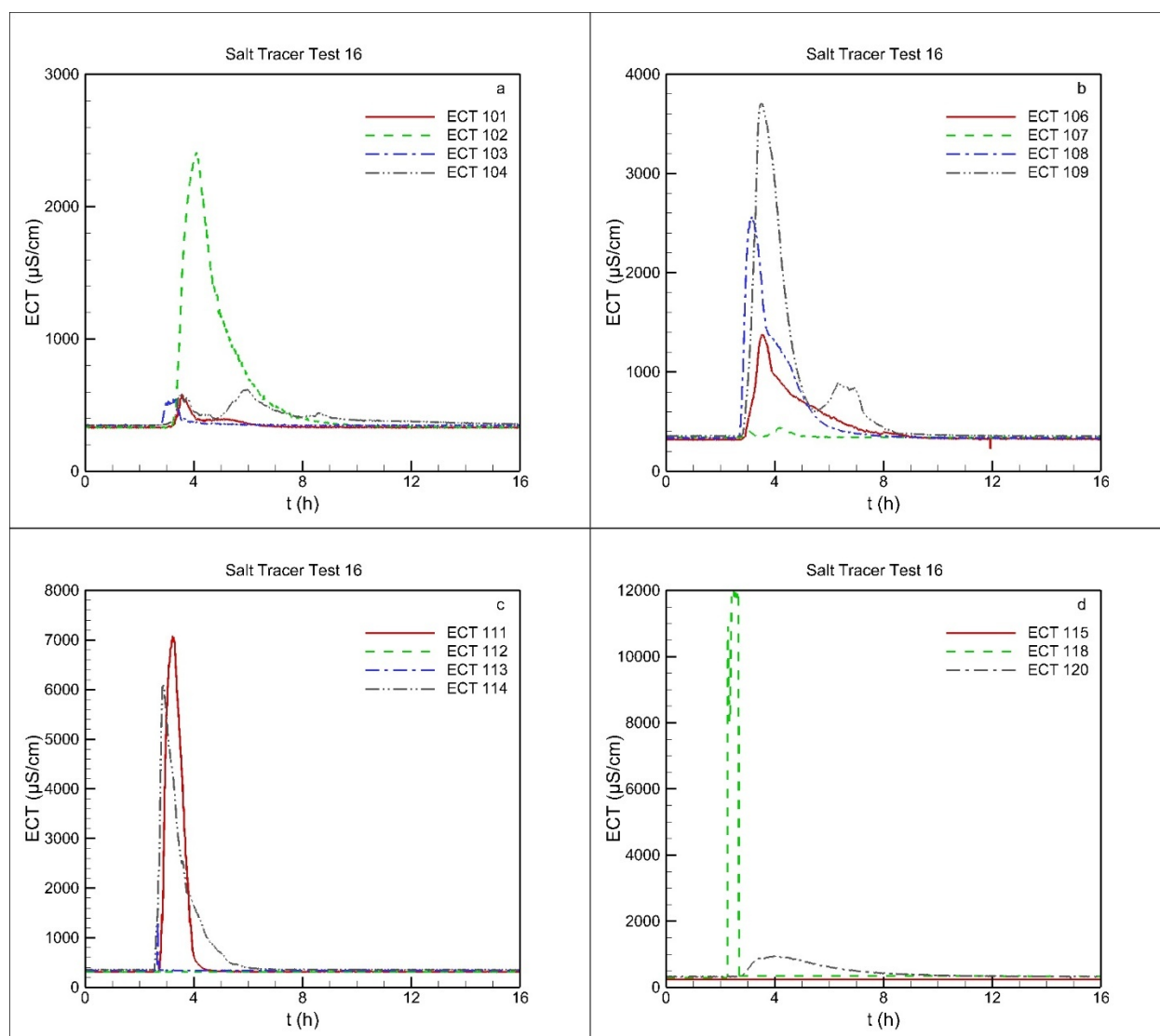


Slika 36: Protok u matrici i kanalu C1.

Prije početka mjerenja uspostavljen je stacionarni protok u matrici (M) $0.80\ m^3/h$ te protok u kanalu C1 od $0.72\ m^3/h$ (slika 36). Grafikon protoka prikazuje da se prilikom utiskivanja traseru u bušotinu B20 protok u matrici povećao na $1.15\ m^3/h$, a u tijeku prihranjivanja s kišom također je došlo do još većeg povećanja protoka u maksimalnom iznosu od $1.28\ m^3/h$. Nakon završetka utiskivanja i simulacije kiše, protok u matrici postepeno se vratio na vrijednost blisku početnoj, oko $0.82\ m^3/h$.



Slika 37: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima. **Tekst za ovu sliku???**



Slika 38: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

Na slici 38d je prikazana grupa uzvodnih senzora. ECT 118 prikazuje početnu koncentraciju od 11 750 $\mu\text{S/cm}$. Senzor ECT 120 pokazuje odgođen i znatno niži vrh koncentracije, koji doseže oko 1000 $\mu\text{S/cm}$ nešto više od jedan sat nakon početka testa, te ima karakterističan širok rep. Ovaj senzor, kao i u Testu 15, predstavlja koncentraciju na izlazu iz kanala C1, pokazujući da je drenirana voda iz kanala zaslanjena, a krivulja ima log-normalni oblik tipičan za transport u kanalima. Senzor ECT 115 pokazuje konstantnu nisku vrijednost električne vodljivosti (oko 300-400 $\mu\text{S/cm}$) tijekom cijelog testa, što odgovara početnoj koncentraciji slatke vode. Ovo znači da traser nije dospio do ovog mjernog mjesta, te senzor ECT 115 pomaže u definiranju prostornog rasprostiranja oblaka slanosti. Na slici 38c senzor ECT 111 pokazuje vrlo brz i oštar porast

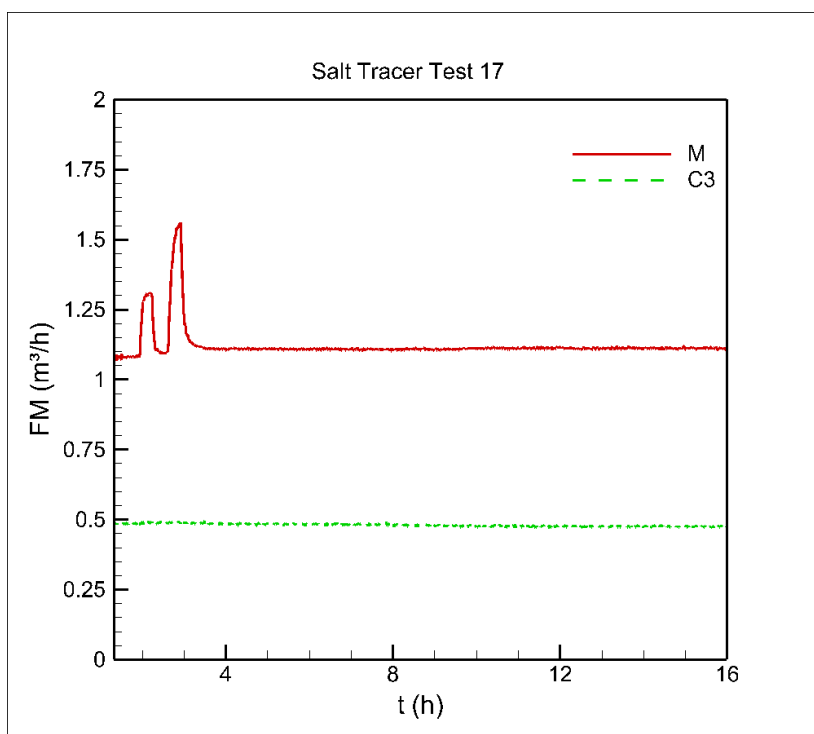
koncentracije, s visokom vršnom vrijednošću od približno 7100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, koja se javlja unutar prvih sat vremena nakon završetka utiskivanja. Ovako visok i brz odziv na ECT 111 sugerira da je ovaj senzor smješten direktno na putanji glavnog oblaka trasera. Senzor ECT 114 također pokazuje relativno brz odziv, ali sa znatno nižom vršnom koncentracijom (oko 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) i nešto širim oblikom krivulje u usporedbi s ECT 111. Senzor ECT 112 pokazuje vrlo slab, gotovo zanemariv odziv na traser, s koncentracijom koje ostaju blizu početnih vrijednosti (oko 300-400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) tijekom cijelog testa. Ovo ukazuje da glavni dio oblaka trasera nije prošao kroz područje koje ovaj senzor nadzire. Senzor ECT 113 pokazuje porast na oko 1150 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ali gotovo odmah se vraća na početnu vrijednost. Na slici 38b grupa senzora pokazuje karakteristično kašnjenje i smanjenje vršnih koncentracija u odnosu na ECT 118 i ECT 111, što ukazuje na njihov nizvodniji položaj. Senzor ECT 109 bilježi najvišu koncentraciju u ovoj grupi. Krivulja je šira, ukazujući na disperziju. Zanimljivo je da ovaj senzor pokazuje i naznaku drugog, manjeg porasta ili produženog opadanja, što bi mogla biti posljedica ponovne mobilizacije trasera uslijed simulirane kiše. Senzor ECT 108 pokazuje nešto kasniji dolazak trasera i još izraženiju disperziju u odnosu na ECT 109. Senzor ECT 106 ima najnižu vršnu koncentraciju i najširu krivulju u ovoj grupi, što sugerira najsporiji transport i/ili najveću disperziju do ove točke. Također pokazuje produženo opadanje koncentracije. Senzor ECT 107 ima vrlo slab i razvučen odziv, s maksimalnim zabilježenim koncentracijama tek oko 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$, što ukazuje na vrlo neizravan put ili značajno miješanje s okolnom vodom. Na slici 38a prikazana je grupa najudaljenijih senzora gledajući od izvora. Najzanimljivije je da senzor ECT 104 pokazuje izrazito bimodalnu krivulju. Prvi, manji vrh javlja se rano, zajedno s glavnim valom trasera. Drugi, nešto viši i znatno širi vrh javlja se u periodu između petog i osmog sata testa. Ova bimodalnost je vrlo vjerojatno posljedica djelovanja simulirane kiše, koja je mobilizirala dio zaostalog trasera ili promijenila dominantne putanje toka, uzrokujući drugi val povišene koncentracije na ovom senzoru.

Rezultati prolaznih krivulja koncentracije u vremenu generalno pokazuju očekivano smanjenje koncentracije i povećanje širine krivulja (disperzije) od mjesta utiskivanja (ECT 118) prema nizvodnim mjernim mjestima. Odziv na senzoru ECT 120 potvrđuje transport trasera kroz kanal C1. Različiti oblici krivulja i vremena dolaska na bliskim piezometrima ukazuju na složeno polje tečenja unutar 3D modela akvifera, pod utjecajem interakcije između matrice i preferencijalnih putanja.

Na slikama je prikazano trajanje traser testa od oko šesnaest sati. Većina značajnih promjena koncentracije odigrala se unutar prvih pet do deset sati od početka utiskivanja, nakon čega se koncentracije na većini senzora postepeno vraćaju prema početnim vrijednostima.

3.3 TRASER TEST 17

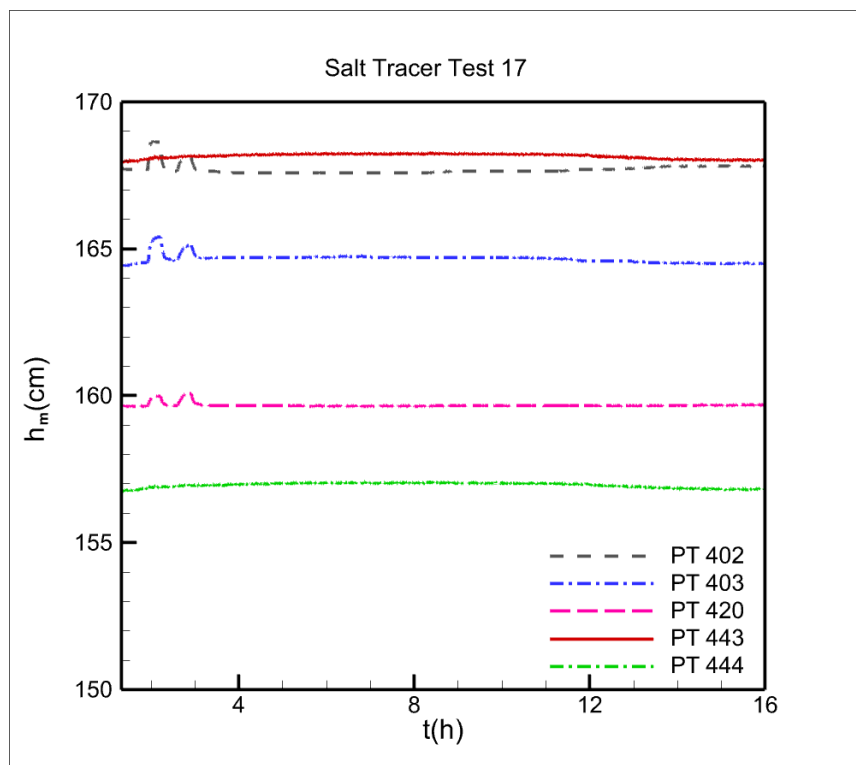
Početak utiskivanja slanog traser je u 8:55 h, a završetak je u 9:13 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16$ h. Ovaj test se izvodi na način da se slani traser unosi sa malom protočnom pumpom u model za površinsko utiskivanje prskalicama sa mješavinom od cca 1.5 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $11\,740\,\mu S/cm$ kao što se može vidjeti na slici 41 (slika 41d). Dodatno, puštena je kiša-oborina u vremenu od 9:34 h do 9:54 h, intenzitetom protoka $2\,l/min/m^2$. Otvoren je kanal C3.



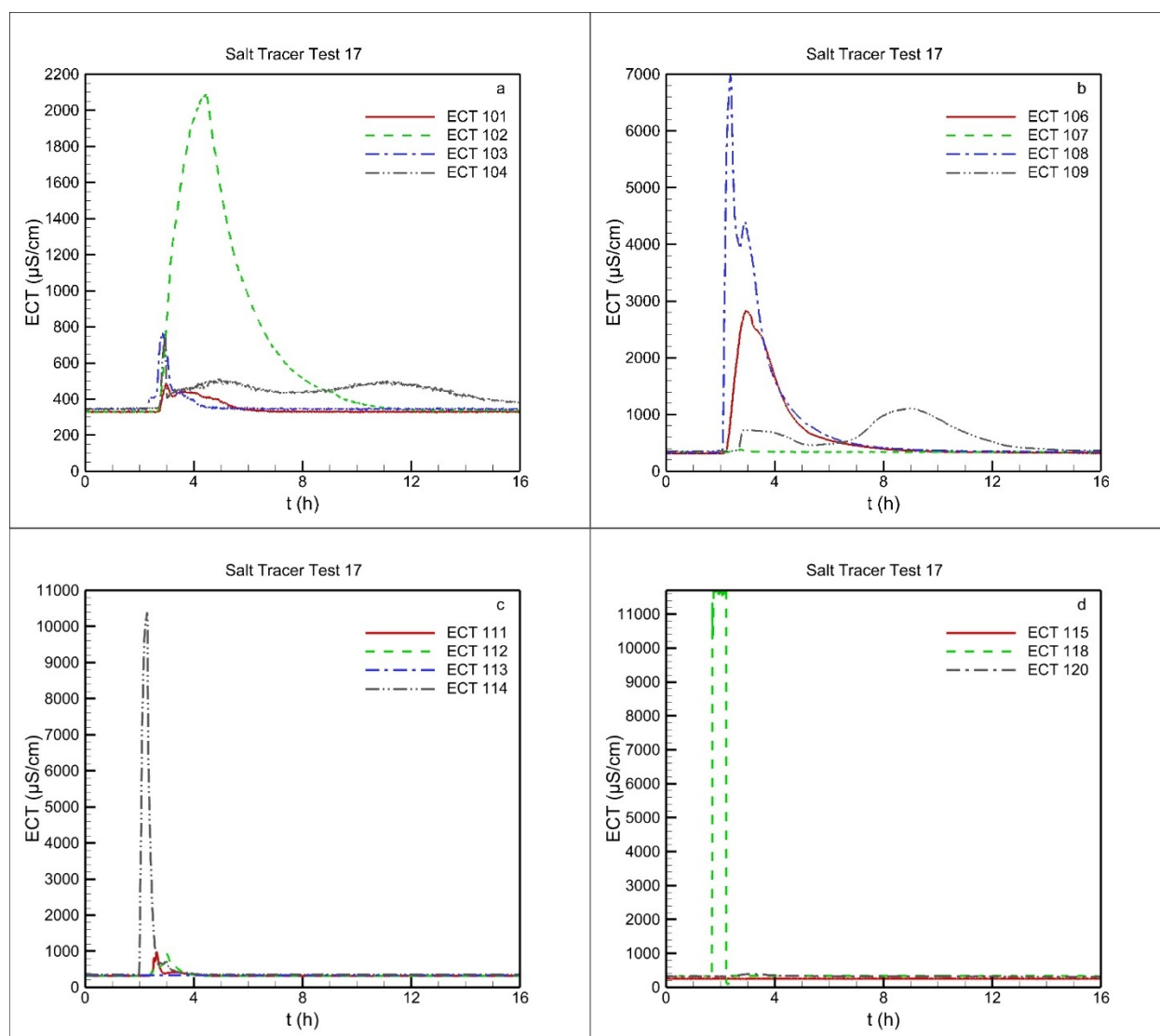
Slika 39: Protok u matrici i kanalu C3.

Prije početka utiskivanja slanog traser uspostavljen je stacionarni protok u matrici (M) od $1.075\,m^3/h$ i protok u kanalu C3 od $0.49\,m^3/h$ (slika 39). Grafikon protoka prikazuje da se prilikom puštanja traser kroz model za površinsko utiskivanje prskalicama u matrici povećao na $1.31\,m^3/h$, a tijekom prihranjivanja s kišom također je došlo do još većeg povećanja protoka u maksimalnom

iznosu od $1.58 \text{ m}^3/\text{h}$. Nakon završetka utiskivanja i simulacije kiše, protok u matrici postepeno se vratio na vrijednost blisku početnoj, oko $1.11 \text{ m}^3/\text{h}$.



Slika 40: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima. **?tekst**



Slika 41: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

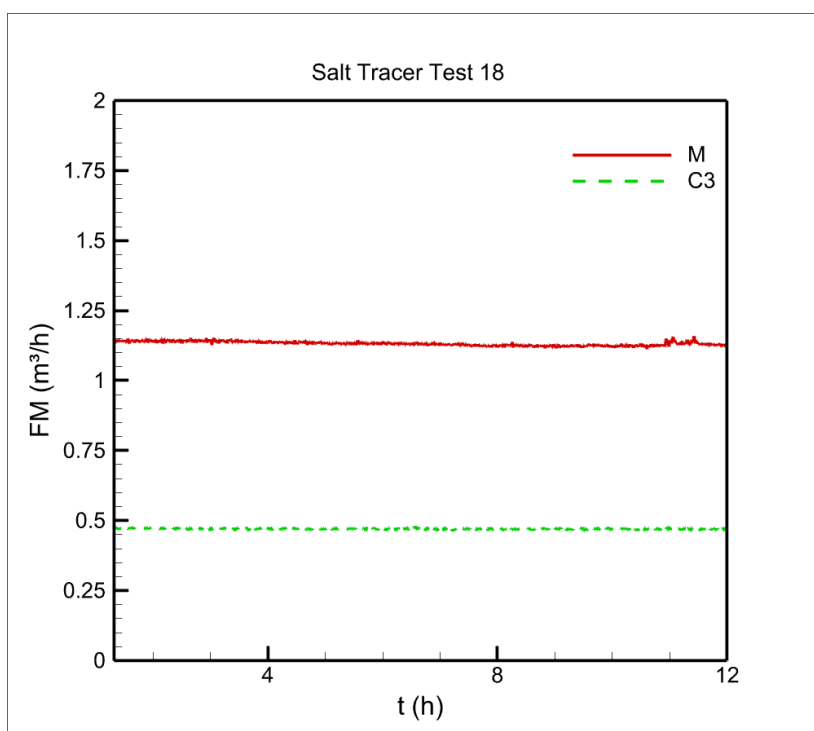
Na slici 41d je vidljivo da senzor ECT 118 prikazuje početnu koncentraciju slanog trasera koji je površinski utisnut u matricu. Senzor ECT 115 pokazuje konstantno niske vrijednosti električne vodljivosti tijekom cijelog testa, što sugerira da traser nije značajno dospio do ovog mjernih mjesta i da na taj način možemo definirati prostornu raspodjelu obuhvata oblaka slanosti. Senzor ECT 120 pokazuje srednju slanost vode u kanalu C3 koja ima značajno manje vrijednosti od simulacija s kanalom C1. Posljedica toga je manji protok u kanalu C3, manji dio toka matrice koji se drenira s kanalom C3, pa posljedično tome i manja koncentracija slane vode. Na slici 41c vidljiv je značajan odziv slanosti na senzoru ECT 114, dok senzori ECT 111, ECT 112 i ECT 113 pokazuju vrlo slab, gotovo zanemariv odziv na traser. Ovo ukazuje na to da glavni dio oblaka trasera prolazi u blizini senzora ECT 114. Na slici 41b prikazana je grupa senzora nizvodnije. Senzor ECT 108 bilježi najvišu vršnu koncentraciju u ovoj grupi, s relativno brzim porastom i

postepenim opadanjem. Senzor ECT 109 pokazuje kasniji dolazak trasera i izraženiju disperziju, s primjetnim "repom" krivulje. Senzori ECT 106 i ECT 107 pokazuju znatno niže vršne koncentracije i šire prolazne krivulje, što ukazuje na veću disperziju i sporiji transport do ovih točaka/pakera. Zanimljivo je primijetiti bimodalnost na krivulji senzora ECT 109, gdje bi drugi vrh trebao biti povezan oborine-kiše. Na slici 3a prikazana je grupa najudaljenijih senzora od izvora. Senzor ECT 102 pokazuje najvišu vršnu koncentraciju u ovoj grupi s relativno brzim odzivom. Senzori ECT 101, ECT 103 i ECT 104 pokazuju niže vršne koncentracije i šire krivulje, što ukazuje na daljnju disperziju trasera. Krivulja senzora ECT 104 pokazuje produženo opadanje koncentracije.

Rezultati prolaznih krivulja koncentracije u vremenu generalno pokazuju očekivano smanjenje koncentracije i povećanje širine krivulja (disperzije) od mjesta utiskivanja prema nizvodnim mjernim mjestima. Različiti oblici krivulja i vremena dolaska na bliskim piezometrima ukazuju na složeno polje tečenja unutar 3D modela akvifera, pod utjecajem interakcije između matrice i preferencijalnih putanja.

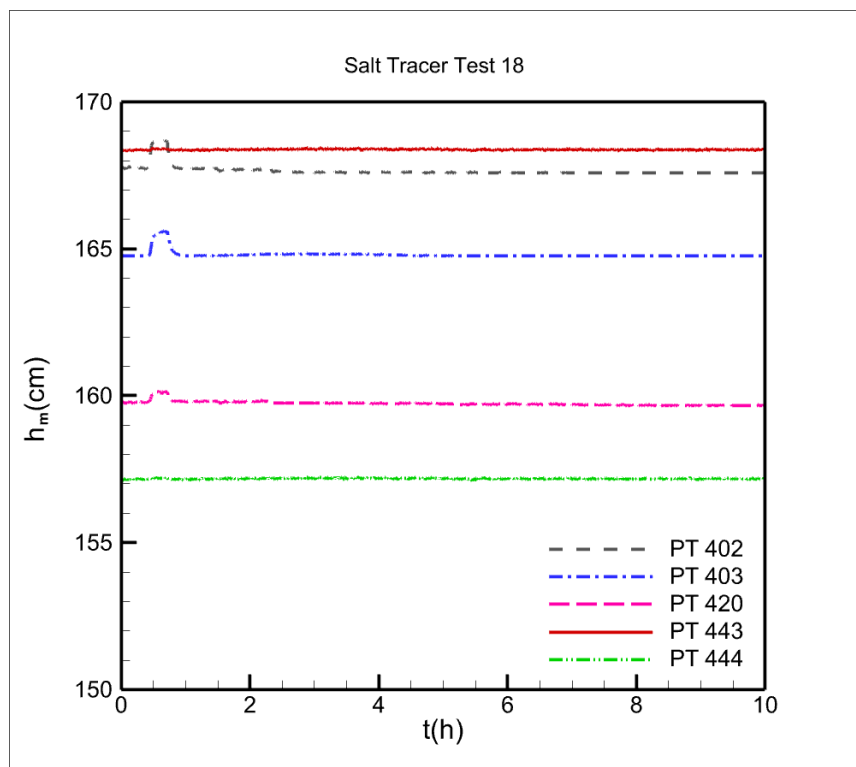
3.4 TRASER TEST 18

Početak utiskivanja slanog traseru je u 14:12 h, a završetak 14:24 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 12$ h. Ovaj test se izvodi na način da se slani traser unosi sa malom protočnom pumpom u model za površinsko utiskivanje prskalicama sa mješavinom od cca 1.5 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $11\,250\ \mu S/cm$. Kao što se može vidjeti na slici 44 (Slika 44d). Otvoren je kanal C3.

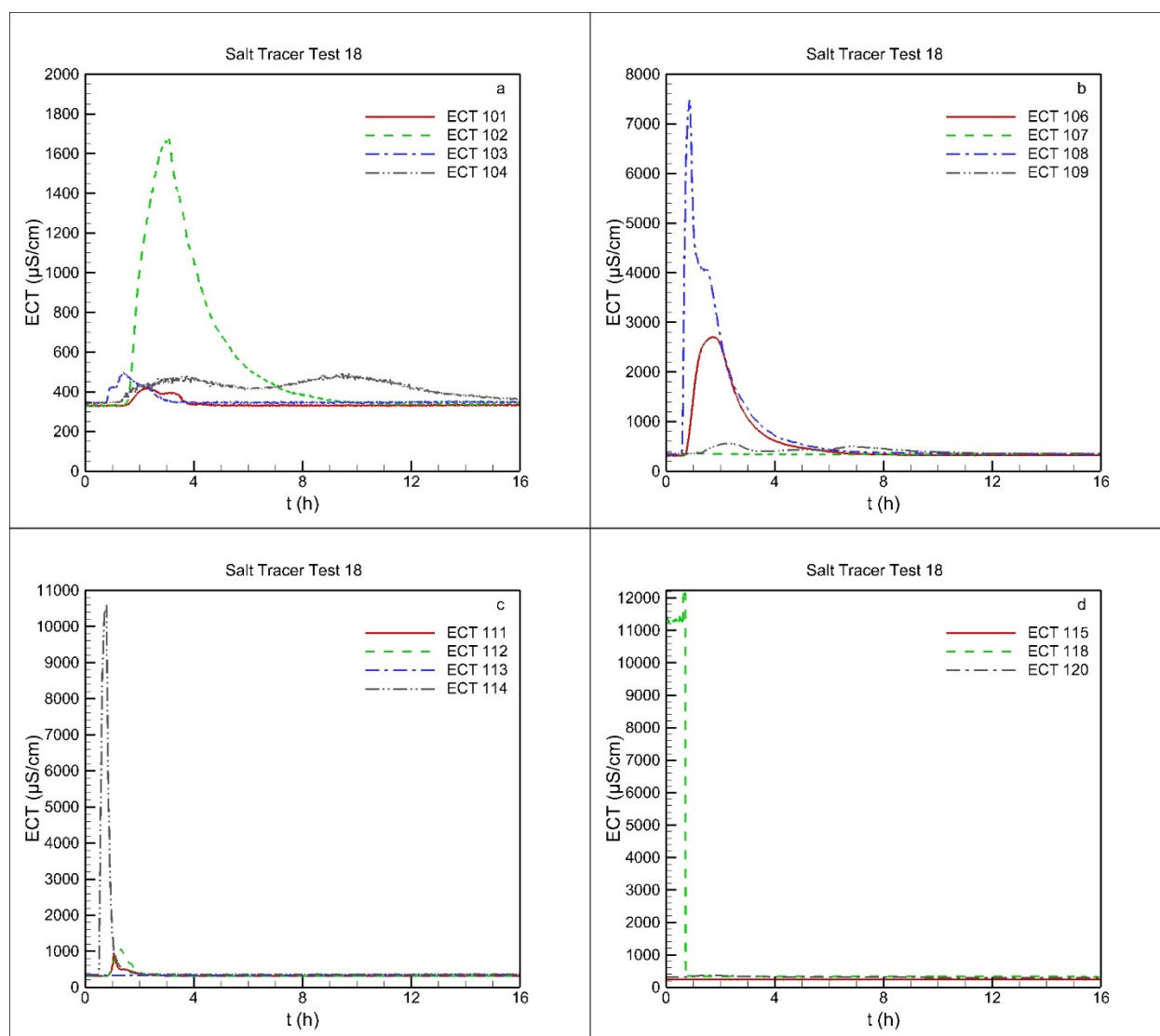


Slika 42: Protok u matrici i kanalu C3.

Prije utiskivanja slanog traseru uspostavljen je stacionarni protok u matrici $1.150\ m^3/h$ te protok u kanalu C3 od $0.47\ m^3/h$ (Slika 42). Grafikon protoka prikazuje da se prilikom puštanja traseru kroz model za površinsko utiskivanje prskalicama protok ni u matrici ni u kanalu C3 nije promjenio.



Slika 43: Protok u matrici i kanalu C3.



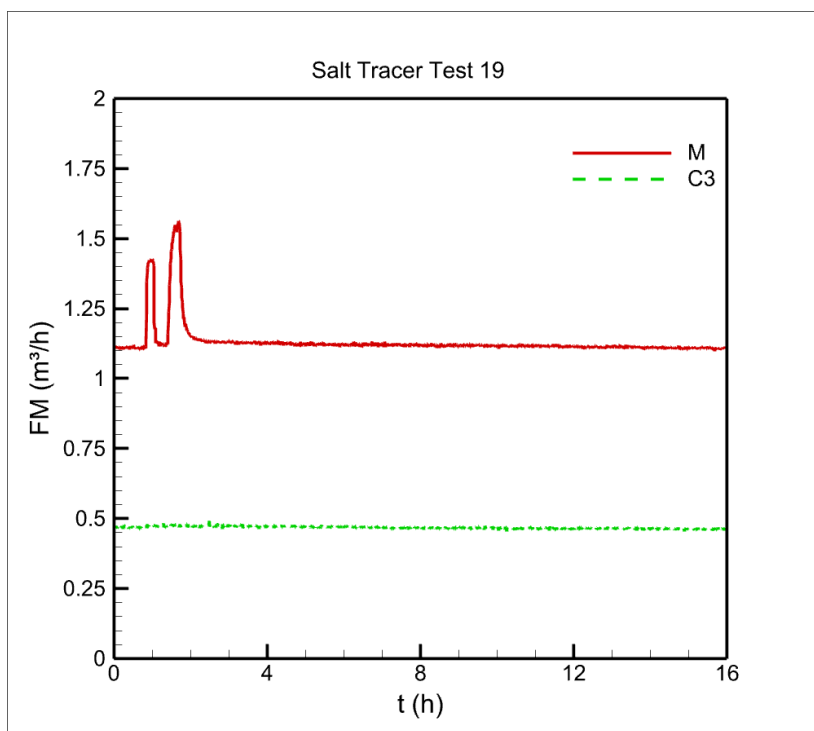
Slika 44: prikaz električne vodljivosti na senzorima.

Na slici 44d je vidljivo da senzor ECT 118 prikazuje utisnutu koncentraciju slanog fluida koji je površinski utisnut u matricu. Senzori ECT 115 i ECT 120 pokazuju konstantno niske vrijednosti električne vodljivosti tijekom cijelog testa, što sugerira da traser nije značajno dospio do ovih mjernih mjesta i da na taj način možemo definirati prostornu raspodjelu oblaka slanosti. Na slici 44c vidljiv je vrlo brz i visok odziv slanosti na senzoru ECT 114, dok senzori ECT 111, ECT 112 i ECT 113 pokazuju vrlo slab, gotovo zanemariv odziv na traser. Ovo ukazuje na to da glavni dio oblaka traser prolazi u blizini senzora ECT 114. Vršna koncentracija na ECT 114 doseže približno 10500 $\mu\text{S/cm}$. Na slici 44b prikazana je grupa senzora nizvodnije. Senzor ECT 108 bilježi najvišu vršnu koncentraciju u ovoj grupi, s relativno brzim porastom i postepenim opadanjem, dosežući vrijednost oko 7500 $\mu\text{S/cm}$. Senzor ECT 106 pokazuje nižu vršnu koncentraciju oko 2700 $\mu\text{S/cm}$ i širu prolaznu krivulju, što ukazuje na veću disperziju. Senzori

ECT 107 i ECT 109 pokazuju znatno niže vršne koncentracije i izraženiju disperziju. Na slici 44a prikazana je grupa najudaljenijih senzora od izvora. Senzor ECT 102 pokazuje najvišu vršnu koncentraciju u ovoj grupi s vrijednošću oko $1700 \mu\text{S}/\text{cm}$ i relativno brzim odzivom. Senzori ECT 101, ECT 103 i ECT 104 pokazuju niže vršne koncentracije i šire krivulje, što ukazuje na daljnju disperziju trasera. Posebno se ističe bimodalnost na krivulji senzora ECT 104, s dva vrha koncentracije.

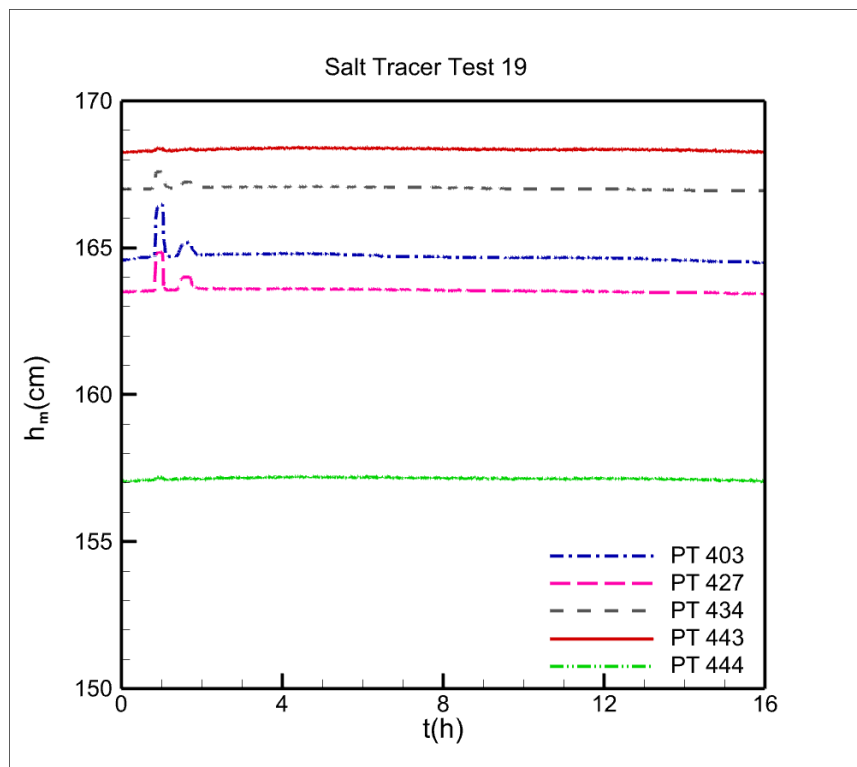
3.5 TRASER TEST 19

Početak utiskivanja slanog trasera je u 11:25 h, a završetak u 11:36 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16$ h. Slani traser unesen je direktno u bušotinu B20 (kao u ranijim testovima 15, 16) s mješavinom od cca 1 kg soli na 200 litara obične vode. Izmjerena početna električna vodljivost trasera bila je $13310 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Slika 47d). Također je puštena umjetna kiša-oborina u vremenu od 11:56 h do 12:16 h, intenzitetom protoka $2\text{l}/\text{min}/\text{m}^2$. Ovaj test je sličan testu 16, ali u ovom slučaju otvoren je kanal C3.

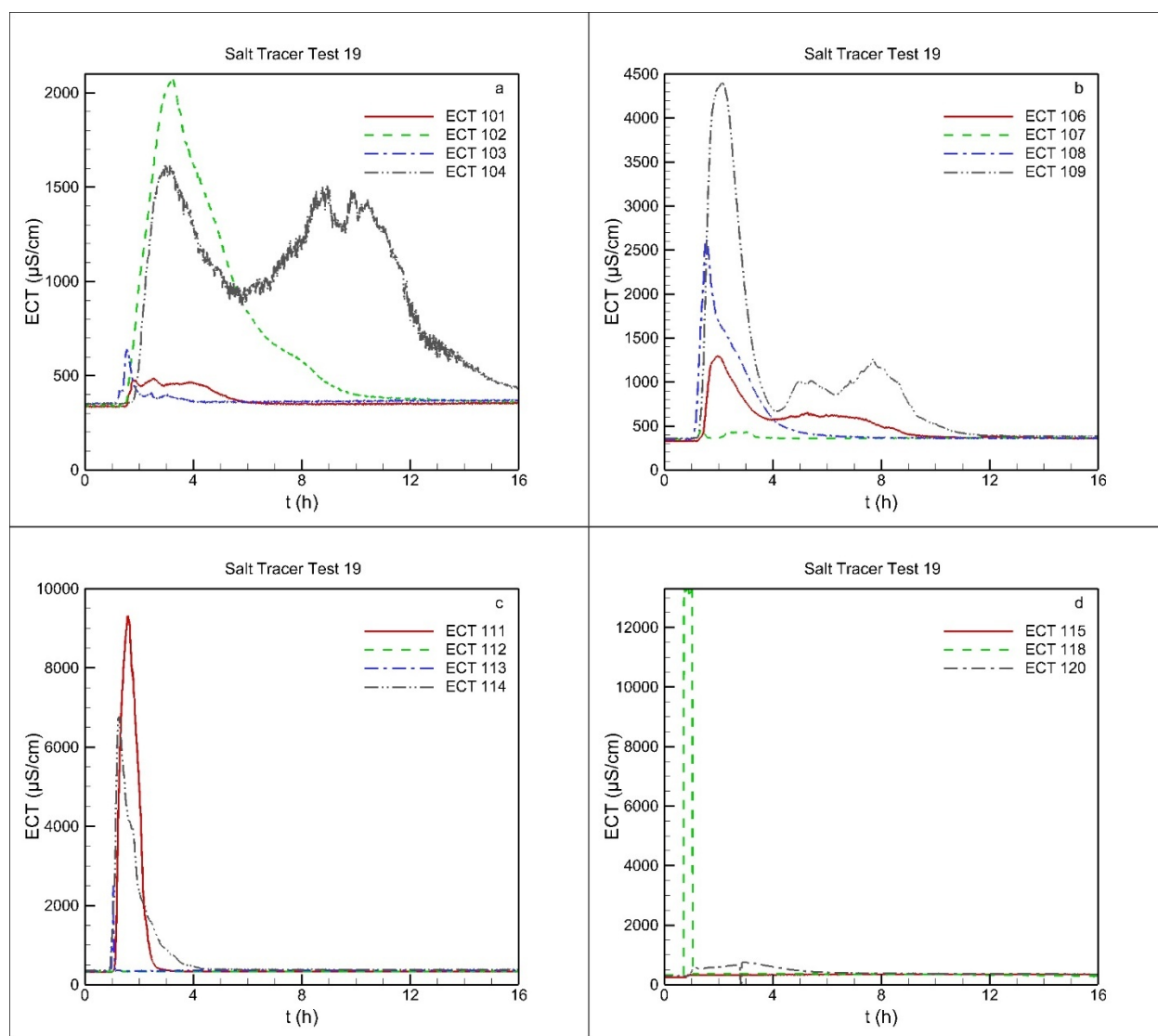


Slika 45: Protok u matrici i kanalu C3.

Na slici 45 vidljivo je da je pri utiskivanju trasera u B20 protok u matrici porastao sa $1.10 \text{ m}^3/\text{h}$ na $1.43 \text{ m}^3/\text{h}$, dok je tijekom kiše dosegnuo maksimum od $1.63 \text{ m}^3/\text{h}$. Protok u kanalu C3 je bio nepromijenjen iznosa od $0.47 \text{ m}^3/\text{h}$. U usporedbi sa testom 16, zaključujemo iako su protoci u matrici veći, a u kanalu manji, da su na kraju protoci u zbiru na oba testa oko $1.55 \text{ m}^3/\text{h}$. To govori da je otvaranjem jednog od ova dva kanala ukupan protok u 3d fizikalnom modelu skoro pa jednak.



Slika 46: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.

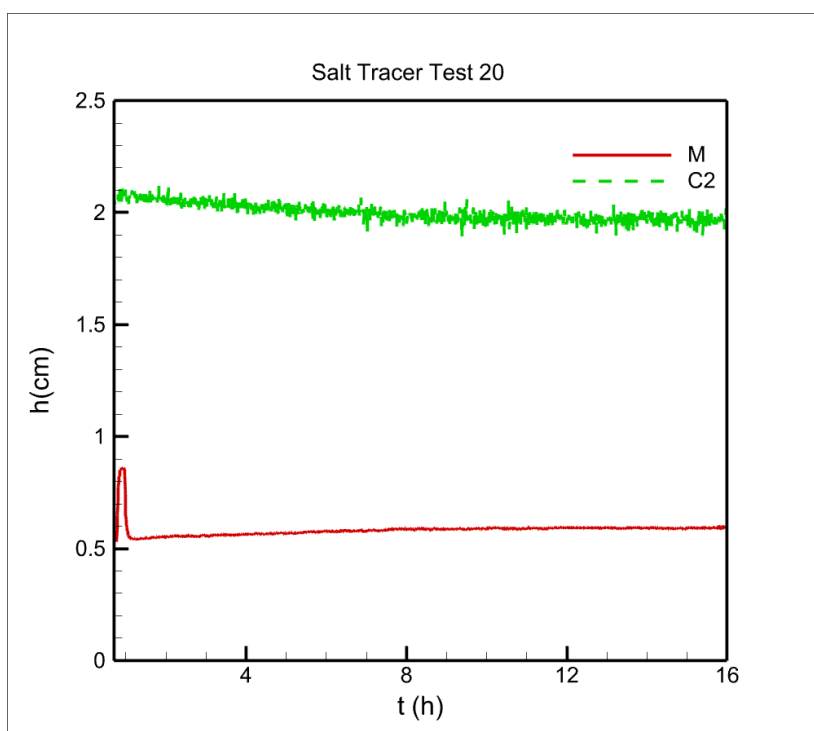


Slika 47: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

Na slici 44d uočavamo zanimljivost u usporedbi sa testom 16, a to je da ECT 120 pokazuje vršnu vrijednost 2 sata nakon početka testa (u odnosu na 1 sat u testu 16). Krivulja u ovom slučaju nema širok rep, već log-normalnu raspodjelu. Na slici 44c također odzive primjećujemo sa jednim satom zakašnjenja u usporedbi sa testom 16 i sa nešto većim odzivom, ali to je posljedica veće početne koncentracije. Jednaka stvar događa se i na slici 44b, što na senzoru ECT 106 možemo primijetiti naznaku bimodalnosti koja se na kraju nije ostvarila u punom obimu. Kada promatramo sliku 44a uočavamo bimodalnost senzora ECT 104, koji u drugom modu ima udolinu na mjestu gdje smo očekivali najvišu vrijednost, a to je vjerojatna posljedica usporenja slanog trasera kroz zonu finog kvarcnog pijeska.

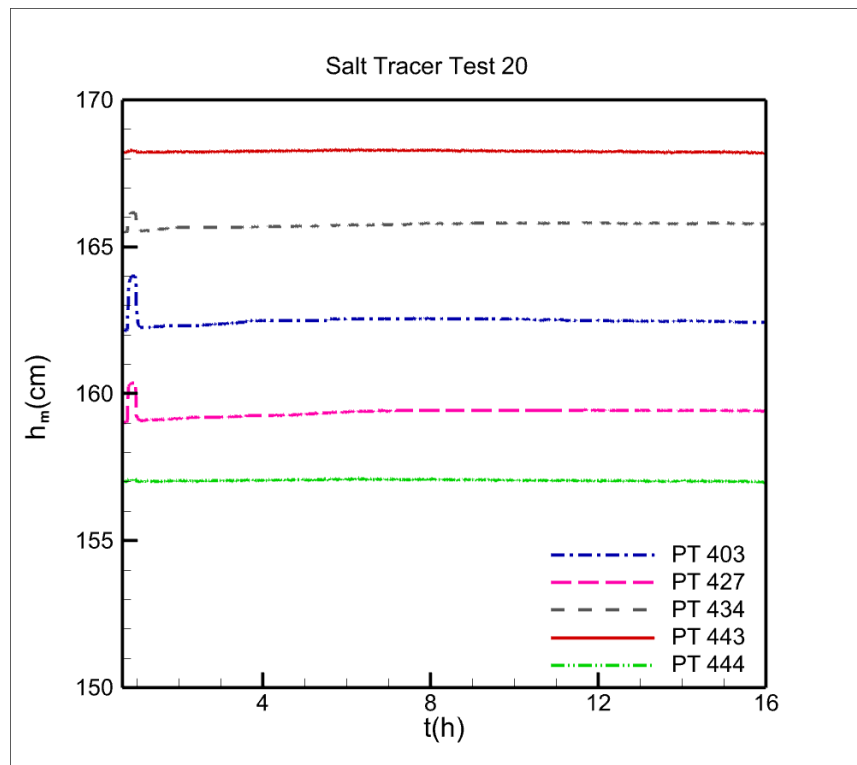
3.6 TRASER TEST 20

Početak utiskivanja slanog traseru je u 8:21 h, a završetak 8.33 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16$ h. Slani traser se unosi sa malom protočnom pumpom direktno u bušotinu B20 sa mješavinom od cca 3 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $13\,540\ \mu\text{S}/\text{cm}$ kao što se može vidjeti na slici 50 (Slika 50d). Otvoren je kanal najvećeg kapaciteta, a to je C2.

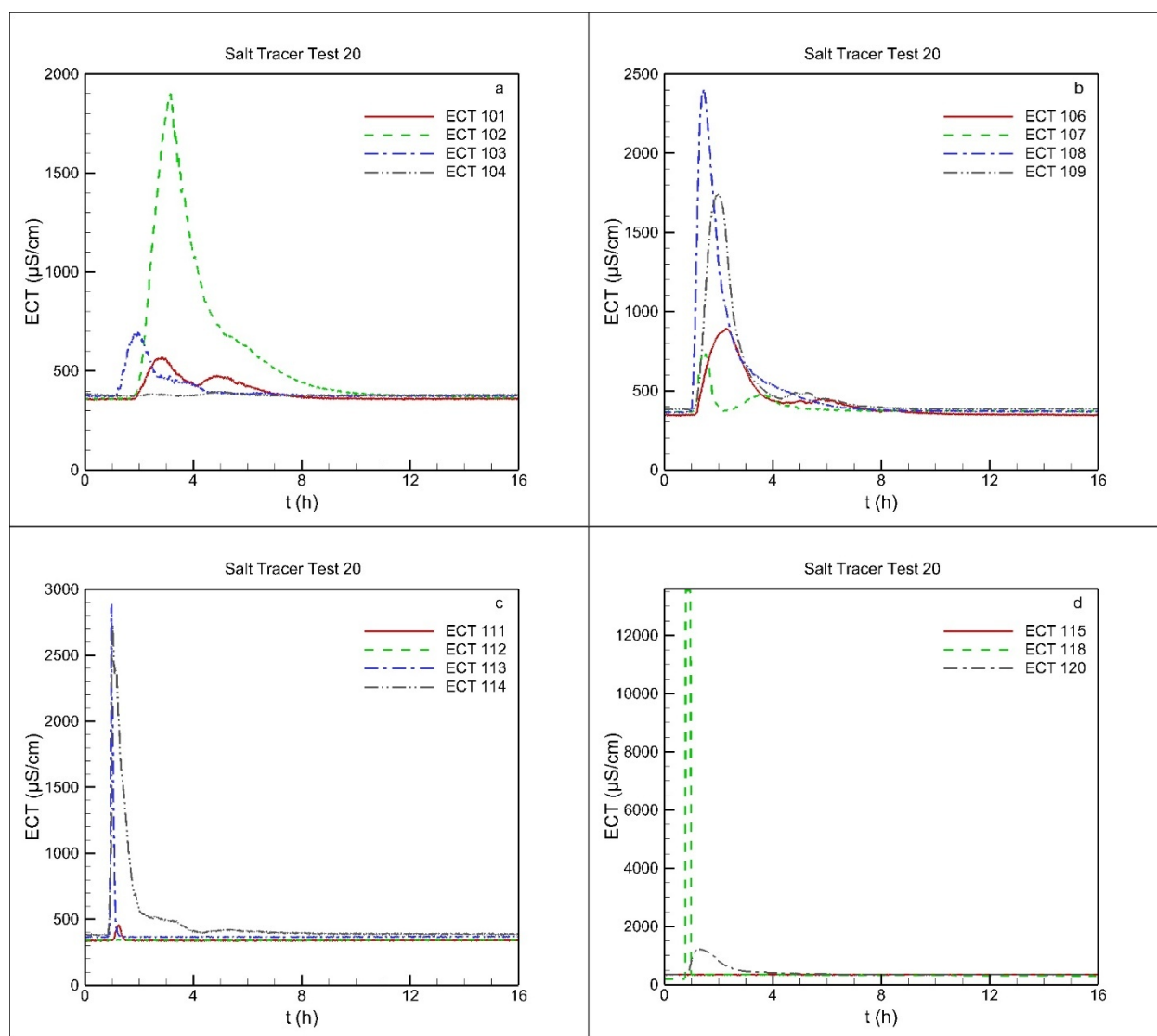


Slika 48: Protok u matrici i kanalu C2.

Za vrijeme utiskivanja slanog traseru u bušotinu B20 protok je u matrici (M) skočio sa $0.51\ \text{m}^3/\text{h}$ na $0.87\ \text{m}^3/\text{h}$ (Slika 48). Nakon utiskivanja protok se vratio na početnu vrijednost s koje je do kraja testa narastao na $0.6\ \text{m}^3/\text{h}$. Protok u kanalu C2 je sa iznosa od $2.08\ \text{m}^3/\text{h}$ pao do kraja testa na otprilike $2.03\ \text{m}^3/\text{h}$ uz očekivane sitne oscilacije od svega par postotaka radi velikog kapaciteta samoga kanala C2. Otvaranjem ovoga kanala u usporedbi sa C1 i C3 ipak imamo veći protok u zbiru matrice i kanala od oko $2.6\ \text{m}^3/\text{h}$, što potvrđuje stvarno da je kapacitet ovoga kanala značajan.



Slika 49: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.



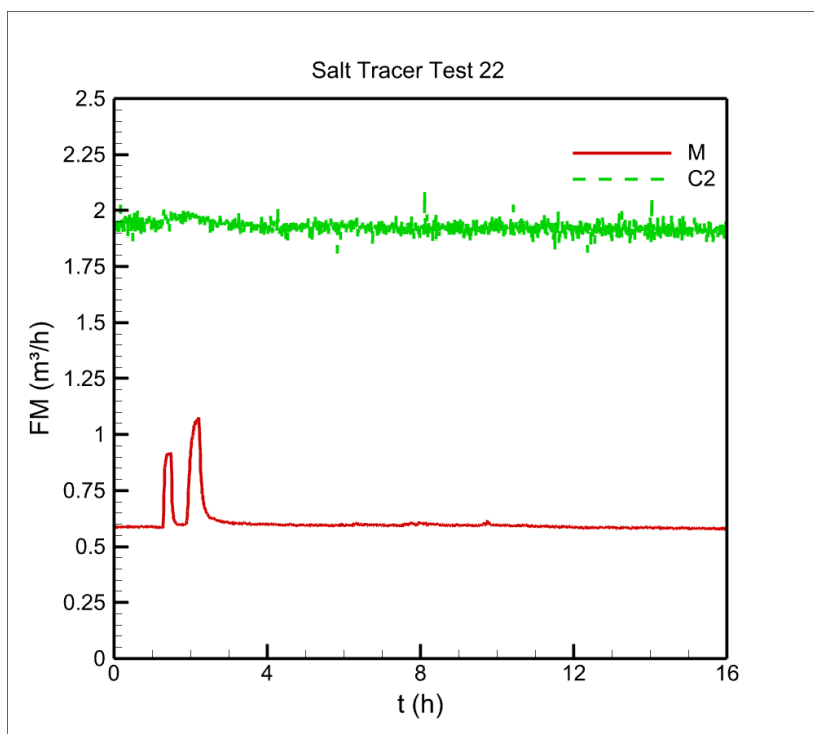
Slika 50: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

Na slici 50d prikazan je senzor ECT 118 koji prikazuje koncentraciju utisnutog traser, ECT 120 sa iznosom oko 1250 $\mu\text{S/cm}$ i ECT 115 ponovno bez odziva. Oblik krivulja na 50c je sličan za tri krivulje sa izraženim vrhom. Ovdje je zanimljivo da senzor ECT 113 hvata najvišu vrijednost u grupi senzora, te njegov vremenski nešto duži prikaz u usporedbi sa ostalim testovima. Možemo izvući zaključak da je ECT 113 na putu kanala C2. Na slici 50b, gdje se prikazuju nizvodniji traseri, imamo zamijenjen odnos senzora ECT 108 i 109 usporedno sa testom 16, ali u ovom slučaju ECT 108 je bimodalan kao i senzor ECT 107 koji u ovom testu ima odziv od oko 720 $\mu\text{S/cm}$ (što je duplo nego u testu 16). Kada pogledamo sliku 50a, možemo primijetiti bimodalnost senzora ECT 101, te neznatan odziv ECT 104, što bi značilo da oblak pronosa traser ne prolazi kroz njegov dio domene.

Kada sagledamo ovaj test donosimo očekivani zaključak da neki senzori koji su očitavali znatne vrijednosti u proteklim testovima (sa otvorenim drugim kanalom), ovdje ipak ne poprimaju tolike vrijednosti zato što ipak ovaj kanal C2 nosi značajne količine trasera. U ovom slučaju senzori u blizini C2 su ti koji imaju dobre odzive.

3.7 TRASER TEST 22

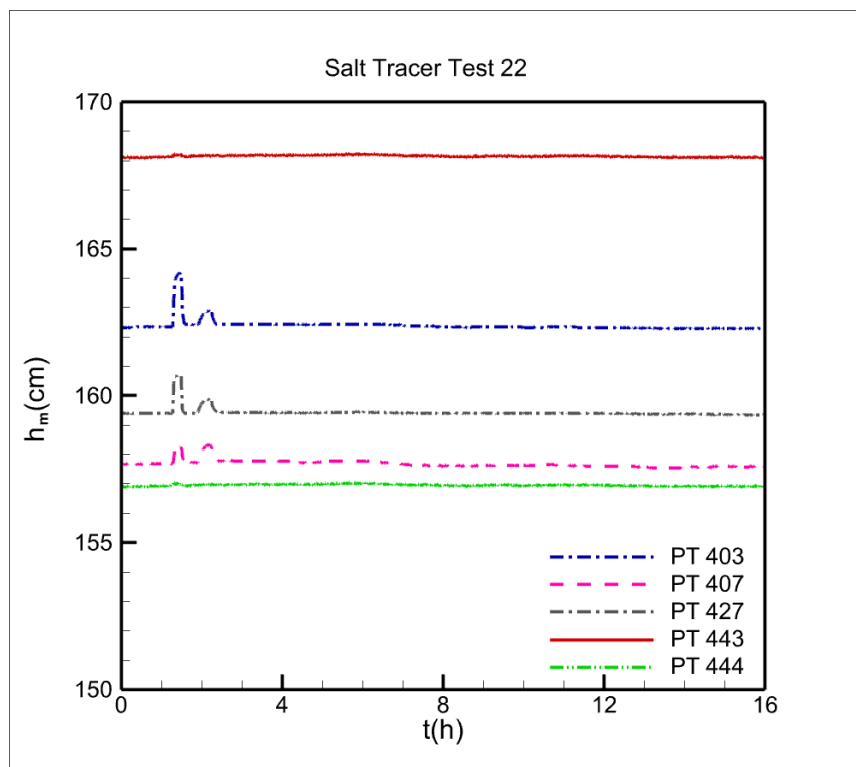
Početak utiskivanja slanog trasera je u 8:17 h, a završetak 8:29 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16$ h. Slani traser se unosi sa malom protočnom pumpom direktno u bušotinu B20 sa mješavinom od cca 3 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $13\,800\ \mu S/cm$ kao što se može vidjeti na slici 53 (Slika 53d). Dodatno, puštena je kiša-oborina u vremenu od 8:52 h do 9:12 h, intenzitetom protoka 2 l/min/m^2 . Otvoren je kanal C2.



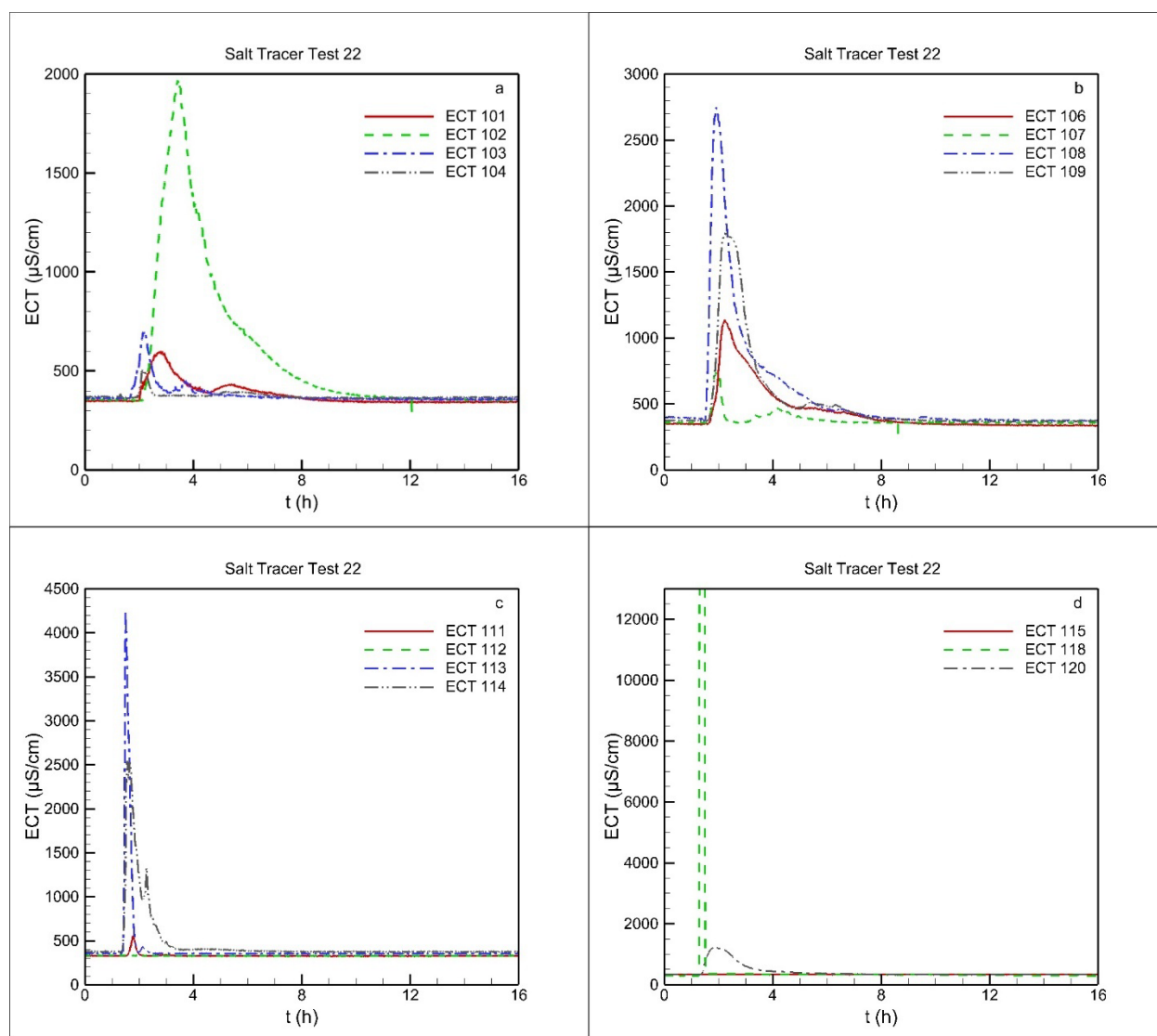
Slika 51: Protok u matrici i kanalu C2.

U usporedbi sa testom 20, protok u kanalu C2 je nešto niži i kreće se između 1.90 i $2.00\text{ m}^3/\text{h}$, što možemo pripisati malom nestabilnošću uslijed velikog kapaciteta kanala. Uzročno-posljedično protok u matrici je nešto viši i on je $0.60\text{ m}^3/\text{h}$. Za vrijeme utiskivanja postigao je

vrijednost $0.92 \text{ m}^3/\text{h}$, a za vrijeme oborine $1.10 \text{ m}^3/\text{h}$. Razlike u protoku među testovima su unutar očekivanog reda veličine odstupanja.



Slika 52: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.



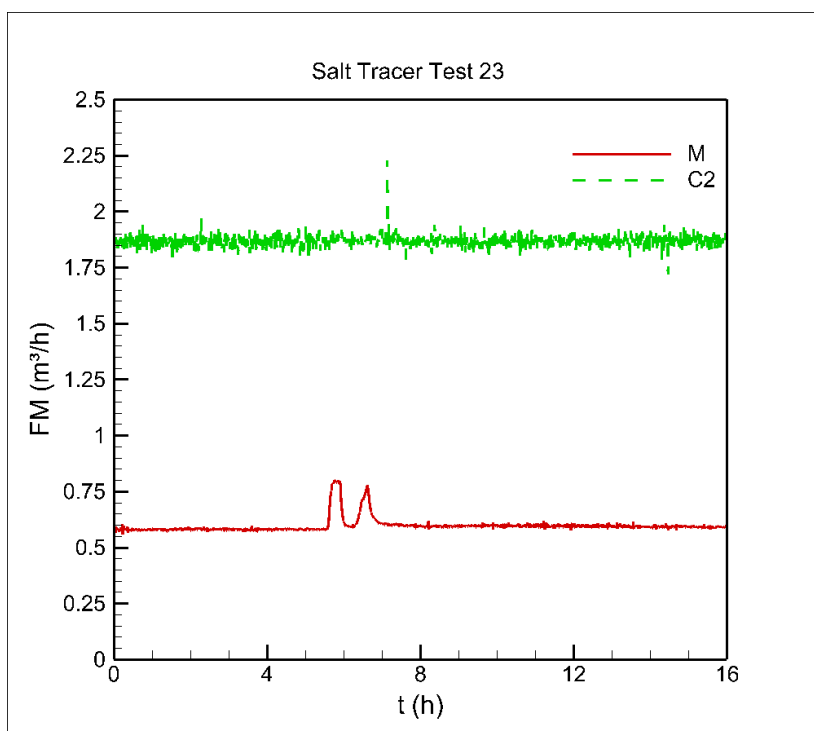
Slika 53: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

Iako je u ovom traser testu puštena oborina, sve krivulje na slici 3 imaju gotovo identičan oblik kao u testu 20. Međutim, radi nešto više početne koncentracije a i same oborine, vršne vrijednosti na većini trasera nisu jednake kao u testu 20, već nešto veće (sve je u redu veličine). Zanimljiva stvar koju primjećujemo, a to je zasigurno plod oborine, je na slici 53c senzor ECT 114. Taj senzor ima drugi vrh koji se pojavljuje u vremenu neznatno ostvarenja oborine.

Zaključujemo da je kapacitet kanala C2 toliko velik, da čak ni značajna oborina ne donosi velike promjene u pronosu trasera kroz domenu.

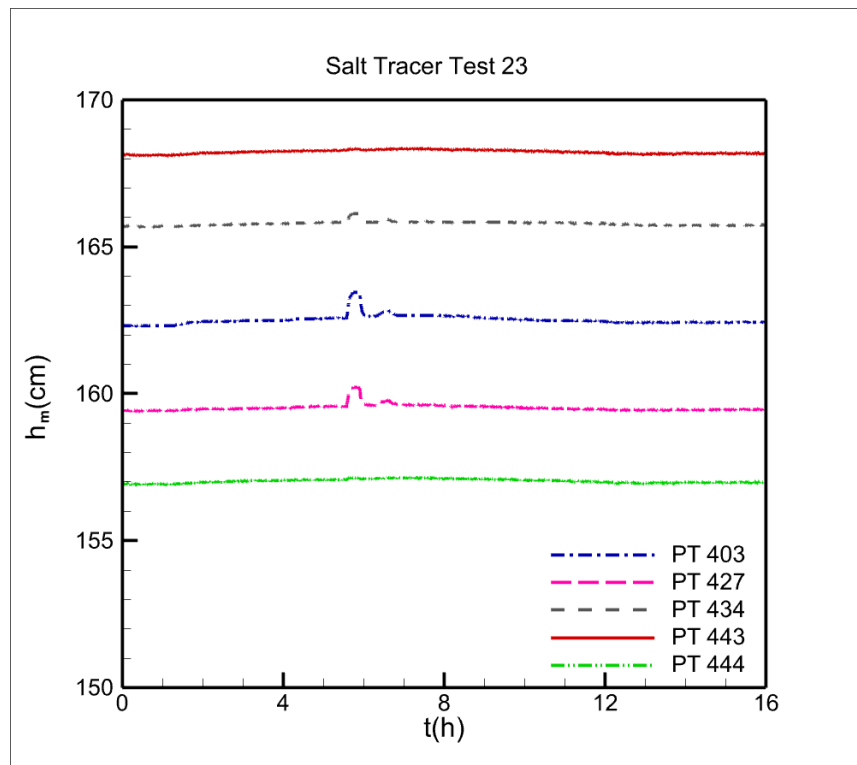
3.8 TRASER TEST 23

Početak utiskivanja slanog traser je u 12:36 h, a završetak 12:54 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16$ h. Slani traser se unosi sa malom protočnom pumpom površinski preko modela prskalice sa mješavinom od cca 1.5 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $11\,540\,\mu S/cm$ kao što se može vidjeti na slici 56 (Slika 56d). Dodatno, puštena je kiša-oborina u vremenu od 13:48 h do 13:34 h, intenzitetom protoka $2l/min/m^2$. Otvoren je kanal najvećeg kapaciteta, kanal C2.

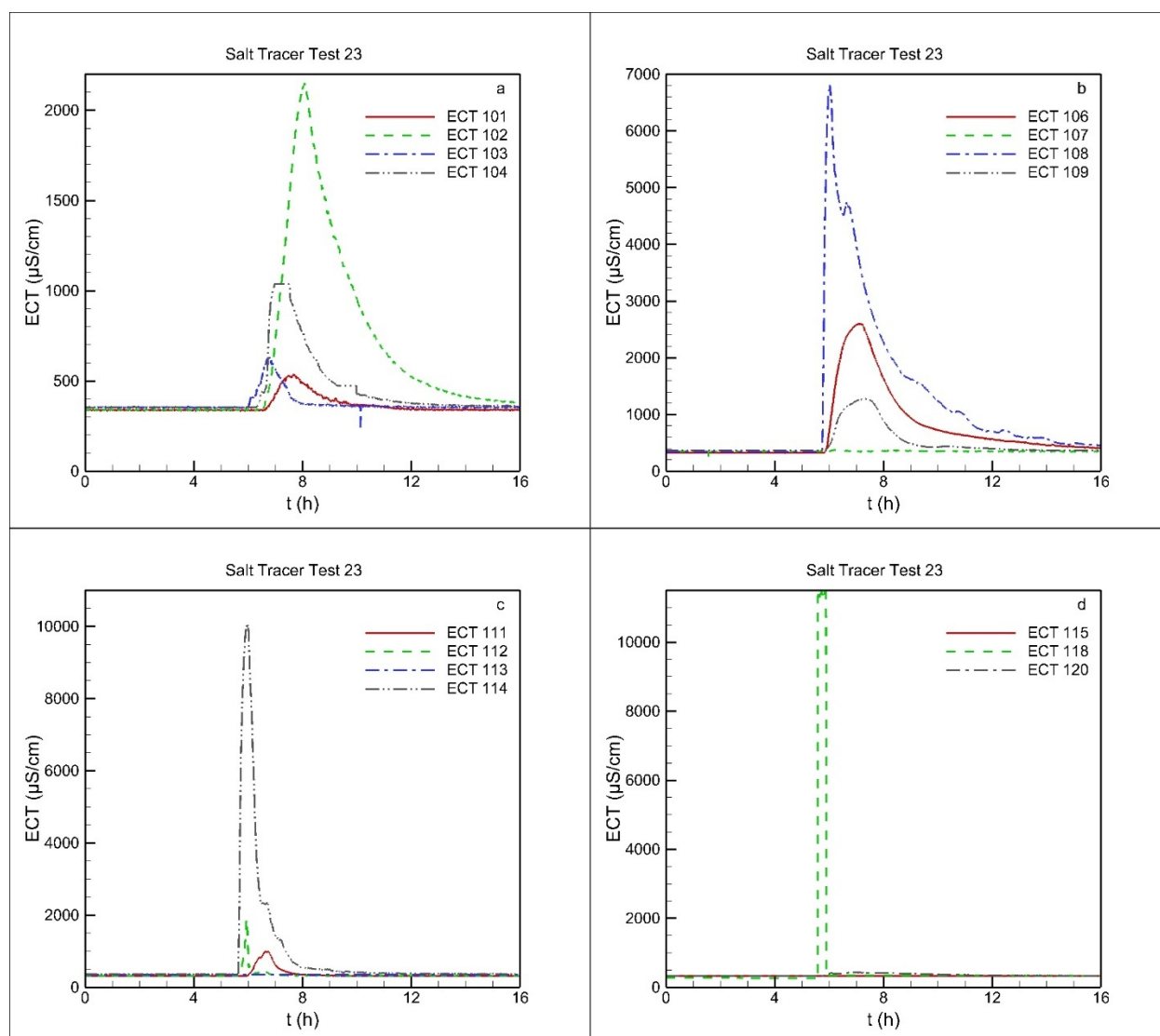


Slika 54 – Protok u matrici i kanalu C2.

Protok u matrici (M) je oko $0.60\,m^3/h$, dok se tijekom utiskivanja i oborine podiže gotovo na jednaku vrijednost od $0.80\,m^3/h$, samo što kod utiskivanja vrh ima više „ispeglan“ oblik. Protok u kanalu C2 je cijelim vremenom promatranja testa od 1.85 do $1.90\,m^3/h$, što je prikazano na slici 54.



Slika 55: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.



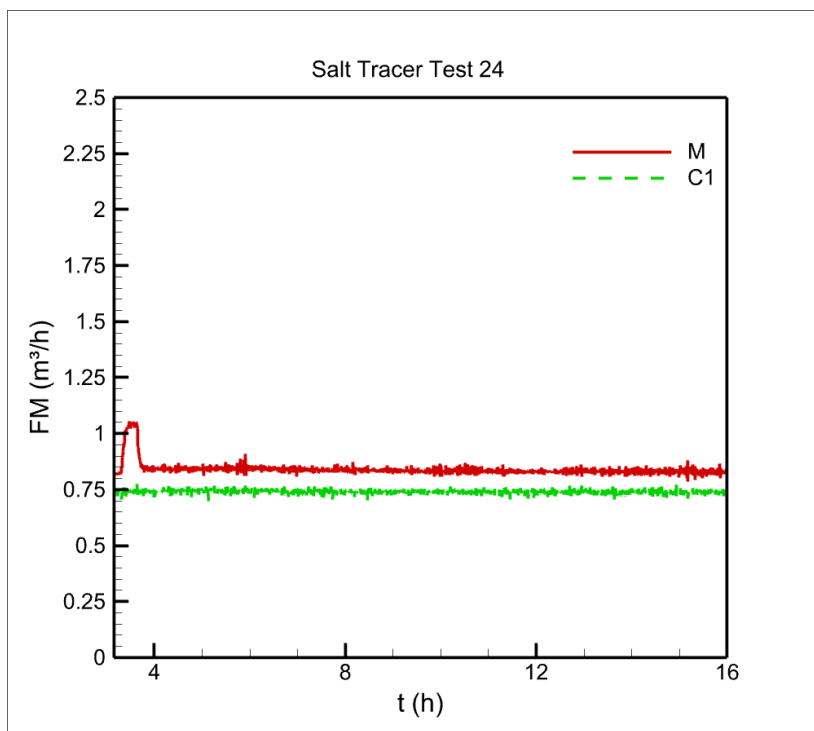
Slika 56: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

Vrijednost početne koncentracije slanog trasera prikazana je na slici 56d, a uz nju također i senzori ECT 118 i 120 koji gotovo da nemaju odziv. Očigledno je da površinsko utiskivanje za razliku od bušotinskog ima prigušujući utjecaj na ECT 120 koji je dosada u svakom testu bio sa iznosom od barem $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ i vremenskim utjecajem od nekoliko sati. Na slici 56c ECT 114 ima jako visok vršni odziv od $10000 \mu\text{S}/\text{cm}$ sa 3-ipo satnim ukupnim prolazom trasera pokraj njega. Senzor ECT 112 ima zanimljiv odziv od $1900 \mu\text{S}/\text{cm}$, s obzirom da se na testu 22 nije odazvao, a u testu 17 imao je duplo manji odziv. Na slici 56b grupa nizvodnih trasera pokazuje vremenski odmak od uzvodnijih trasera, ali i manje vršne vrijednosti što je očekivano. U grupi senzor ECT 108 pokazuje najveću vrijednost od $6800 \mu\text{S}/\text{cm}$, ali ima i jedan „rog“. ECT 106 i 109 imaju log-normalne raspodjele. Svi iz grupe senzora koji se nalaze najnižvodnije, što je prikazano na slici 56a, imaju solidne odzive od 500 do preko $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ i to od neposredno

nakon utiskivanja trasera do 10 sati poslije utiskivanja. Najveći i najduži odziv ima senzor ECT 102 koji ima nagao i oštar vrh i postepeno opadanje prema početnoj vrijednosti.

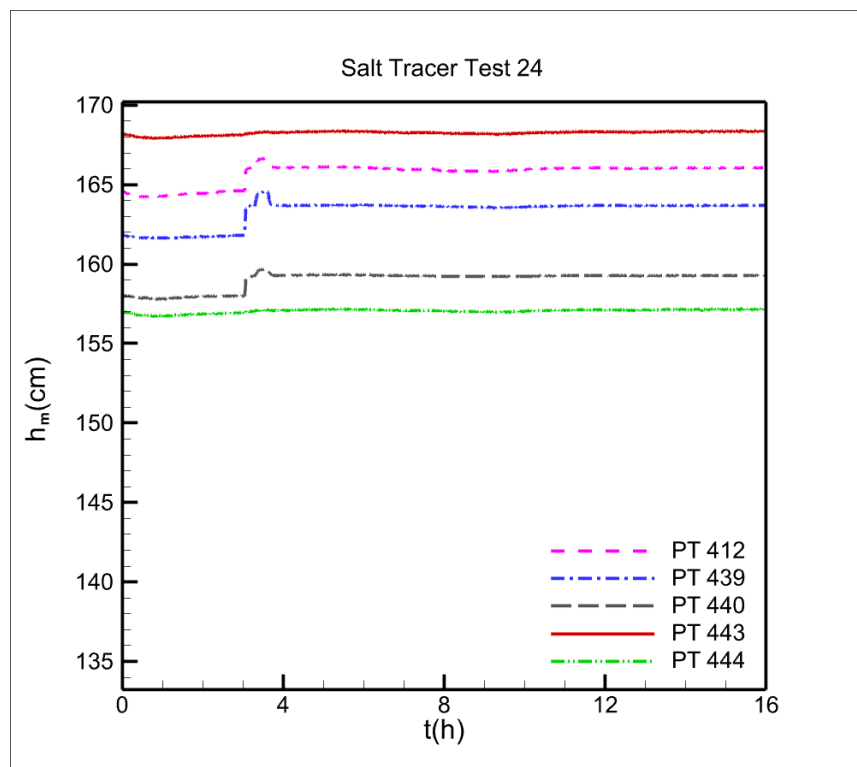
3.9 TRASER TEST 24

Početak utiskivanja slanog trasera je u 10:17 h, a završetak 11:37 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16$ h. Slani traser se unosi sa malom protočnom pumpom površinski prskalicama sa mješavinom od cca 3 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $12\,150\ \mu S/cm$ kao što se može vidjeti na slici 59 (Slika 59d). Oborine nema u ovome testu. Otvoren je kanal C1.

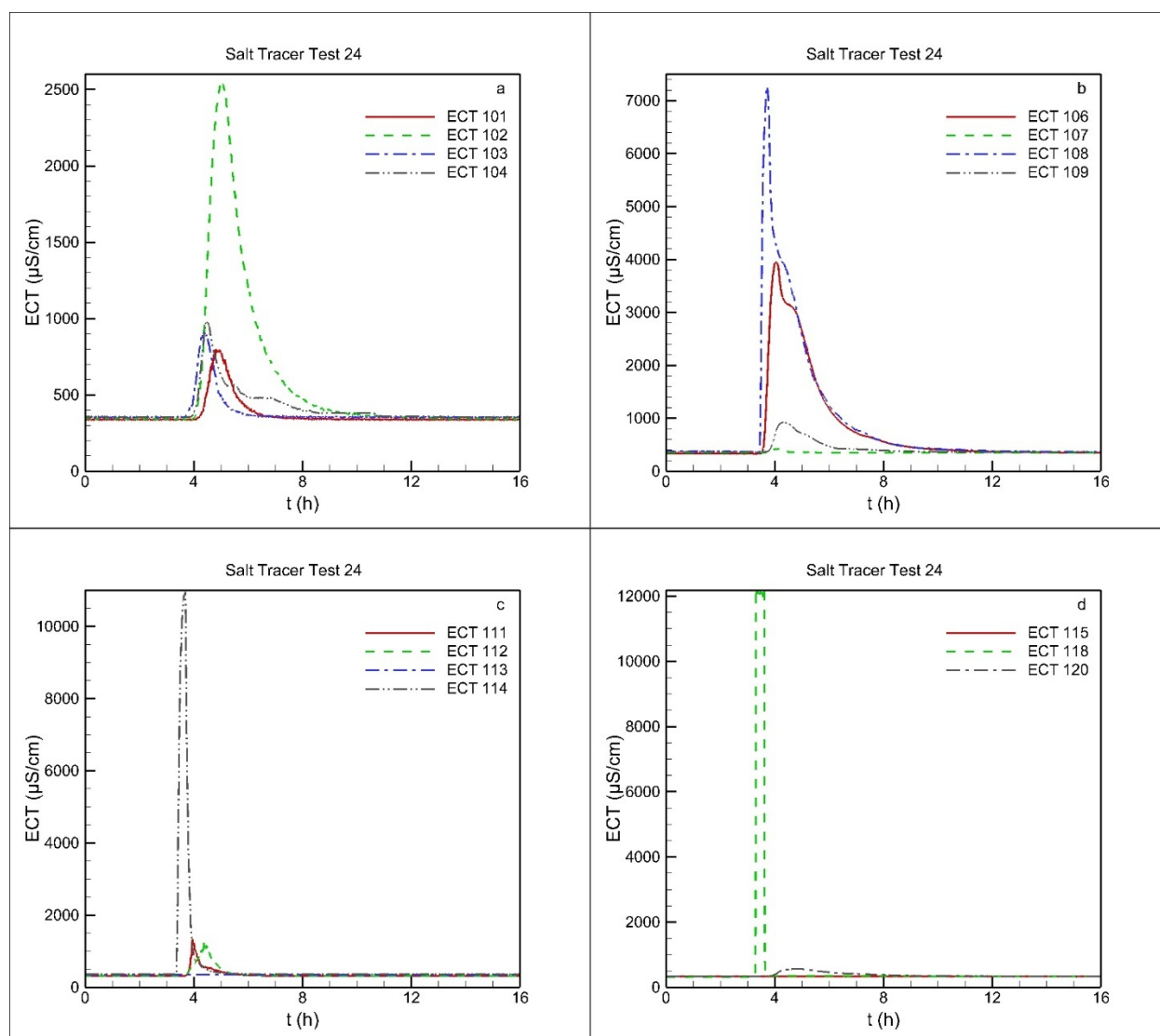


Slika 57: Protok u matrici i kanalu C1.

Prije utiskivanja slanog trasera uspostavljen je stacionarni protok u kanalu od $0.75\ m^3/h$ te u matrici (M) od $0.82\ m^3/h$ (Slika 57). Prilikom utiskivanja slanog trasera u B20 protok u matrici se digao na $1.10\ m^3/h$. Nakon završetka utiskivanja protok u matrici postepeno se vratio na vrijednost blisku početnoj, oko $0.84\ m^3/h$.



Slika 58: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.

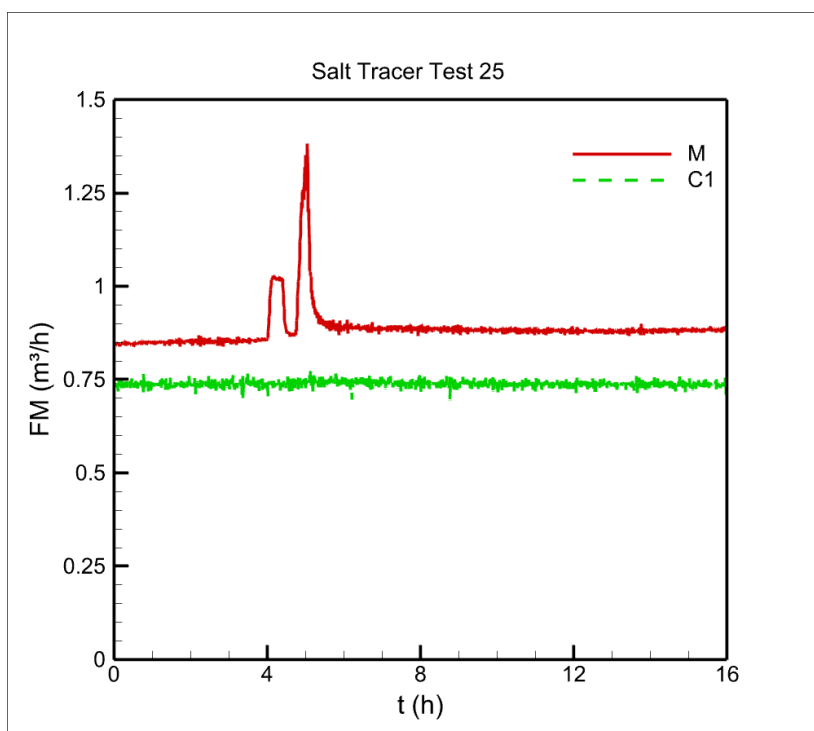


Slika 59: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

Na slici 59d vidi se početna koncentracija trasera na senzoru ECT 118, senzor ECT 120 ima maksimalan odziv oko $600 \mu\text{S}/\text{cm}$, a senzor ECT 115 nije na putu trasera pa nema uopće odziva. Senzor ECT 114 na slici 59c, jako se dobro osjeti sa oštrom, naglom vrijednošću na $12\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$, dok ECT 111 ima sličnu širinu, ali manju vršnu vrijednost od svega cca $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$. Senzor ECT 112 sličan je prethodnom, ali je vremenski odgođen i nešto proširen, dok se ECT 113 nije osjetio. Na slici 59b prilično jak odziv ima ECT 108, a ECT 106 prati ga po obliku krivulje i vremenu, ali je po vrijednosti skoro pa duplo manji. Grupa senzora koji su najbliže nizvodnoj vodospremi istog su oblika i iznosa od 800 do $950 \mu\text{S}/\text{cm}$, osim senzora ECT 102 koji ima najbolji odziv od $2500 \mu\text{S}/\text{cm}$.

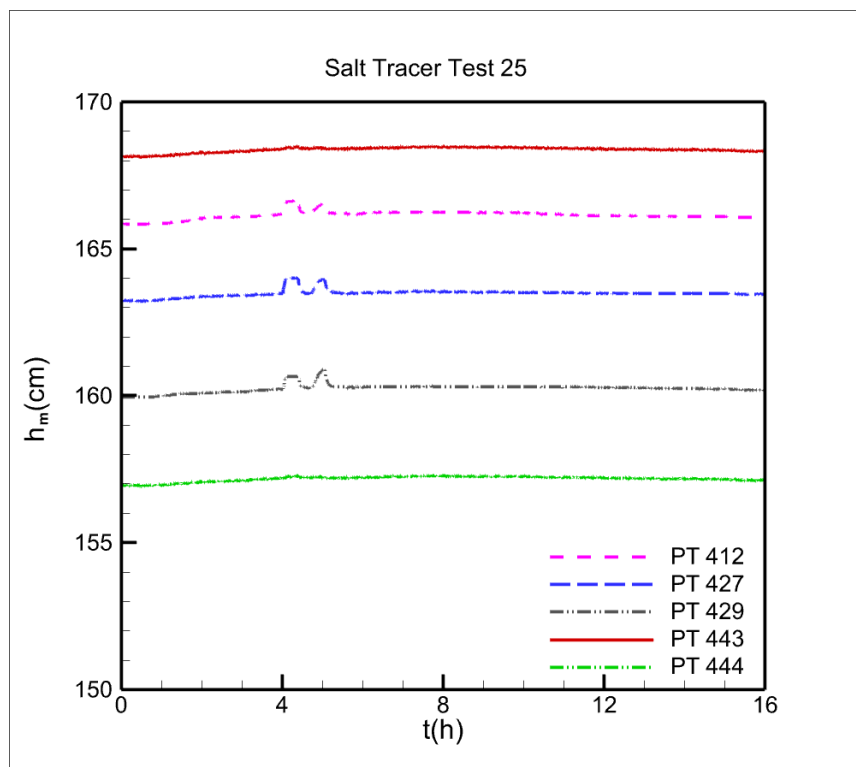
3.10 TRASER TEST 25

Početak utiskivanja slanog traser je u 11:00 h, a završetak 11:24 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16$ h. Slani traser se unosi sa malom protočnom pumpom površinski sustavom prskalica sa mješavinom od cca 3 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $12\,150\,\mu S/cm$ kao što se može vidjeti na slici 63 (Slika 63d). Dodatno, puštena je kiša-oborina u vremenu od 11:43 h do 12:03 h, intenzitetom protoka $2l/min/m^2$. Otvoren je kanal C1.

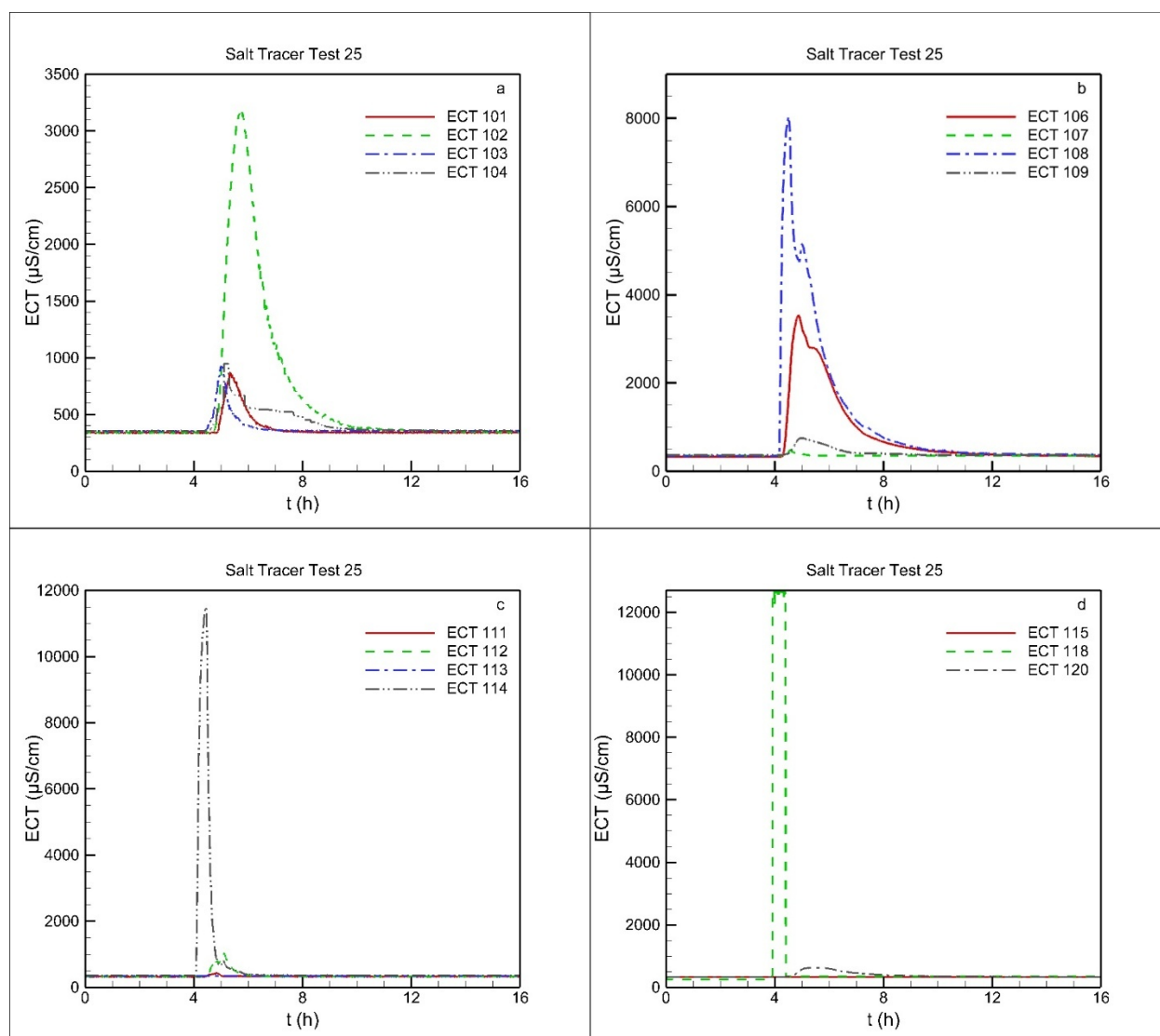


Slika 60: Protok u matrici i kanalu C1.

Ovaj traser test istobitan je prethodnom traser testu 24, uz razliku što ovdje ima oborine. Protok u matrici (M) za vrijeme utiskivanja slanog traser ponovno skače sa 0.80 na $1.08\,m^3/h$, a protok u kanalu C1 ostaje nepromijenjen sa vrijednošću od $0.75\,\mu S/cm$ (slika 60).



Slika 61: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.

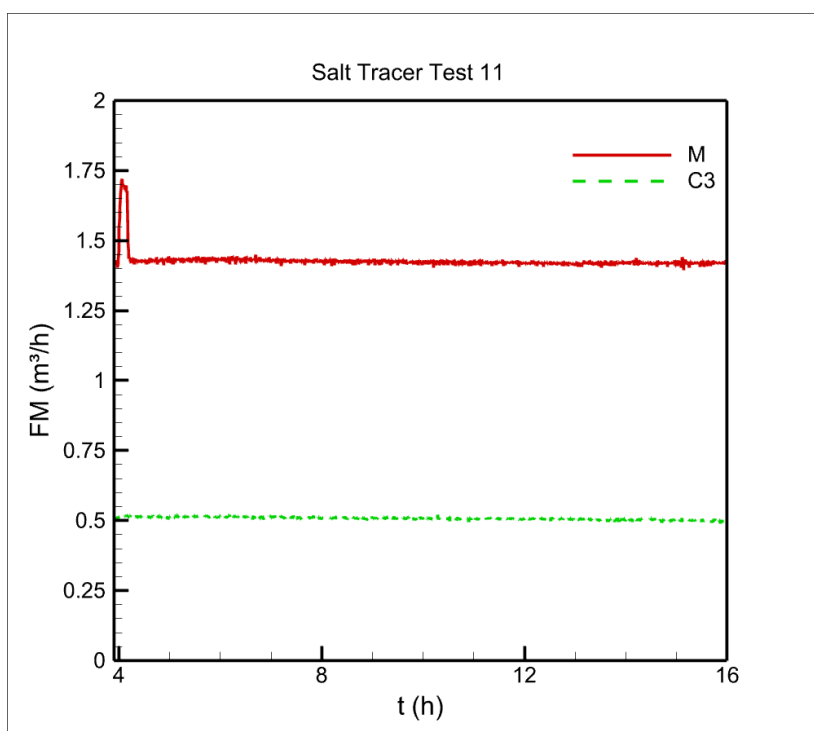


Slika 62: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

Razlike koje su u odnosu na prethodni test 24 razvidne su na slici 62c gdje je senzor ECT 111 skoro pa totalno prigušen. Nadalje na slici 62b ECT 108 razvija još jedan sitni mod ili „rog“ koji je posljedica oborine. Grupa najizvodnijih trasera ostaje tako reći nepromijenjena, razlike su samo u vršnim vrijednostima koje su u ovom slučaju nešto više.

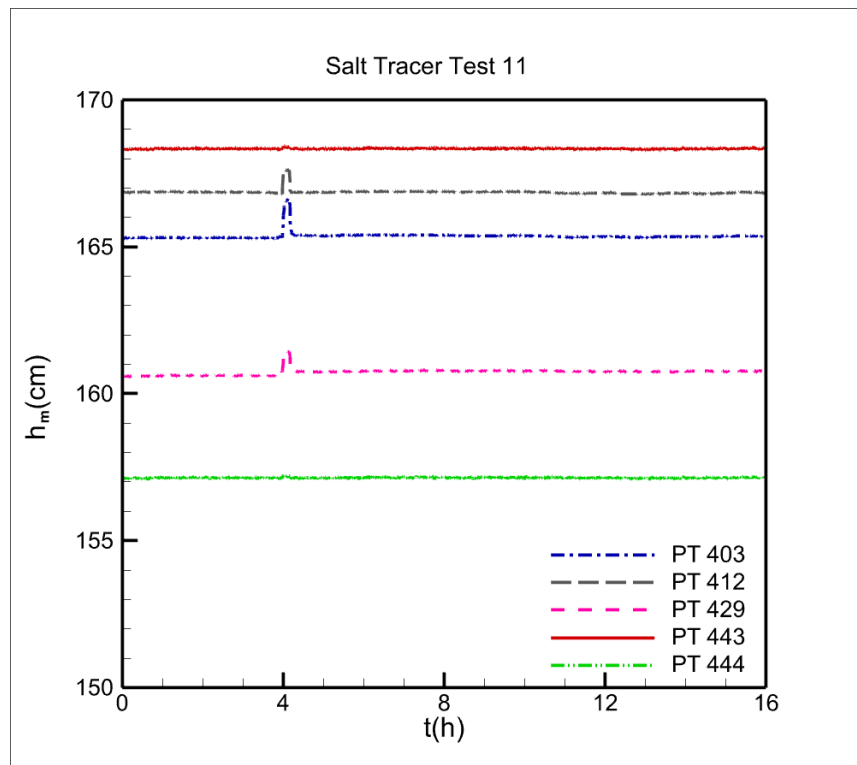
3.11 TRASER TEST 11

Početak utiskivanja slanog traseru je u 13:00 h, a završetak 13:10 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16$ h. Slani traser se unosi sa malom protočnom pumpom direktno u bušotinu B20 sa mješavinom od cca 3 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $13\,500\ \mu S/cm$, ovog puta na senzoru ECT 119, kao što se može vidjeti na slici 65 (slika 65d) Otvoren je kanal C3.

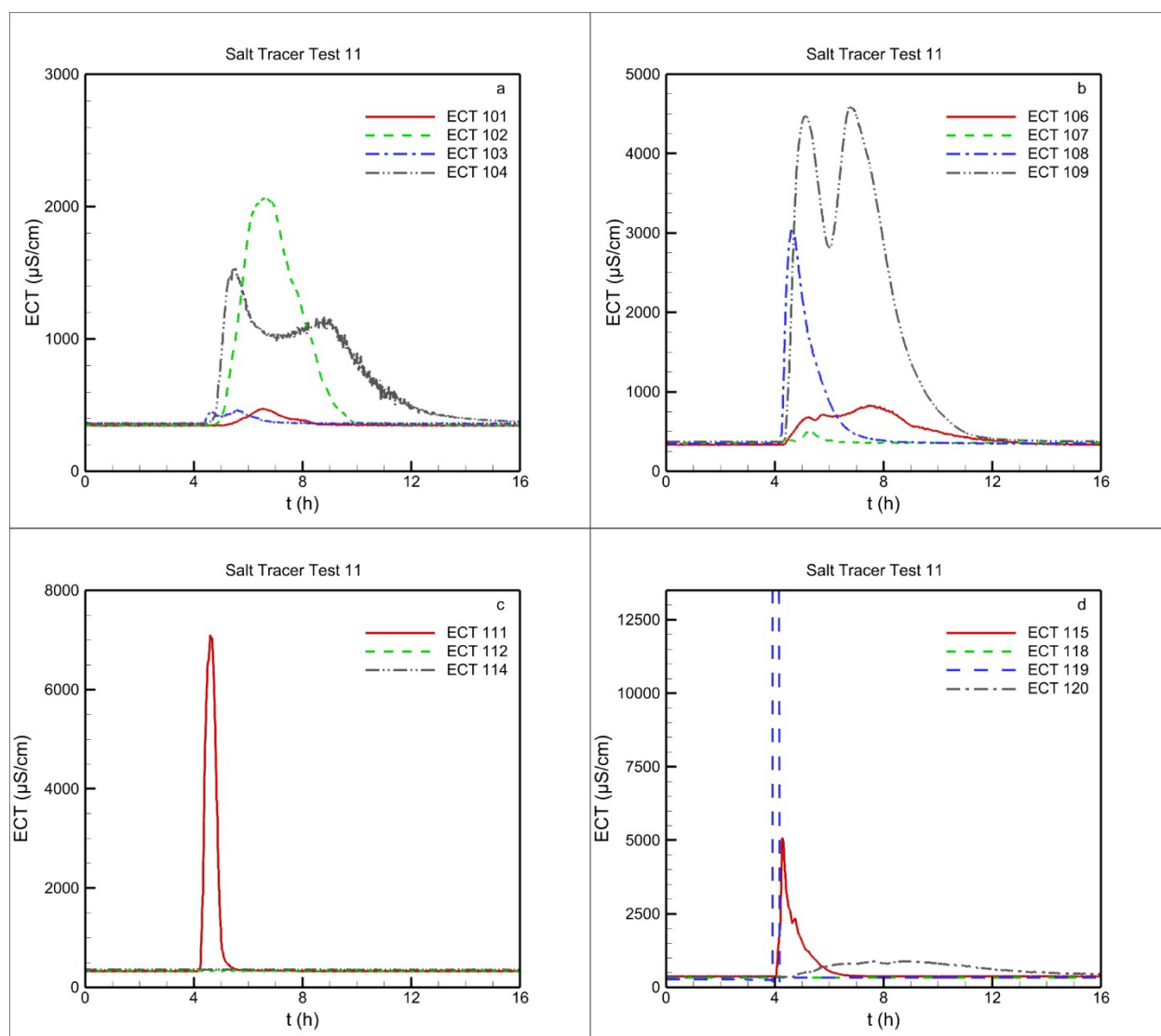


Slika 63: Protok u matrici i kanalu C3.

Prije utiskivanja slanog traseru uspostavljen je stacionarni protok u matrici (M) od $1.40\ m^3/h$ te u kanalu C3 od $0.51\ m^3/h$ (slika 63). Prilikom utiskivanja slanog traseru u B20 protok se digao na $1.72\ m^3/h$. Nakon završetka utiskivanja, protok u matrici se vratio na vrijednost blisku početnoj, oko $1.43\ m^3/h$.



Slika 64: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.



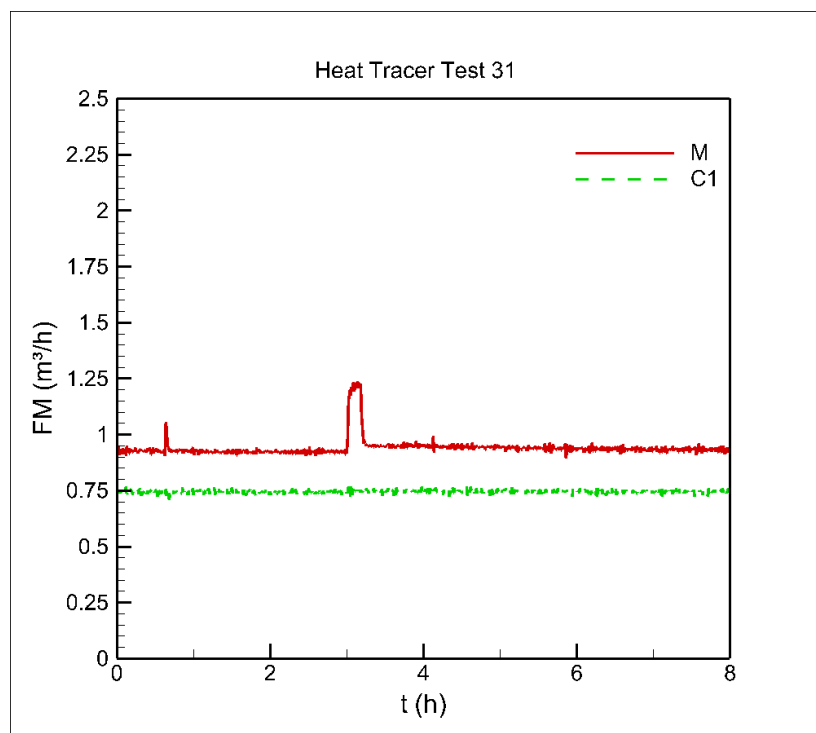
Slika 65: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

Na slici 65d je vidljivo da senzor ECT 119 prikazuje utisnutu koncentraciju slanog fluida u bušotini B20. Senzor ECT 115 reagira skoro pa instantno, te ima vrlo dobar odziv sa oko 5000 $\mu\text{S/cm}$, sa jednim malim „rogom“ tijekom opadanja krivulje, otprilike na pola od maksimalne vrijednosti. Senzor ECT 120 pokazuje pronos trasera kroz vrijeme od 8 do 10 sati. Na slici 65c, jedini traser za odzivom je ECT 111, jako brzo nakon utiskivanja. Nizvodni traseri koji prikazuju bimodalnost na slikama 65b i 65a su ECT 109, 106, 104 i 103, dok traseri ECT 102 i 108 imaju manje-više long-normalnu raspodjelu.

U ovom testu specifično je to što su svi senzori kroz koje je prošao slani fluid veoma brzo reagirali (osim ECT 101), u roku od jednoga sata.

3.12 TRASER TEST 31

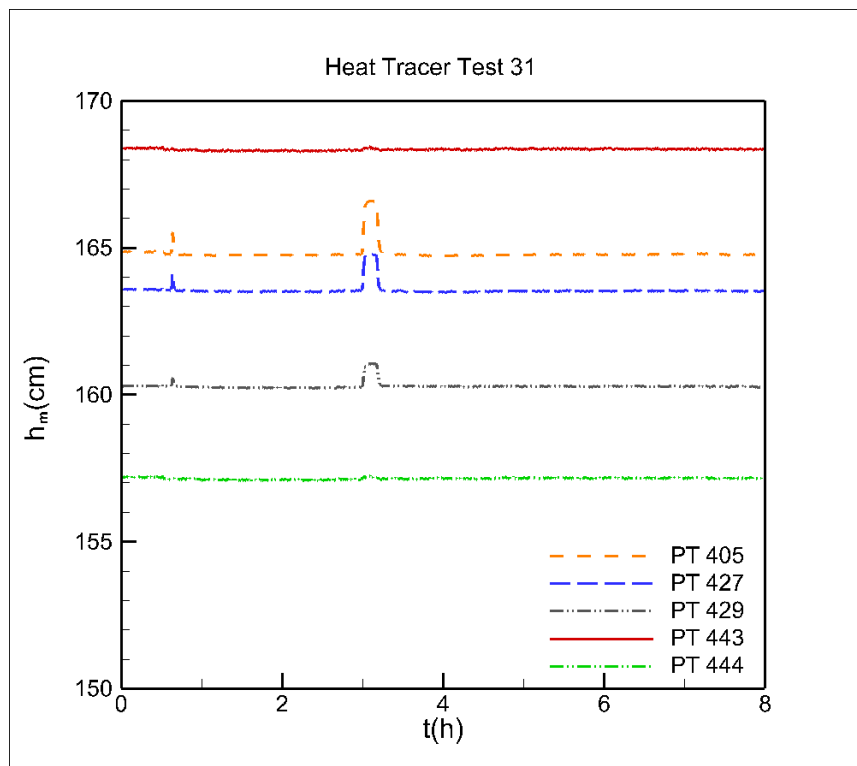
Traser test 31, definiran kao test s toplinskim traserom („heat tracer test“), prvi je u planiranoj seriji od tri takva ispitivanja. Injektiranje (utiskivanje) toplinskog trasera započelo je u 13:56 h te je završeno u 14:07 h, čime je ukupno trajanje faze injektiranja iznosilo 11 minuta. Ukupno vrijeme praćenja (monitoringa) testa iznosilo je 8 sati ($t = 8$ h). Metodologija ispitivanja obuhvaćala je unos 200 litara zagrijane vode, na početnoj temperaturi od 35 °C koja je služila kao toplinski traser, iz bojlera u prihvatni spremnik (badanj). Iz navedenog spremnika, sukladno protokolu primijenjenom u prethodnim testovima, toplinski traser je pomoću pumpe injektiran u bušotinu B20. U vremenu trajanja injektiranja početna temperatura toplog trasera nije se značajno smanjila. Tijekom ovog ispitivanja korišten je kanal C1.



Slika 66: Protok u matrici i kanalu C1.

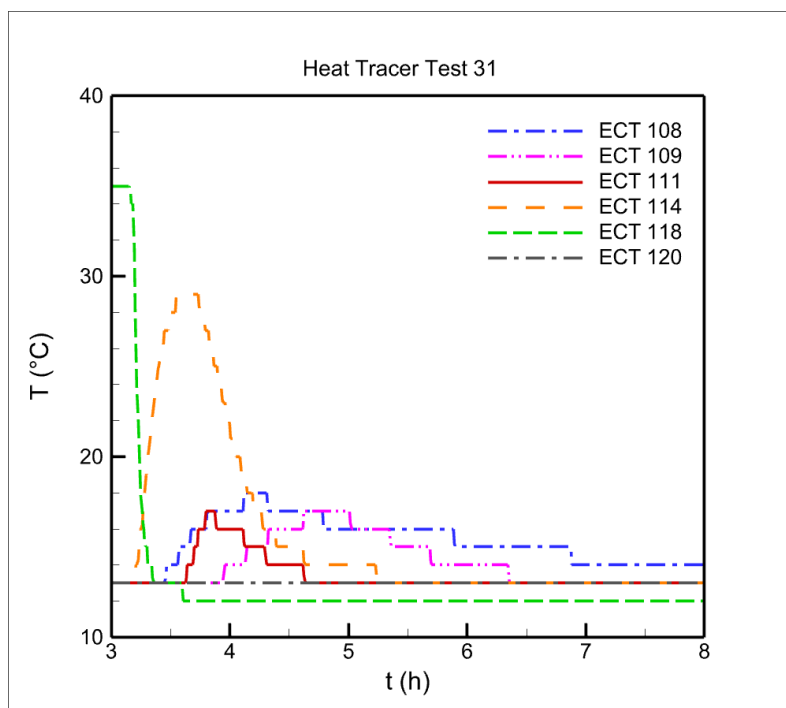
Prije inicijalne faze injektiranja (utiskivanja) toplinskog trasera, u sustavu je uspostavljen stacionarni protok kroz matricu poroznog medija, s vrijednostima fluktuirajući između 0.90 i 0.95 m³/h. Istovremeno, protok u kanalu C1 iznosio je 0.75 m³/h te je navedena vrijednost ostala konstantna tijekom cjelokupnog perioda monitoringa (slika 66). Tijekom same faze injektiranja

toplinskog trasera, koja je započela u trećem satu od početka cjelokupnog praćenja, zabilježen je porast protoka u matrici, dosegnuvši maksimalnu vrijednost od $1.25 \text{ m}^3/\text{h}$. Po završetku procesa injektiranja, protok u matrici se smanjio i stabilizirao na razini od $0.97 \text{ m}^3/\text{h}$, što predstavlja vrijednost neznatno višu od inicijalno uspostavljene.



Slika 67: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.

Tijekom eksperimenta, razine vode u uzvodnom (PT 443) i nizvodnom (PT 444) rezervoaru održavane su konstantnima, čime su definirani stacionarni rubni uvjeti. Na slici 67 prezentirane su izmjerene vrijednosti tlaka za selektirane piezometre, pozicionirane na različitim lokacijama unutar ispitivane domene. Prikazani su također i specificirani rubni uvjeti, odnosno konstantne razine vode u uzvodnom i nizvodnom rezervoaru koje su korištene tijekom ispitivanja.



Slika 68: Prikaz temperature na odabranim senzorima.

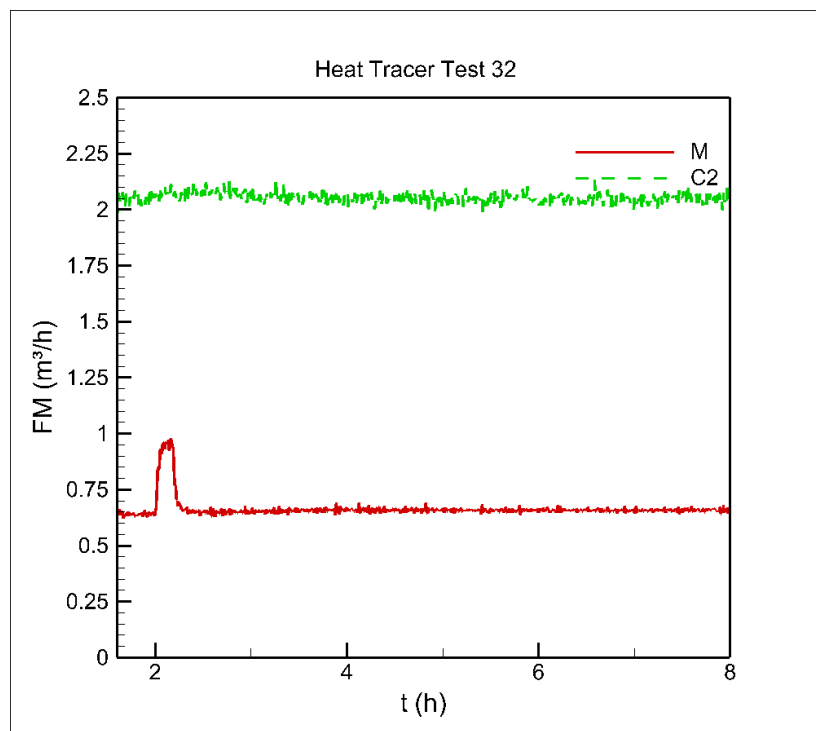
Testovi s toplinskim traserima, za razliku od testova sa slanim traserima, karakterizirani su manjom osjetljivošću praćenja signala. Naime, iako injektirana voda kao nositelj toplinskog signala doseže lokacije senzora, dolazi do disipacije temperature uslijed procesa miješanja i disperzije s vodom iz poroznog medija, ali i značajnog gubitka topline uslijed interakcije vode u prorama i čvrste faze u poroznoj matrici. Slijedom navedenog, na Slici 68 prikazani su podaci sa samo šest senzora: pet je locirano unutar ispitivane domene, dok je senzor ECT 118 služio kao referentni za mjerenje inicijalne temperature trasera u prihvatnom spremniku prije injektiranja u matricu. Uočava se da senzor ECT 114, pozicioniran u uzvodnom dijelu domene, pokazuje izražen odziv, registrirajući vršnu temperaturu od 29 °C. Vrijeme proboja (prve detekcije) trasera na ovom senzoru zabilježeno je približno 10 minuta nakon završetka faze injektiranja, dok je vrijeme potrebno za dosezanje vršne temperature iznosilo dodatnih 30 minuta. Nakon dosezanja maksimuma, temperatura je pokazivala trend jednolikog opadanja, spustivši se na 13 °C unutar 2 sata i 30 minuta od početka injektiranja toplinskog trasera. Senzor s narednim najizraženijim odzivom je ECT 108, lociran približno na sredini ispitivane dionice, unutar utjecajne zone kanala C1 koji je bio aktivan tijekom ovog testa. Senzor ECT 109, iako na približno jednakoj longitudinalnoj udaljenosti, ali pozicioniran bliže rubnoj granici domene u odnosu na ECT 108, zabilježio je kasniju detekciju trasera, s vršnom temperaturom od 17 °C, što je za 1 °C niže u usporedbi sa senzorom ECT 108. Unatoč malo uzvodnijoj poziciji senzora ECT 111 u odnosu na

ECT 108, detekcija trase na njemu kasni, što se pripisuje njegovom položaju na visinski nepovoljnijoj koti, uslijed čega fronta disperziranog trase doseže ga s određenim zakašnjenjem. Maksimalna registrirana temperatura na ECT 111 iznosi 17 °C, a oblik krivulje proboja odgovara log-normalnoj distribuciji, analogno senzoru ECT 108. Na ovom senzoru zabilježen je i najbrži prestanak detekcije toplinskog signala, približno 3 sata i nekoliko minuta nakon završetka injektiranja. Senzor u kanalu C1 (ECT 120) nije zabilježio odziv što upućuje na to da je topli traser izgubio toplinsku energiju dok je došao do navedenog senzora. Ostali senzori, pozicionirani nizvodnije, kao i oni koji nisu eksplicitno navedeni, nisu registrirali mjerljiv odziv tijekom testa s toplinskim traserom.

Zaključno, može se konstatirati da je detekcija toplinskog trase na aktivnim sensorima prestala približno 5 sati nakon inicijalnog injektiranja. Ovo ne implicira da je cjelokupni volumen injektirane vode prošao kroz ispitivanu domenu unutar tog perioda, već ukazuje na redukciju temperaturnog signala do razine inicijalne temperature domene od 13 °C.

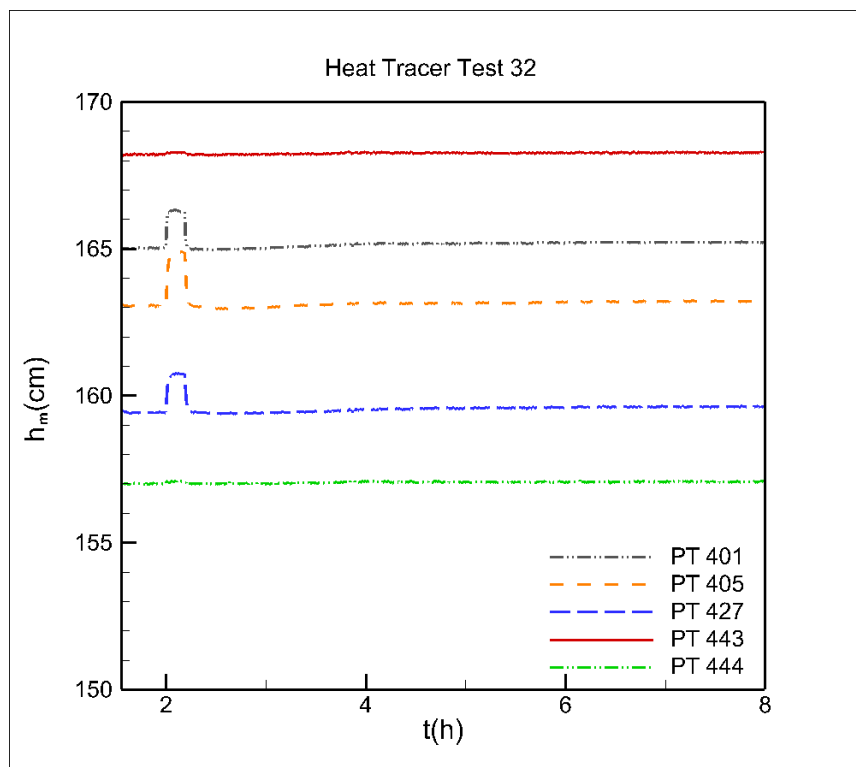
3.13 TRASER TEST 32

Traser Test 32 predstavlja drugu fazu u seriji toplinskih traser testova. Ključna razlika u postavci ovog testa u odnosu na prethodni (Test 31) jest korištenje protočnog kanala C2, koji se odlikuje značajno većim kapacitetom i nešto kraćim perforiranim dijelom, za razliku od kanala C1 manjeg kapaciteta korištenog ranije. Faza injektiranja toplinskog trase započela je u 11:41 h te je završena u 11:52 h, dok je ukupno trajanje monitoringa iznosilo 8 sati ($t = 8$ h). Metodologija unosa toplinskog trase (200 litara zagrijane vode) u bušotinu B20 ostala je nepromijenjena. U ovom traser testu inicijalna temperatura trase bila je neznatno veća od prethodnog testa, iznosa 36 °C.



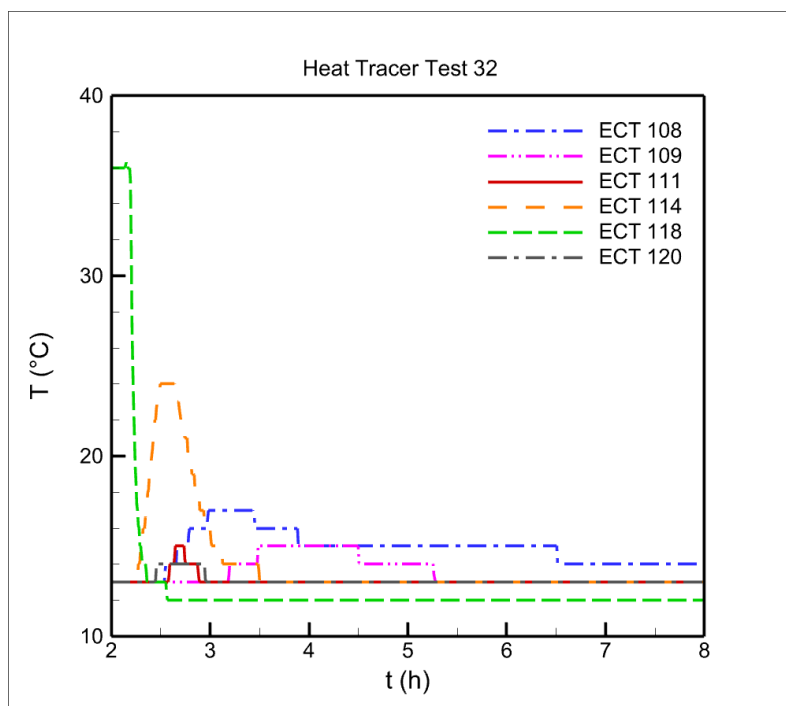
Slika 69: Protok u matrici i kanalu C2.

Analiza protoka (slika 69) pokazuje da je prije starta injektiranja toplinskog trasera uspostavljen stacionarni protok kroz matricu poroznog medija na razini od približno $0.65 \text{ m}^3/\text{h}$. Ova vrijednost je primjetno niža u usporedbi s Testom 31, što se može pripisati dominantnom utjecaju otvorenog kanala C2. Istovremeno, protok kroz kanal C2 bio je konstantan i značajno viši, iznoseći oko $2.05 \text{ m}^3/\text{h}$ tijekom cjelokupnog trajanja testa, reflektirajući njegov veći hidraulički kapacitet. Tijekom same faze injektiranja trasera, koja je započela oko drugog sata monitoringa, zabilježen je očekivani porast protoka u matrici, dosegnuvši vršnu vrijednost od približno $0.97 \text{ m}^3/\text{h}$. Nakon završetka injektiranja, protok u matrici se stabilizirao na vrijednosti neznatno višoj od početne, oko $0.67 \text{ m}^3/\text{h}$.



Slika 70: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.

Razine vode u uzvodnom i nizvodnom rezervoaru, koje definiraju rubne uvjete, održavane su konstantnima tijekom cijelog eksperimenta (slika 70). Odziv piezometara na injektiranje trasea bio je vidljiv kao kratkotrajni porast tlaka, najizraženiji na piezometru PT 401, te u manjoj mjeri na PT 405 i PT 427, nakon čega su se vrijednosti brzo vratile na stacionarne razine. Piezometri PT 443 i PT 444 (rubni uvjeti) pokazuju stabilne vrijednosti, potvrđujući kontrolirane hidrauličke uvjete.



Slika 71: Prikaz temperature na odabranim senzorima.

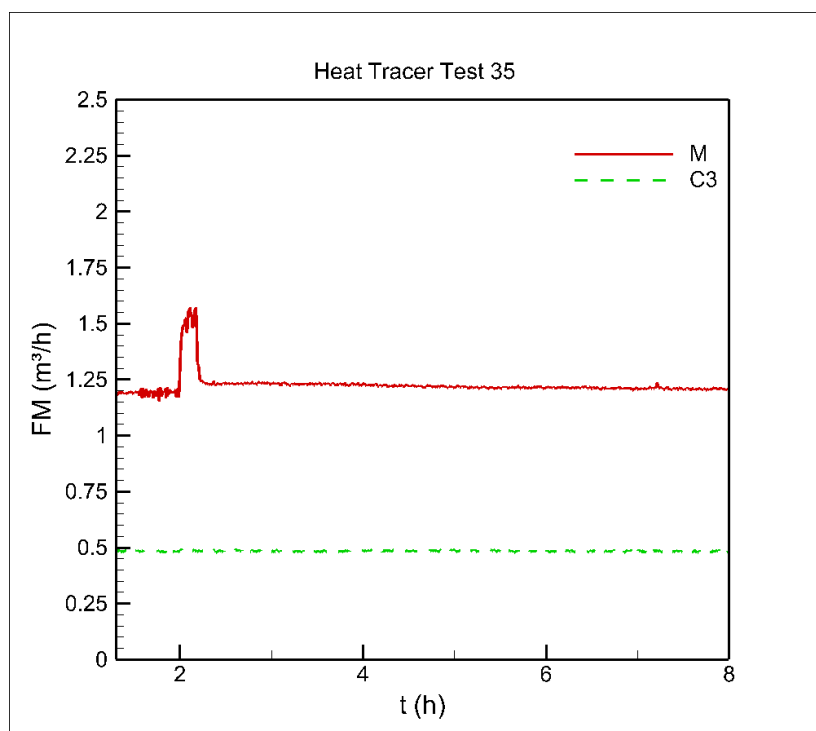
Temperaturni odzivi senzora (slika 71) pružaju uvid u kretanje i disipaciju toplinskog signala. Referentni senzor ECT 118 pokazuje inicijalnu temperaturu trasera od 36°C u trenutku ulaska u sustav. Senzor ECT 114, smješten uzvodno, zabilježio je brzi proboj trasera s vršnom temperaturom od 24 °C. Uočljivo je da je ova vršna temperatura niža, a trajanje povišene temperature kraće u usporedbi s Testom 31, što ukazuje na brže miješanje i hlađenje trasera uslijed većeg ukupnog protoka kroz sustav zbog kanala C2. Senzor ECT 108, lociran u zoni utjecaja kanala C2, ali ipak nešto bliži kanalu C1, pokazao je vršnu temperaturu od 17 °C. Iako je vršna vrijednost slična onoj u Testu 31, primjetno je da je plato povišene temperature na ovom senzoru nešto duži prije nego što započne opadanje, što bi moglo ukazivati na direktniji i prolongiraniji utjecaj toka kroz kanal C2 na ovu lokaciju. Senzor ECT 109, pozicioniran bliže rubu domene, zabilježio je vršnu temperaturu od oko 15 °C, što je niže od vrijednosti zabilježene na istom senzoru u Testu 31, te također niže od susjednog ECT 108 u ovom testu. Senzor ECT 111, unatoč uzvodnijoj poziciji od ECT 108, ali na visinski nepovoljnijoj koti, pokazao je kasniju detekciju i nižu vršnu temperaturu od 15 °C, što je također smanjenje u odnosu na prethodni test. Isto kao i u prethodnom testu, traser je ispuštao svu toplinsku razliku u odnosu na toplinu matrice, dok je došao do senzora ECT 120 u kanalu C2. ali, ovdje imao odziv veće temperature????

Općenito, temperaturni signali na većini senzora u Testu 32 pokazuju niže vršne vrijednosti i/ili kraće trajanje povišenih temperatura u usporedbi s Testom 31. Ovo je konzistentno s

očekivanim utjecajem kanala C2, čiji veći kapacitet i protok rezultiraju bržim transportom, intenzivnijim miješanjem i posljedično bržom disipacijom toplinskog signala. Detekcija povišene temperature na aktivnim senzorima prestala je približno 3 sata nakon završetka injektiranja (oko 5. sata ukupnog monitoringa), što je slično ukupnom vremenu detekcije kao u Testu 31, no uz generalno niže zabilježene temperaturne pikove. Ostali, nizvodnije pozicionirani senzori, nisu pokazali mjerljiv odziv.

3.14 TRASER TEST 35

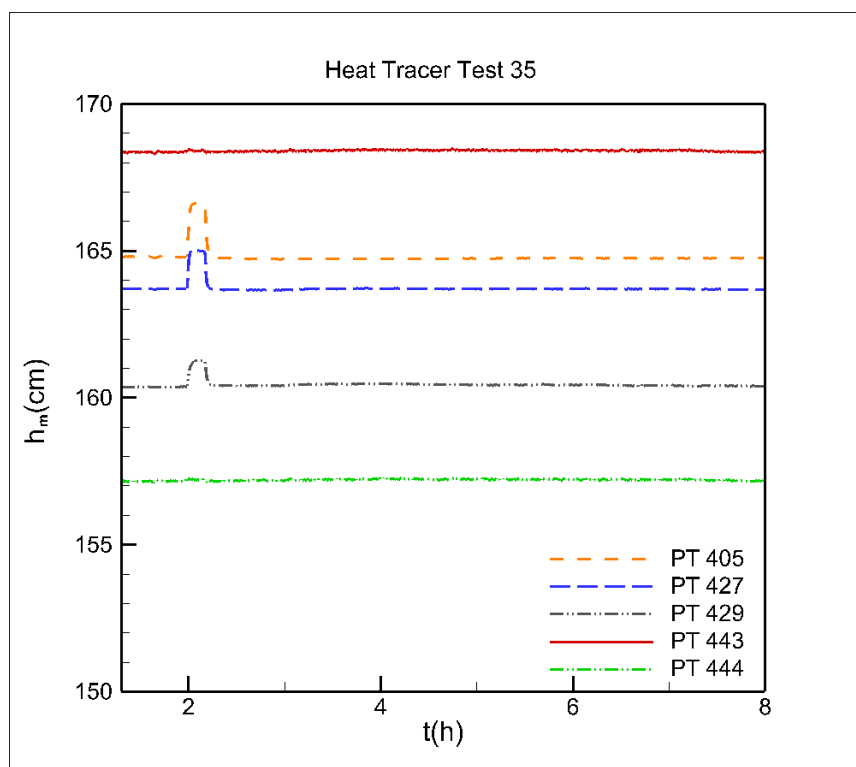
Test 35 predstavlja treće ispitivanje u seriji toplinskih traser testova, s ključnom modifikacijom u hidrauličkom postavu: tijekom ovog testa bio je aktivan protočni kanal C3. Proces injektiranja toplinskog traseru odvijao se između 11:33 h i 11:44 h, s ukupnim trajanjem praćenja od 8 sati ($t = 8$ h). Inicijalna temperatura utisnutog traseru (200 litara zagrijane vode) bila je $38\text{ }^{\circ}\text{C}$, što je najviša početna temperatura u ovoj seriji testova.



Slika 72: Protok u matrici i kanalu C3.

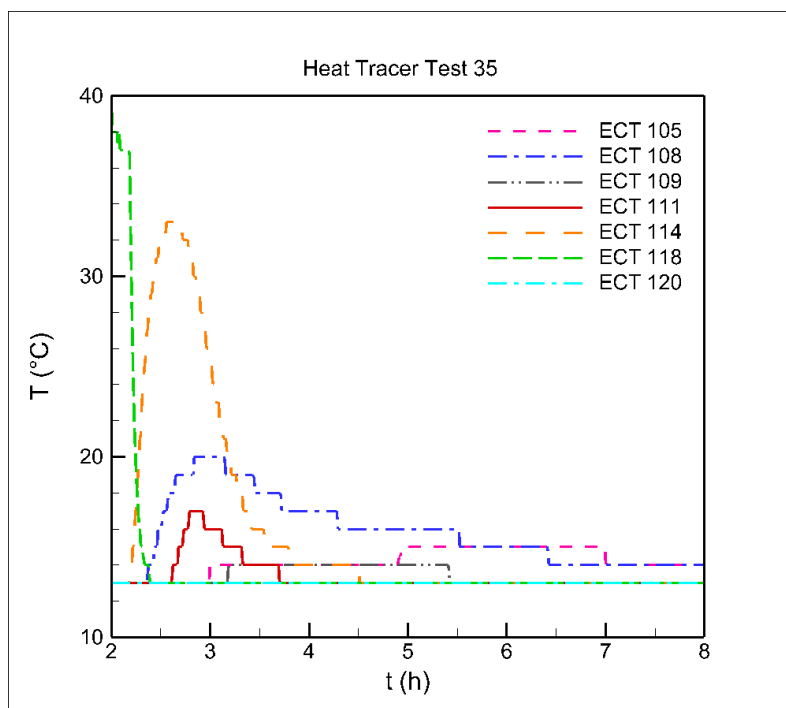
Analiza protoka (slika 72) otkriva da je prije početka injektiranja stacionarni protok kroz matricu poroznog medija (M) iznosio približno $1.19\text{ m}^3/\text{h}$. Ova vrijednost je viša u usporedbi s

Testom 32 (gdje je dominirao kanal C2) i neznatno viša nego u Testu 31 (s kanalom C1). Protok kroz kanal C3 bio je konstantan tijekom testa, na razini od oko $0.49 \text{ m}^3/\text{h}$, što je niže od protoka kroz kanal C1 i značajno niže od protoka kroz kanal C2, sukladno njegovom manjem promjeru. Tijekom faze injektiranja trasera (započete oko drugog sata), protok u matrici porastao je na vršnu vrijednost od približno $1.58 \text{ m}^3/\text{h}$, nakon čega se stabilizirao na oko $1.23 \text{ m}^3/\text{h}$, blago iznad početne razine.



Slika 73: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.

Razine vode u rezervoarima koje definiraju rubne uvjete (PT 443 i PT 444) ostale su konstantne (slika 73). Piezometri unutar domene zabilježili su kratkotrajne poraste tlaka kao odgovor na injektiranje. Najizraženiji odziv vidljiv je na piezometrima PT 405 i PT 429, dok je PT 427 pokazao blažu reakciju. Ovaj obrazac odziva razlikuje se od Testa 32 u piezometarskim visinama PT 405 i PT 427, ali se ne razlikuje u oblicima krivulja. Tako se odražava drugačija distribucija tlaka uslijed aktivnog kanala C3.

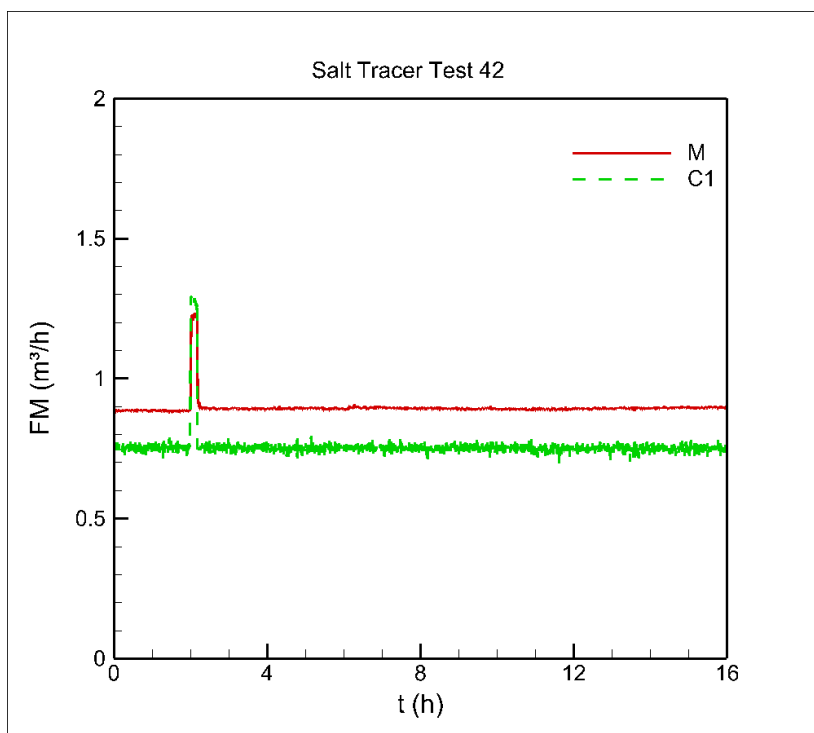


Slika 74: Prikaz temperature na odabranim senzorima.

Temperaturni odzivi senzora (Slika 74) prikazuju kretanje i disipaciju toplinskog signala, s inicijalnom temperaturom traseira od 38 °C zabilježenom na senzoru ECT 118. Općenito, u Testu 35 uočavaju se više vršne temperature na većini senzora u usporedbi s prethodna dva testa, što je djelomično posljedica više inicijalne temperature traseira i drugačije hidrodinamike uvjetovane kanalom C3. Uzvodni senzor ECT 114 pokazao je najizraženiji i najbrži odziv, s vršnom temperaturom od 33 °C. Senzor ECT 108 zabilježio je vršnu temperaturu od 20 °C, što je više nego u prethodnim testovima. Senzor ECT 111 dosegao je maksimum od 17 °C. Senzor ECT 109 imao je vršnu temperaturu od 14 °C. Novi senzor na ovom prikazu, ECT 105, također je zabilježio vršnu temperaturu od oko 14 °C, ali s kasnijim probojem i nešto dužim platoom u usporedbi s ECT 109. ECT 120 u kanalu C3 ni u ovom testu nema odziv. Unatoč višim vršnim temperaturama, trajanje detekcije povišenog signala na većini aktivnih senzora ostalo je slično prethodnim testovima, s prestankom detekcije oko petog sata ukupnog monitoringa. Ostali senzori, koji nisu prikazani, nisu registrirali signifikantan temperaturni odziv. Distribucija topline, uvjetovana perforiranim granama kanala C3 prema rubu domene, može objasniti specifične odzive pojedinih senzora.

3.15 TRASER TEST 42

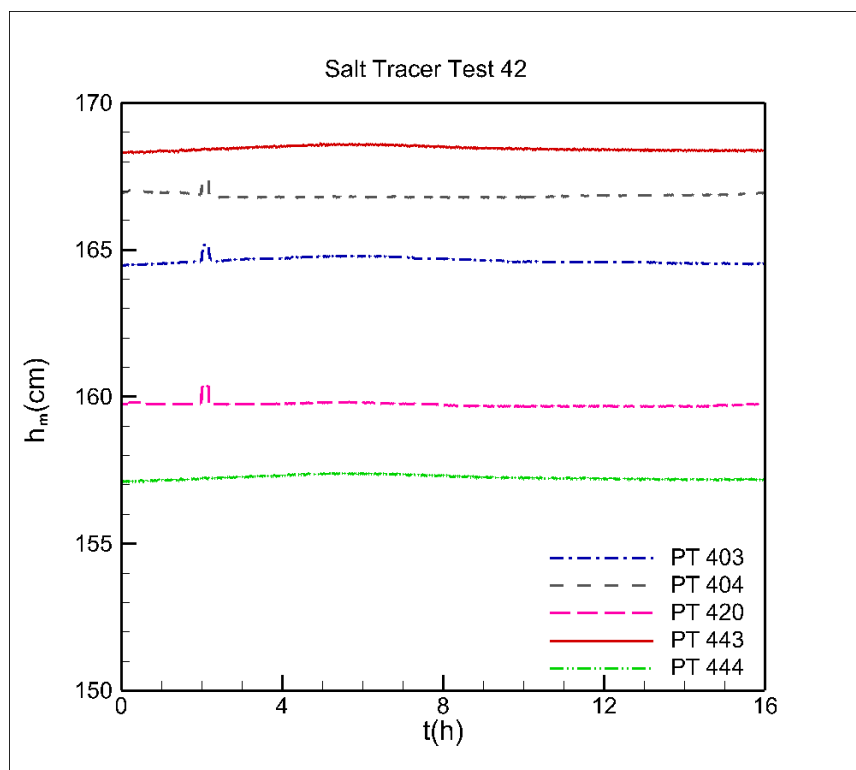
Faza injektiranja slanog traser započela je u 10:35 h i završena je u 10:46 h, rezultirajući ukupnim trajanjem unosa traser od 11 minuta. Ukupno vrijeme praćenja ovog ispitivanja iznosilo je 16 sati ($t = 16$ h). Za potrebe testa, slani traser pripremljen je kao vodena otopina otapanjem približno 3 kg soli u 200 litara vode. Inicijalna električna vodljivost ovako pripremljene otopine traser izmjerena je na $29.000 \mu\text{S}/\text{cm}$, što je dokumentirano na Slici 77d. Unos otopine u sustav izvršen je izravnim injektiranjem u protočni kanal C1 pomoću protočne pumpe malog kapaciteta. Tijekom cjelokupnog trajanja ovog ispitivanja, kanal C1 bio je definiran kao aktivni (otvoreni) protočni put.



Slika 75: Protok u matrici i kanalu C1.

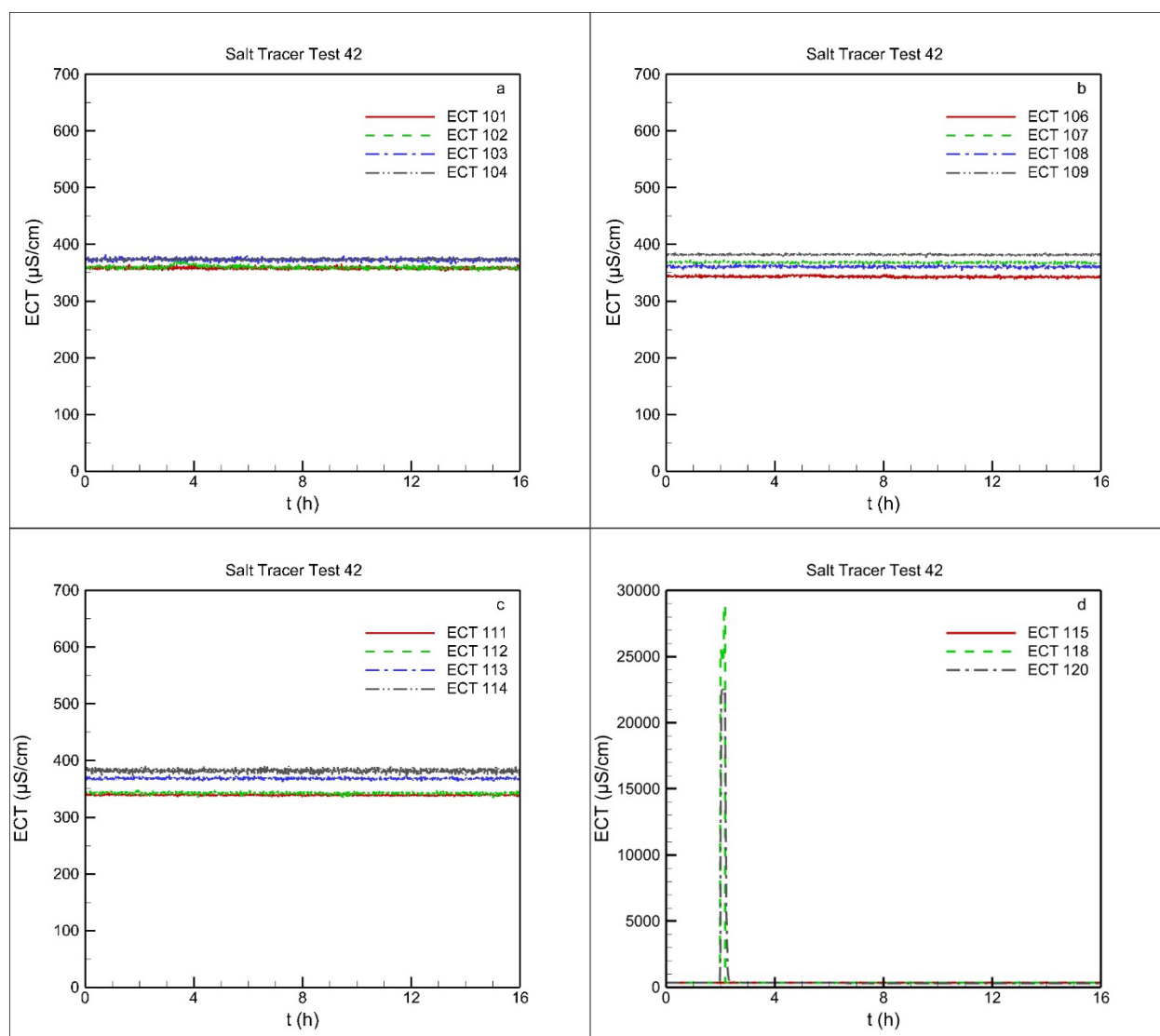
Analiza protoka (Slika 75) indicira da je prije iniciranja injektiranja stacionarni protok kroz matricu poroznog medija (M) održavan na razini od približno $0.90 \text{ m}^3/\text{h}$. Istovremeno, protok kroz aktivni kanal C1 iznosio je oko $0.75 \text{ m}^3/\text{h}$. Obje vrijednosti ostale su relativno konstantne prije faze unosa traser. Tijekom samog injektiranja, koje je započelo oko drugog sata monitoringa, zabilježen je porast protoka kako u matrici, dosegnuvši vršnu vrijednost od oko $1.23 \text{ m}^3/\text{h}$, tako i u kanalu C1, s vrhom od oko $1.29 \text{ m}^3/\text{h}$. Nakon završetka procesa injektiranja, protoci su se brzo

stabilizirali na razinama neznatno višim od inicijalnih: protok u matrici na oko $0.92 \text{ m}^3/\text{h}$, a u kanalu C1 na oko $0.77 \text{ m}^3/\text{h}$.



Slika 76: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.

Piezometarske razine (slika 76) potvrđuju održavanje konstantnih rubnih uvjeta tijekom cijelog ispitivanja, kako je vidljivo iz stabilnih očitavanja na piezometrima PT 443 i PT 444. Kao odgovor na injektiranje trasera, piezometri unutar domene zabilježili su kratkotrajne poraste. Najizraženiji odziv primijećen je na piezometru PT 420, dok su PT 403 i PT 404 pokazali blaže, ali uočljive reakcije. Nakon ovog kratkotrajnog poremećaja, sve piezometarske razine unutar domene vratile su se na svoje stacionarne vrijednosti.



Slika 77: Prikaz električne vodljivosti na sensorima.

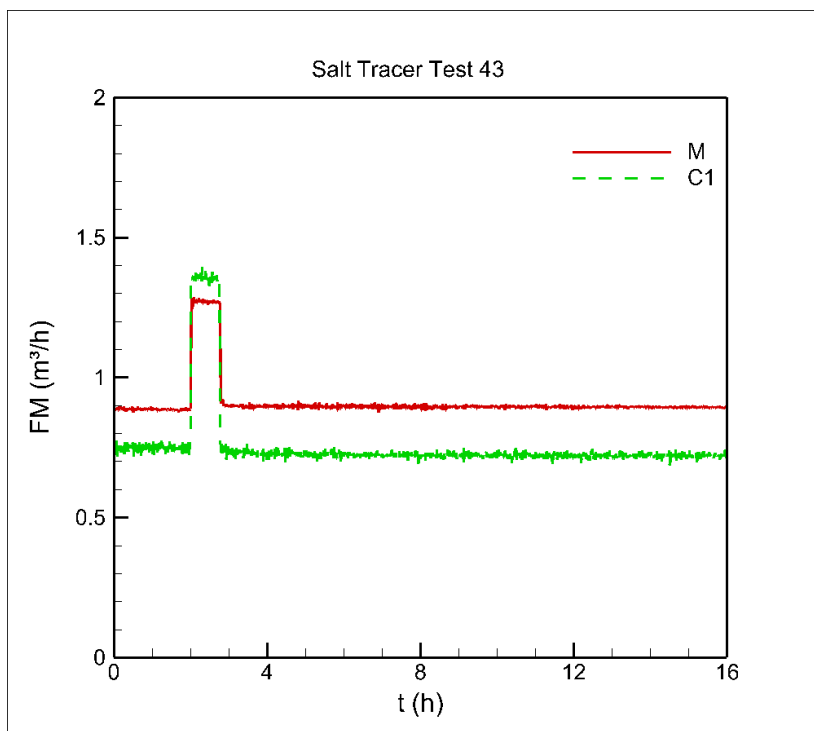
Slika 77d prikazuje odzive senzora ECT 115, ECT 118 (definiran kao referentni za praćenje ulazne koncentracije) i ECT 120. Senzor ECT 120, koji je postavljen u kanalu, jasno registrira prolazak injektiranog slanog trasea, pokazujući oštar porast električne vodljivosti koji doseže vršne vrijednosti od 22 500, što je blizu inicijalno pripremljenih 29 000 $\mu\text{S/cm}$ tijekom perioda injektiranja (oko drugog sata monitoringa). Nakon prolaska glavnine trasea, vrijednosti na ovim sensorima brzo se vraćaju na baznu razinu električne vodljivosti sustava, koja se kreće oko 340-355 $\mu\text{S/cm}$. Senzor ECT 115, s druge strane, tijekom cijelog testa bilježi stabilnu baznu električnu vodljivost, bez detekcije signala trasea. Male varijacije između baznih očitavanja pojedinih senzora pripisuju se njihovoj inherentnoj tvorničkoj netočnosti. Ključno opažanje iz ovog testa jest da niti jedan od ostalih ECT senzora pozicioniranih unutar ispitivane domene (ECT 101-104 na slici 77a; ECT 106-109 na slici 77b; ECT 111-114 na Slici 77c) nije zabilježio nikakav porast električne

vodljivosti iznad svojih stabilnih baznih vrijednosti tijekom čitavih 16 sati praćenja. Svi navedeni senzori pokazuju konzistentna očitavanja unutar raspona od približno 340 $\mu\text{S}/\text{cm}$ do 380 $\mu\text{S}/\text{cm}$, bez ikakve naznake dolaska ili prolaska injektiranog slanog trasera.

Odsutnost detektabilnog signala na sensorima unutar domene, unatoč potvrđenom injektiranju trasera visoke početne koncentracije, ukazuje na to da fronta slanog trasera je gotovo u potpunosti prošla kanalom C1 ili je došlo do takvog stupnja razrjeđenja fluksa (koje možemo dobiti oduzimanjem koncentracija između ECT 118 i ECT 120) i disperzije da koncentracija na mjestima mjerenja nije bila dovoljna za detekciju iznad bazne vodljivosti sustava.

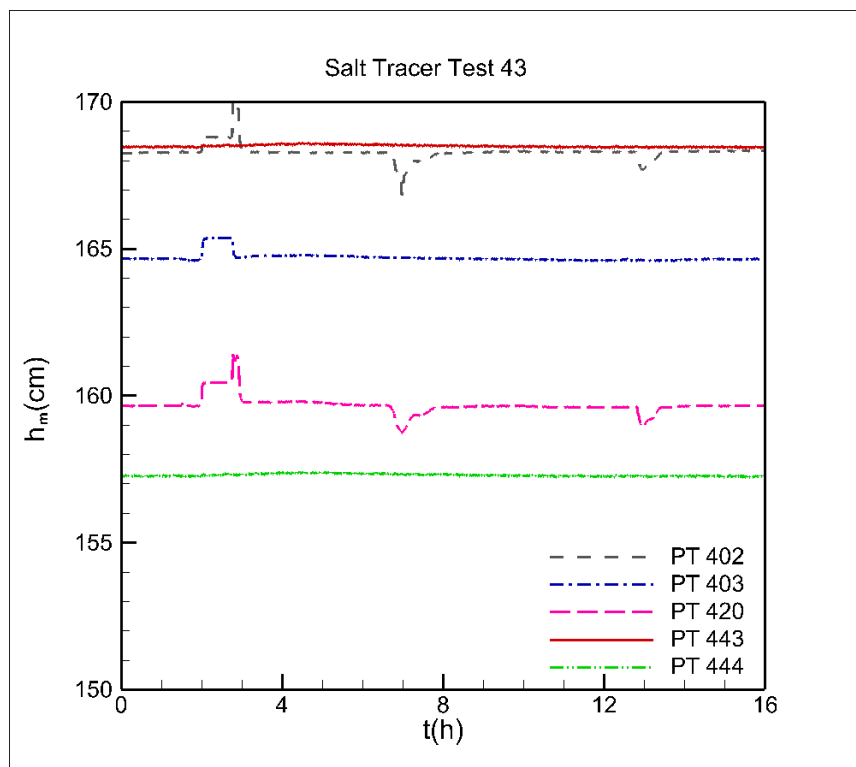
3.16 TRASER TEST 43

Faza injektiranja slanog trasera za ovo ispitivanje, započela je u 11:54 h i završena je u 12:40 h, što je rezultiralo ukupnim trajanjem unosa trasera od 46 minuta. Ukupno vrijeme praćenja iznosilo je 16 sati ($t = 16 \text{ h}$). Metodološki, ovaj test je koncipiran kao direktan nastavak i usporedba s prethodnim ispitivanjem (Traser Test 42), uz ključne modifikacije u količini i koncentraciji primijenjenog trasera. Vodena otopina pripremljena je otapanjem približno 5 kg soli u značajnom volumenu od 1000 litara vode. Ovo predstavlja pet puta veću ukupnu masu i volumen trasera u odnosu na Test 42. Unatoč peterostrukom povećanju mase unesene soli, inicijalna električna vodljivost pripremljene traserske otopine izmjerena je na 17 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Ova vrijednost je približno 40% niža od inicijalne koncentracije korištene u Testu 42 (koja je iznosila 29 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), što je dokumentirano i usporedivo sa prikazom na slici 80d. Kao i u prethodnom testu, unos pripremljene otopine u sustav izvršen je izravnim injektiranjem u protočni kanal C1 pomoću protočne pumpe malog kapaciteta, te je tijekom cjelokupnog trajanja ovog ispitivanja kanal C1 bio definiran kao aktivan.



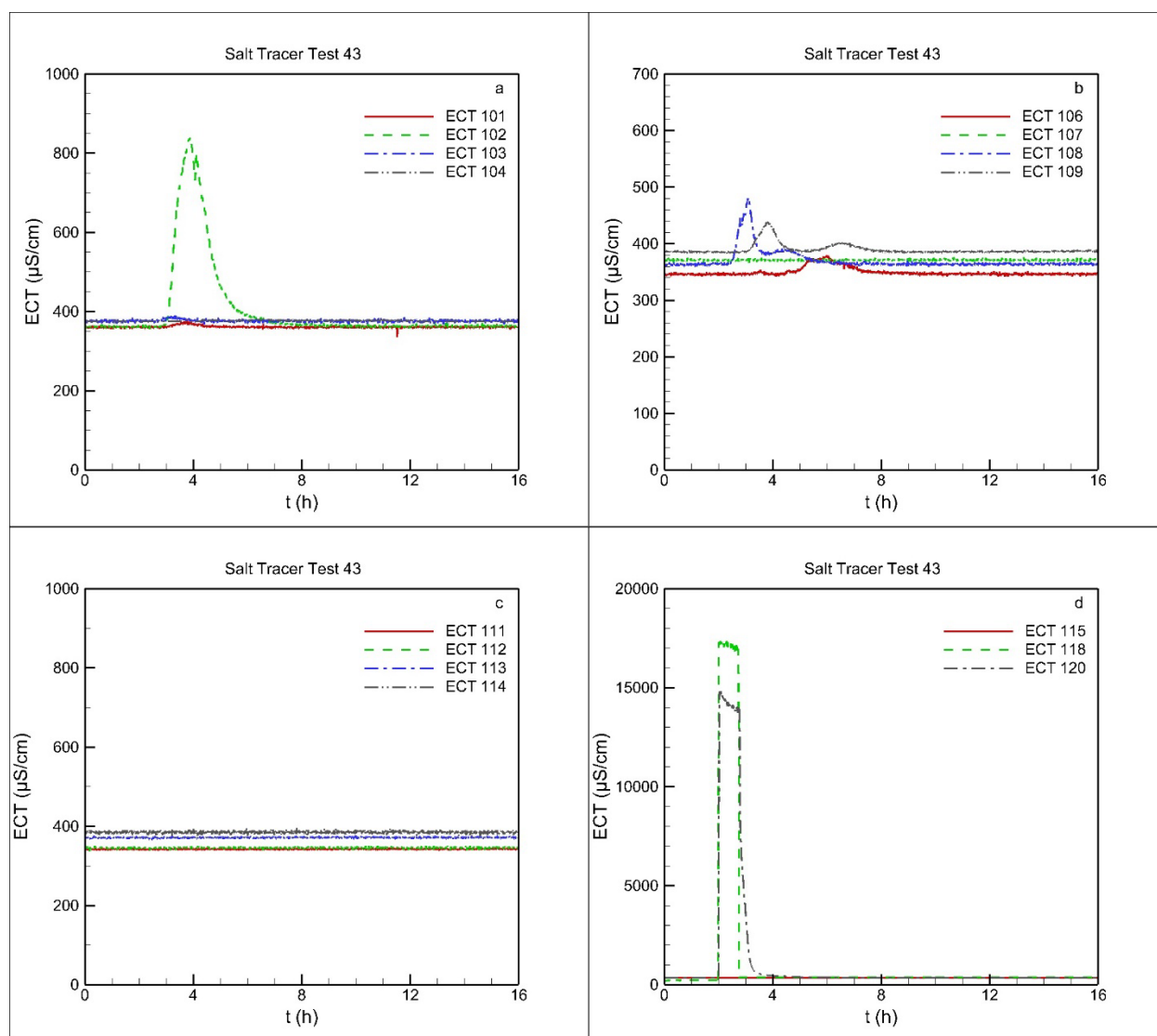
Slika 78: Protok u matrici i kanalu C1.

Analiza protoka (slika 78) pokazuje vrlo sličan obrazac ponašanja kao u Testu 42. Prije iniciranja injektiranja, stacionarni protok kroz matricu poroznog medija (M) održavan je na razini od približno $0.90 \text{ m}^3/\text{h}$, dok je protok kroz aktivni kanal C1 iznosio oko $0.73 \text{ m}^3/\text{h}$. Tijekom same faze injektiranja, koja je započela oko drugog sata monitoringa, zabilježen je očekivani porast protoka, s vršnom vrijednošću u matrici od oko $1.28 \text{ m}^3/\text{h}$ i u kanalu C1 od oko $1.35\text{-}1.40 \text{ m}^3/\text{h}$. Nakon završetka procesa injektiranja, protoci su se stabilizirali na razinama bliskim inicijalnim: protok u matrici na oko $0.90 \text{ m}^3/\text{h}$, a u kanalu C1 na oko $0.73 \text{ m}^3/\text{h}$. Ovi parametri su konzistentni s onima zabilježenim u Testu 42, indicirajući da promjena u količini i koncentraciji trasera nije značajno utjecala na hidrauličke uvjete protoka.



Slika 79: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.

Piezometarske razine (slika 79) također pokazuju ponašanje analogno Testu 42. Rubni uvjeti (PT 443 i PT 444) ostali su konstantni. Piezometri unutar domene (PT 402, PT 403, PT 420) zabilježili su kratkotrajne poraste kao odgovor na injektiranje, nakon čega su se vratili na stacionarne vrijednosti. Zanimljivo je primijetiti da je piezometri PT 402 i PT 420 u ovom testu pokazao izraženije i nestabilnije fluktuacije tijekom središnjeg dijela testa (između 6. i 13. sata), što nije bilo uočeno u Testu 42.



Slika 80: Prikaz električne vodljivosti na sensorima.

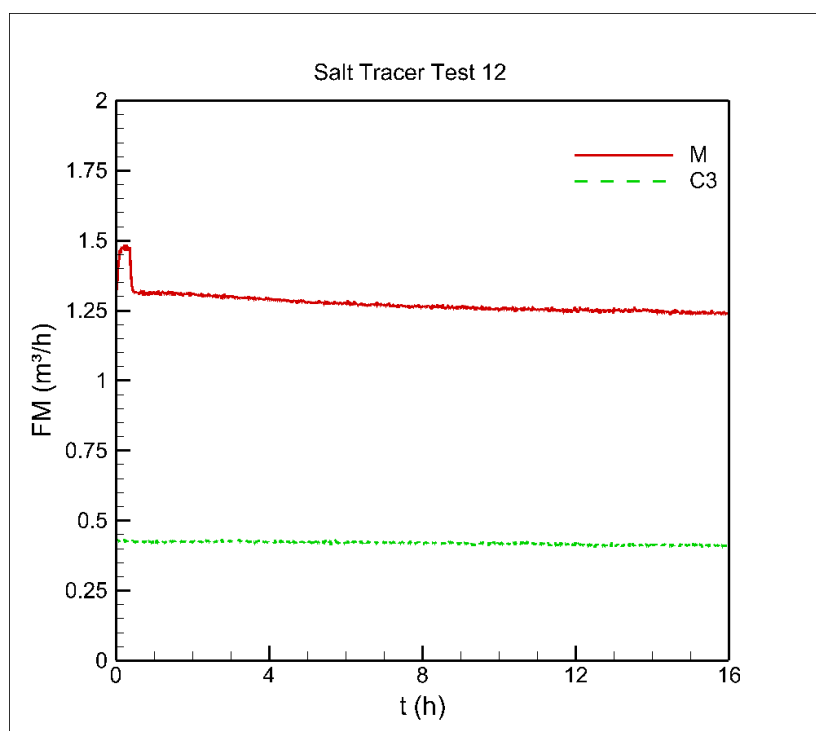
Slika 80d potvrđuje uspješno injektiranje trasera s inicijalnim EC od 17 300 i 14 800 $\mu\text{S/cm}$ na sensorima ECT 118 i ECT 120 (u kanalu), nakon čega se vrijednosti vraćaju na baznu razinu (oko 350 $\mu\text{S/cm}$). Senzor ECT 115 i u ovom testu pokazuje samo baznu vodljivost. Najznačajnija razlika uočava se na slici 80a i slici 80b. Za razliku od Testa 42 gdje niti jedan senzor unutar domene nije zabilježio prolazak trasera, u Testu 43 nekoliko senzora pokazuje jasan odziv. Detekcija traserskog signala isključivo na nizvodno pozicioniranim sensorima ukazuje na brzi, kanalom kontrolirani transport, s minimalnom interakcijom s matricom u uzvodnom dijelu. Ovo opažanje sugerira da se efektivno curenje trasera iz kanala u matricu, inducirano lokalnim porastom tlaka uslijed djelomičnog unutar kanala, dominantno odvija u nizvodnijim sekcijama ispitivane domene iako je kanal perforiran cijelom dužinom. Za razliku od prethodnog testa gdje nije bilo detekcije, u Testu 43 nekoliko senzora jasno je registriralo prolazak slanog trasera. Na

slici 80a, senzori ECT 102 i, u manjoj mjeri, ECT 103 pokazuju izražen proboj traserskog signala. Slično tome, na slici 80b, senzori ECT 107, ECT 108 i ECT 109 također bilježe detektabilne, iako vremenski razvučenije i kompleksnije, signale prolaska trasera. Ostali senzori prikazani na ovim slikama (ECT 101, ECT 104 i ECT 106) nisu zabilježili signifikantan odziv. Na slici 80d, senzori ECT 111, ECT 112, ECT 113 i ECT 114, slično kao u Testu 42, ne pokazuju nikakav porast EC iznad baznih vrijednosti, ostajući stabilni tijekom cijelog testa.

Zaključno, povećanje ukupne mase i volumena injektiranog trasera u Testu 43, unatoč nižoj početnoj koncentraciji, rezultiralo je signifikantnijim signalom na dijelu senzora unutar domene (prvenstveno ECT 102, 103, 107, 108, 109). Ovo sugerira da je veća količina trasera bila dovoljna da prevlada efekte razrjeđenja i disperzije u mjeri koja omogućuje detekciju na ovim lokacijama, za razliku od Testa 42 gdje je manja ukupna količina trasera bila potpuno reducirana prije dolaska do senzora.

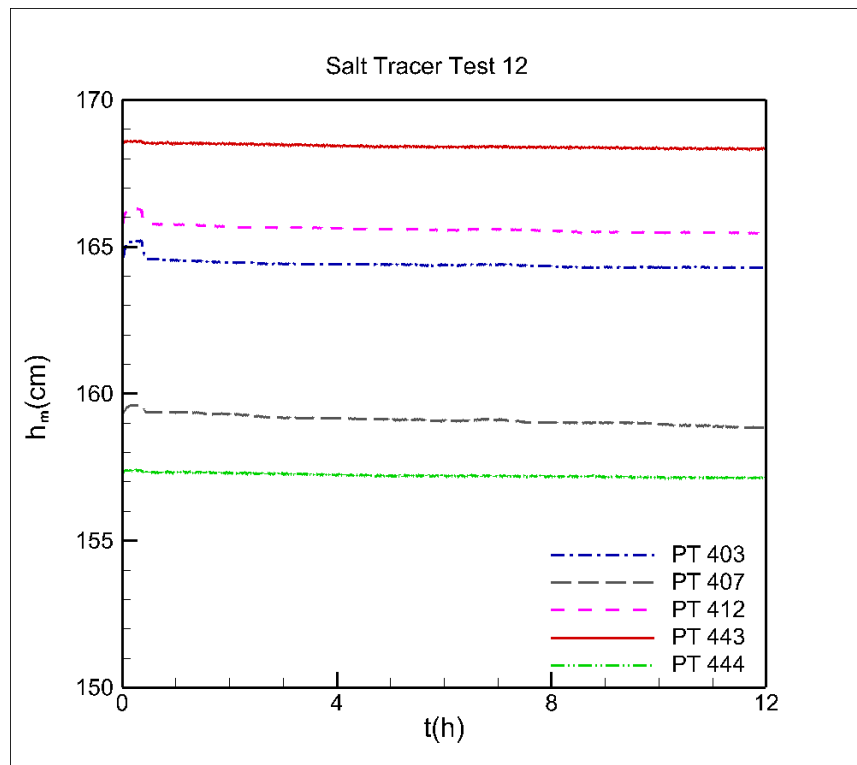
3.17 TRASER TEST 12

Injektiranje slanog traseru započelo je u 13:43 h i trajalo je 21 minutu, završivši u 14:04 h. Ukupno vrijeme praćenja testa iznosilo je 16 sati ($t = 16$ h). Otopina je pripremljena otapanjem približno 3 kg soli u 200 litara vode, s izmjerenom početnom električnom vodljivošću od 30 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (slika 83d). Unos traseru u sustav izvršen je površinskim injektiranjem pomoću protočne pumpe malog kapaciteta, pri čemu je tijekom cijelog ispitivanja kanal C3 bio otvoren.

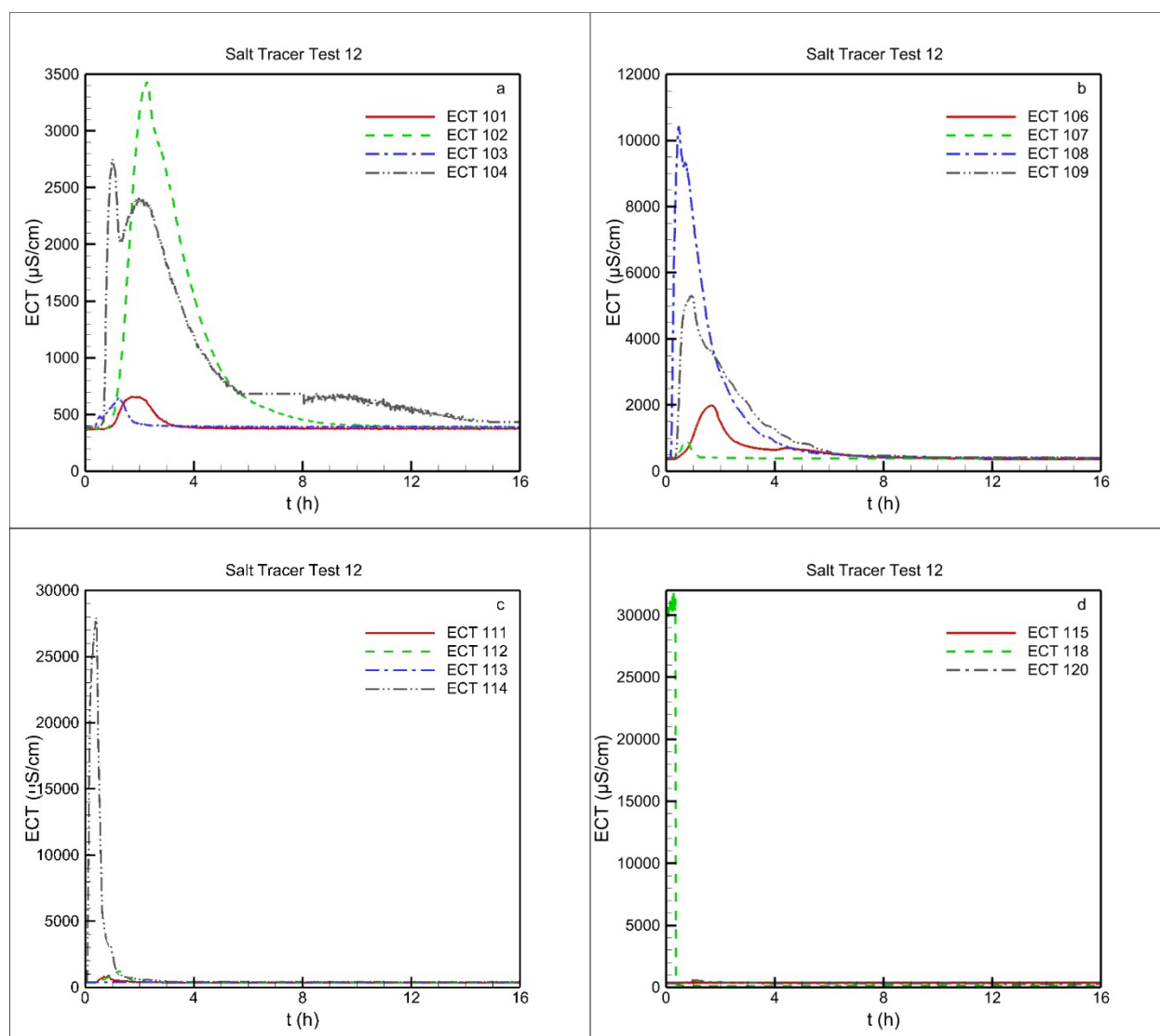


Slika 81: Protok u matrici i kanalu C3.

Prije početka mjerenja uspostavljen je stacionarni protok u matrici (M) od 1.30 m³/h i protok u kanalu C3 od 0.43 m³/h (slika 81). Grafikon protoka pokazuje da je tijekom utiskivanja traseru površinskim injektiranjem u matrici protok porastao na 1.49 m³/h. Protok u kanalu C3 je kroz cijelo vrijeme promatranja ostao isti. Nakon završetka utiskivanja, protok u matrici se postupno vratio na vrijednost blisku početnoj.



Slika 82: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.



Slika 83: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

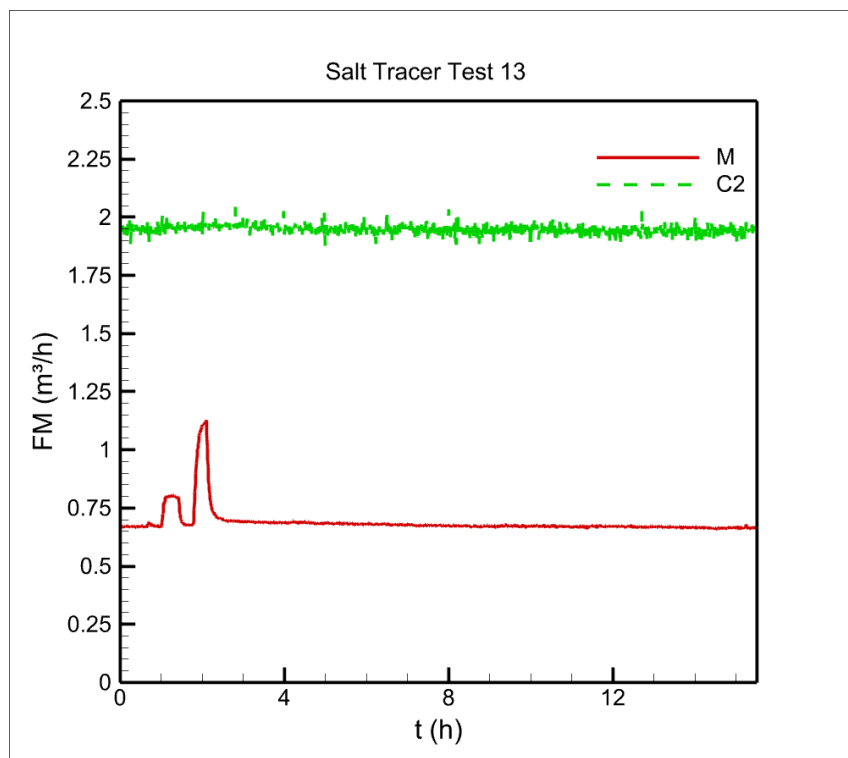
Na slici 83d senzor ECT 118 bilježi utisnutu koncentraciju slanog fluida s vršnom vrijednošću početne koncentraciji trasera, u trenutku utiskivanja od 30 000 $\mu\text{S/cm}$. Primijetimo ponašanje senzora ECT 115 i ECT 120 (u kanalu C1). ECT 115 pokazuje konstantno nisku vrijednosti električne vodljivosti tijekom cijelog testa. ECT 120 pokazuje odziv u iznosu oko 800 $\mu\text{S/cm}$. Slika 83c prikazuje odzive senzora ECT 111, ECT 112, ECT 113 i ECT 114. Senzor ECT 114 pokazuje jasan i jak odziv, s vršnom koncentracijom oko 10 000 $\mu\text{S/cm}$ te brzim porastom i malo sporijim opadanjem. Ostali senzori u ovoj grupi (ECT 111, ECT 112, ECT 113) pokazuju vrlo niske i blage promjene koncentracije u odnosu na ECT 114, sugerirajući da glavni tok trasera zaobilazi ove piezometre ili je znatno disperziran prije nego što dopiye do njih. Na slici 83b prikazana je grupa nizvodnih senzora (ECT 106, ECT 107, ECT 108, ECT 109). Senzor ECT 108 bilježi najvišu vršnu koncentraciju u ovoj grupi, oko 700 $\mu\text{S/cm}$, s relativno brzim porastom.

Senzor ECT 109 pokazuje nešto nižu vršnu koncentraciju i izraženiju disperziju s primjetnim "repom". Senzori ECT 106 i ECT 107 bilježe niže vršne koncentracije i šire prolazne krivulje. Na slici 83a prikazani su odzivi najudaljenijih senzora (ECT 101, ECT 102, ECT 103, ECT 104). Senzor ECT 102 bilježi najvišu vršnu koncentraciju u ovoj grupi, oko $3500 \mu\text{S}/\text{cm}$, s jasnim, ali jako razvučenim odzivom. Ostali senzori (ECT 101, ECT 103, ECT 104) pokazuju niske koncentracije.

U zaključku, ovaj traser test, s površinskim injektiranjem i otvorenim kanalom C3, pokazao je jasan transport trasera kroz matricu po već sada, pravilima, i očekivanjima koje smo do imali.

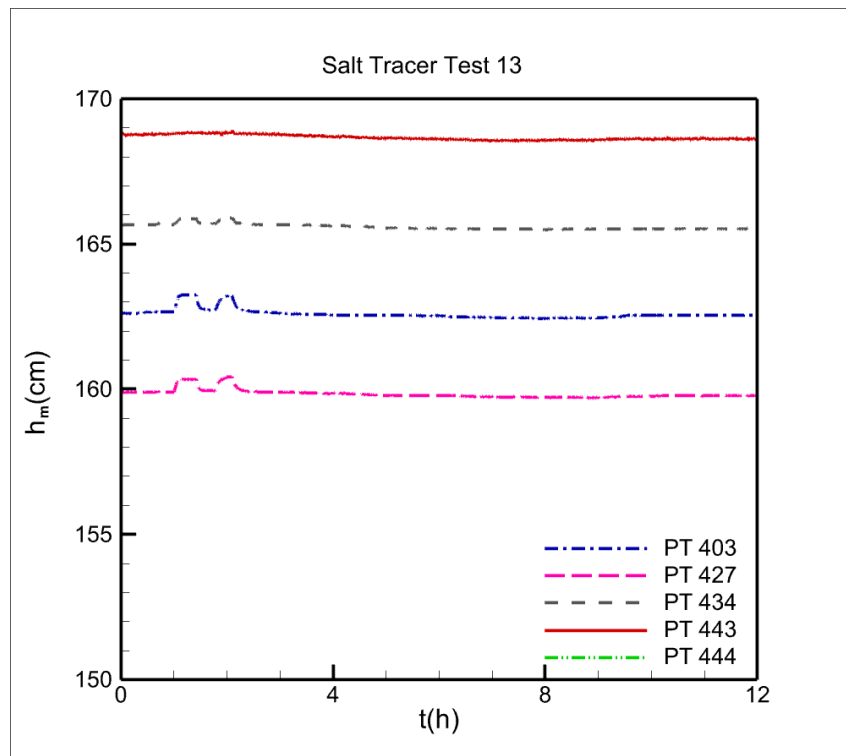
3.18 TRASER TEST 13

Početak utiskivanja slanog trasera je u 13:40 h, a završetak u 14:05 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16\text{h}$. Slani traser se unosi s malom protočnom pumpom sistemom prskalica za površinsko utiskivanje sa mješavinom od cca 3.5 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $29\,500 \mu\text{S}/\text{cm}$ kao što se može vidjeti na slici 86 (Slika 86d). Dodatno, puštena je kiša-oborina sa 25 prskalica raspoređenih na rasteru $0.85 \times 0.85 \text{ m}$ u vremenu od 14:25 h do 14:45 h, intenzitetom protoka $2\text{l}/\text{min}/\text{m}^2$. Aktivan je kanal C2, te ovaj test možemo usporediti sa testom 23. Svi ulazni parametri su isti, razlika je jedino u početnoj koncentraciji, koja je u ovom testu veća za otprilike trostruko.

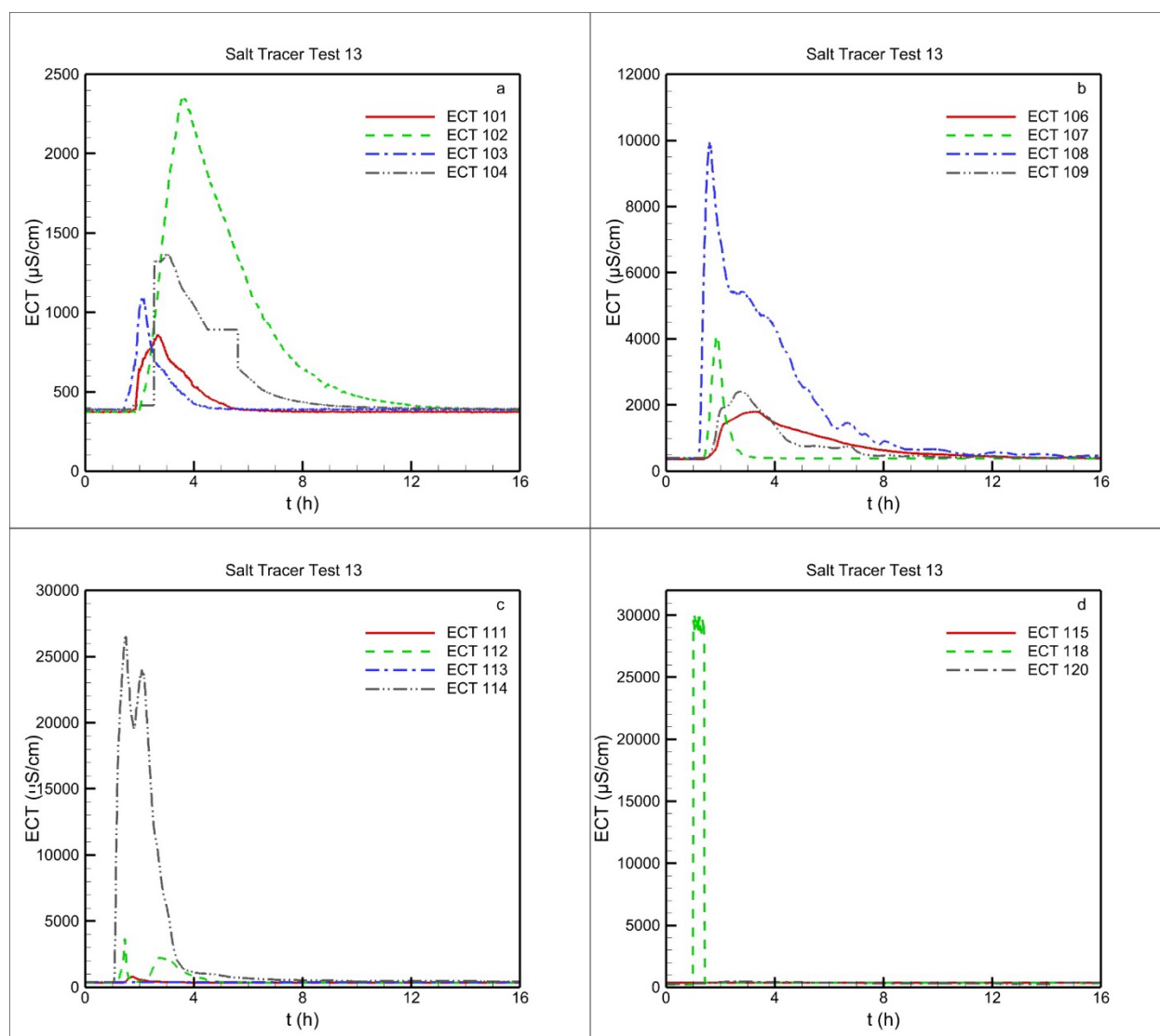


Slika 84: Protok u matrici i kanalu C2.

Prije početka mjerenja uspostavljen je stacionarni protok u matrici (M) od $0.67 \text{ m}^3/\text{h}$ i protok u kanalu C2 od $1.90 \text{ m}^3/\text{h}$ (slika 84). Grafikon protoka pokazuje da je tijekom utiskivanja trasera površinskim injektiranjem u matrici protok porastao na $0.80 \text{ m}^3/\text{h}$, a za vrijeme oborine porastao je do maksimalnih $1.14 \text{ m}^3/\text{h}$. Protok u kanalu C2 je kroz cijelo vrijeme promatranja ostao isti. Nakon završetka utiskivanja, protok u matrici se postupno vratio na vrijednost blisku početnoj. U predmetnom ispitivanju, povećanje protoka kroz matricu uslijed oborine bilo je trostruko veće od prirasta protoka zabilježenog tijekom faze utiskivanja u odnosu na početno stanje. U ispitivanju 23, protoci kroz matricu tijekom oborine i utiskivanja dosegli su usporedive maksimalne vrijednosti.



Slika 85: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.



Slika 86: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

U ovom testu na slici 86d kao i u testu 23 ECT 115 nema zabilježen odziv, ECT 120 ponovno ima vrijednost od oko 500 μS/cm i trajanje od nekoliko sati, a ECT 118 je očekivana početna koncentracija s obzirom na veću količinu soli u otopini za utiskivanje.

U drugoj grupi senzora na slici 86c se promjene u distribuciji toka najdramatičnije očituju. U testu 13, senzor ECT 114 bilježi dominantan vrh od 26 500 μS/cm i drugi malo niži vrh, dok je u testu 23 imao samo jedan vrh na 10 000 μS/cm. U ovom testu ECT 112 također ima dva moda, prvi je nagao i oštar (kao i u testu 23), a drugi je log-normalne distribucije (u testu 23 ga nema). Ostala dva senzora iz grupe više-manje jednako se ponašaju kao i na usporednom testu. Preraspodjela tokova nastavlja se i u sljedećoj nizvodnoj grupi (slika 86b). U ovom testu aktivirao se ECT 107 s vršnom vrijednosti od 4000 μS/cm, dok u usporednom nije bio aktivan.

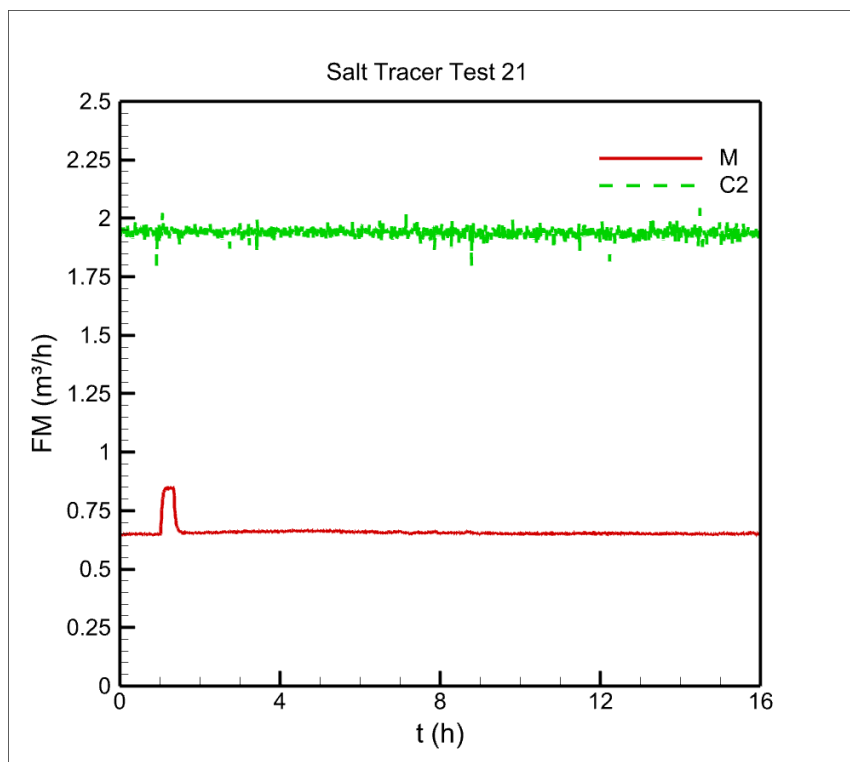
Može se vidjeti da su ECT 106 i 109 zabilježili niže vrijednosti ali slične oblike, pa se daje naslutiti da je fluks uslijed veće početne količine trasera pronašao novi tok u području ECT 107, a smanjio koncentraciju trasera koja je prošla pokraj ECT 106 i 109 ECT 108 ponovno ima najveći odziv ($10\,000\ \mu\text{S}/\text{cm}$) i tako reći jednak oblik.

Na slici 86a prikazana je grupa najnižvodnijih senzora koja pokazuje najveću stabilnost, što implicira da se na većoj udaljenosti od izvora tokovi počinju homogenizirati. Senzor ECT 102 u oba testa zadržava ulogu dominantnog područja toka s karakterističnim oštrim vrhom i dugim recesijskim krakom, bilježeći blago povišenje vršne vrijednosti u testu 13 ($2400\ \mu\text{S}/\text{cm}$) u odnosu na test 23 ($2100\ \mu\text{S}/\text{cm}$). Na ostalim senzorima u grupi, događa se također pad iznosa istog reda veličine. Na krivulji ECT 104 imali smo jedan „izboj“ koji je bio gotovo pravokutan u oba usporedna testa.

Test 13 jasno pokazuje da povećanje ulazne koncentracije trasera u heterogenom mediju ne dovodi u svakom mikro području domene do linearnog skaliranja koncentracije (osim mjestimično). Umjesto toga, sustav pokazuje nelinearno ponašanje koje se manifestira kao aktivna preraspodjela tokova.

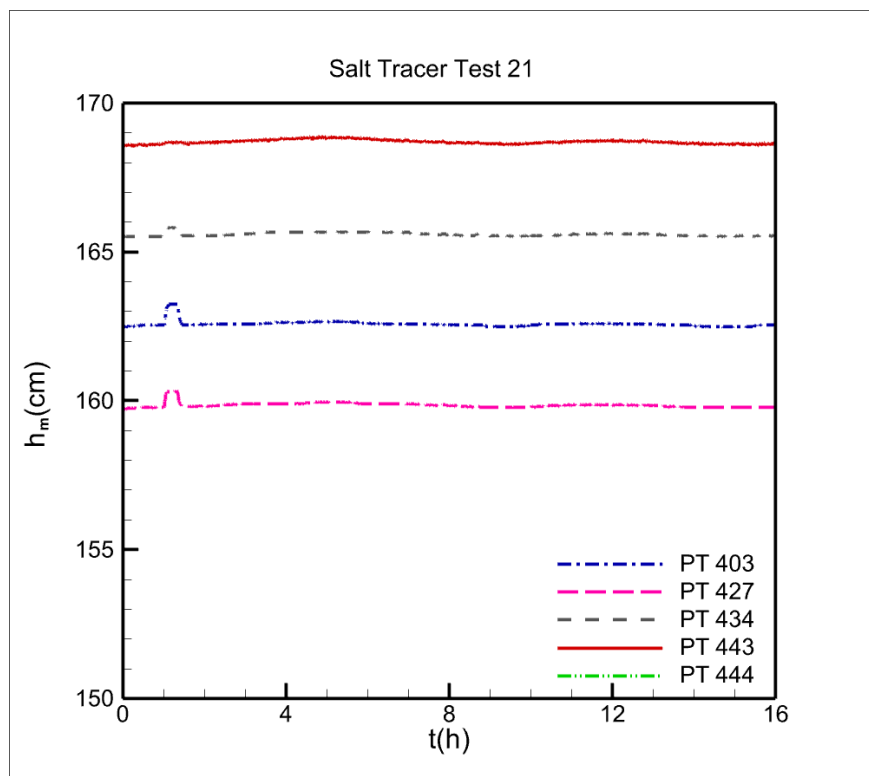
3.19 TRASER TEST 21

Početak utiskivanja slanog trasera je u 10:32 h, a završetak u 10:52 h. Ukupno vrijeme promatranja testa je $t = 16\text{h}$. Slani traser se unosi s malom protočnom pumpom sistemom prskalica za površinsko utiskivanje sa mješavinom od cca 1.5 kg soli na 200 l obične vode, a izmjerena početna električna vodljivost je $13\,820\ \mu\text{S}/\text{cm}$ kao što se može vidjeti na slici 89 (Slika 89d). Ovaj traser test istovjetan je traser testu 24 sa jednom bitnom razlikom, umjesto kanala C1 aktivan je kanal C2, tako da ih možemo uspoređivati.

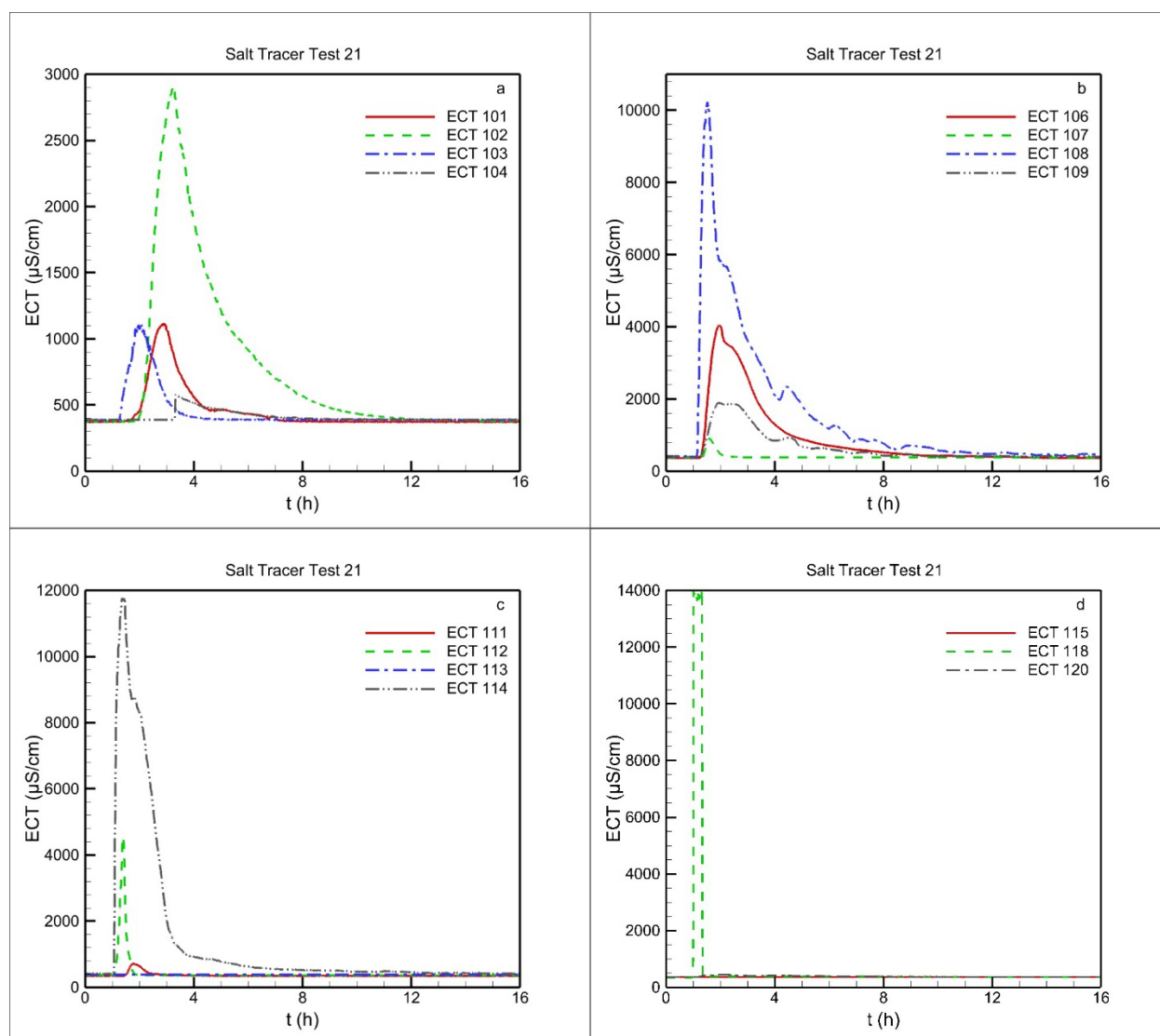


Slika 87: Protok u matrici i kanalu C2.

Prije početka mjerenja uspostavljen je stacionarni protok u matrici (M) od $0.65 \text{ m}^3/\text{h}$ i protok u kanalu C2 od $1.90 \text{ m}^3/\text{h}$ (slika 87). Grafikon protoka pokazuje da je tijekom utiskivanja trasera u matrici protok porastao na $0.90 \text{ m}^3/\text{h}$. Protok u kanalu C2 je kroz cijelo vrijeme promatranja ostao isti. Nakon završetka utiskivanja, protok u matrici se postupno vratio na vrijednost blisku početnoj. Komparacijski analizirano sa testom 24, možemo primjetiti da je aktivnošću kanala C2 naspram C1 ($0.75 \text{ m}^3/\text{h}$), protok u kanalu uvećan za $1.15 \text{ m}^3/\text{h}$. Samim povećanjem protoka u kanalu, protok kroz matricu je logično smanjen u ovom slučaju za $0.15 \text{ m}^3/\text{h}$. Potvrđen je inverzni odnos između toka kroz kanal i matricu.



Slika 88: Prikaz piezometarskih visina u odabranim piezometrima.



Slika 89: Prikaz električne vodljivosti na senzorima.

Slika 89d prikazuje početnu koncentraciju utisnute slane otopine na senzoru ECT 118 od 14 000 $\mu\text{S/cm}$. Senzor u kanalu C2 (ECT 120) ima odziv od oko 500 $\mu\text{S/cm}$, a senzor ECT 115 gotovo da nema odziva. Sve je istovjetno traser testu 24. Dalje na slici 89c imamo razliku u obliku ECT 114 (iznos je 11 800 $\mu\text{S/cm}$), koja ima promjenu tendencije opadanja sa oštrem na nešto blažom oko vrijednosti od 8 300 $\mu\text{S/cm}$. Također ECT 112 ima mnogo jači odziv u ovom testu od 4200 $\mu\text{S/cm}$ u odnosu na 1200 iz testa 24. ECT 111 ima log-normalni oblik i duplo manju vrijednost (1 000 $\mu\text{S/cm}$) nego na komparativnom testu. Na slici 89b nešto je jači odziv ECT 108 (10 100 $\mu\text{S/cm}$). Značajno je da u ovom testu ECT 107 nema odziva. Slično se odvijalo i na najnižvodnijoj grupi senzora (slika 89a), gdje su ponovno sve krivulje istog oblika i trajanja, a

samo 15-20 % većeg iznosa. Jedino ECT 104 ima znatno manji odziv od 550 $\mu\text{S}/\text{cm}$ koji je skoro pa duplo manji u odnosu na test 24.

4. ZAKLJUČAK

Ovaj rad sustavno je istražio transportne procese u složenom sustavu dualne poroznosti putem serije od 19 traserskih testova provedenih na 3D fizikalnom modelu krškog vodonosnika. Korištenjem slanih i toplih trasera u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, uspješno su zabilježene te ocijenjene razlike u hidrodinamičkom ponašanju i transportnim parametrima ovisno o dominaciji matričnog ili kanalskog toka. Analizom prikupljenih visokorezolucijskih podataka, uključujući protoke, piezometarske visine, oborine i prolazne krivulje koncentracije/temperature, dobiven je fundamentalan uvid u mehanizme izmjene vode i otopljene tvari između spore i brze komponente toka, što je ključno za razumijevanje ranjivosti krških sustava.

Značaj dobivenog eksperimentalnog skupa podataka primarno leži u njegovoj ulozi pokretača za razvoj sljedeće faze istraživanja: razvoj i kalibraciju sofisticiranog računalnog 3D modela. Ovaj numerički model bit će osmišljen tako da korisnik može interaktivno zadavati ulazne parametre (npr. hidrauličke gradijente, svojstva matrice, materijale, lokaciju unosa tvari, rubne uvjete, svojstva zagađenja). Na temelju fundamentalnih hidrodinamičkih zakona, prethodno validiranih na podacima iz fizikalnog modela, takav alat omogućit će pouzdano razmatranje i predviđanje scenarija tečenja i transporta bez potrebe za provođenjem novih, dugotrajnih fizikalnih eksperimenata.

Dugoročna vizija za takav validirani, budući numerički alat je njegova primjena na stvarne hidrogeološke sustave. Model će se moći skalirati i prilagoditi za analizu ključnih krških slivova u Hrvatskoj, poput onih rijeka Jadrta, Cetine, Krke i Neretve, ali i sličnih vodonosnika diljem svijeta. Kao moćan prediktivni alat za upravljanje i zaštitu vodnih resursa, njegova primarna svrha bila bi identifikacija putanja i vremena putovanja onečišćenja. U konačnici, spoznaja o tome kako se potencijalno onečišćenje kreće kroz podzemlje omogućila bi promptno i ciljano reagiranje u kriznim situacijama, npr. poput akcidentnih izlivanja na površini. Time bi se otvorila mogućnost

za planiranje i provedbu hitnih zaštitnih mjera ili inženjerskih intervencija, čime bi se spriječila kontaminacija izvorišta i sačuvali neprocjenjivi resursi pitke vode.

Promatrano u širem kontekstu, ovo istraživanje nadilazi okvire temeljne hidrogeološke znanosti i služi kao snažan pokretač za podizanje svijesti o nužnosti zaštite okoliša. U središtu te zaštite nalazi se pitka voda; ne samo kao najvrjedniji prirodni i strateški resurs, već i kao temelj života i preduvjet opstanka i razvoja ljudskih zajednica. Eksperimenti poput ovih, koji ljudskom oku, ali i dosadašnjim suvremenim alatima i tehnologijama nevidljive i kompleksne podzemne tokove čine vidljivima, mjerljivima i razumljivijima, predstavljaju ključan korak u transformaciji upravljanja vodnim resursima. Oni omogućuju prijelaz s reaktivnog pristupa, koji se često svodi na saniranje već nastalih šteta, na proaktivno planiranje i preventivno djelovanje. Ulaganje u ovakvo znanje stoga nije samo znanstveni, već i civilizacijski imperativ, jer osiguravanje čiste vode za buduće generacije predstavlja jednu od najvažnijih odgovornosti današnjice.

Acknowledgments

This research was funded by the Croatian Science Foundation (in Croatian: Hrvatska zaklada za znanost -HRZZ) through the scientific project "Multiphysics modelling of surface-subsurface water systems", grant number: IP-2020-02-2298.

This research is partially supported through project KK.01.1.1.02.0027, a project co-financed by the Croatian Government and the European Union through the European Regional Development Fund - the Competitiveness and Cohesion Operational Program.

Literatura

- [1] Andričević R. , Gotovac H. , Ljubenković I. : Geostatistika: umijeće prostorne analize, 2007.
- [2] Gotovac H. : Modeliranje toka i pronosa u podzemlju; materijali sa predavanja i vježbi, 2024.
- [3] Gotovac H. , Zelenika M. , Živković K. : Laboratory verification of karst flow and transport models, PPT prezentacija, CMWR conference, (Tucson, Arizona, USA), 2024.
- [4] Malenica, L., Gotovac, H., Kamber, G., Simunovic, S., Allu, S., & Divic, V. Groundwater flow modeling in karst aquifers: Coupling 3d matrix and 1d conduit flow via control volume isogeometric analysis—Experimental verification with a 3D physical model. *Water*, 10(12), 1787, 2018.