

## PROBLEMI DUGOTRAJNE EKSPLOATACIJE VODE IZ OGRANIČENOG VODONOSNIKA

KRISTIJAN GRABAR <sup>1</sup>, LUCIJA HERGOTIĆ <sup>1</sup>, JASMIN JUG <sup>2</sup>, STJEPAN STRELEC <sup>2</sup>

<sup>1</sup> SPP d.o.o., Koprivnička ulica 47, Varaždin, Hrvatska

<sup>2</sup> Geotehnički fakultet Varaždin, Hallerova Aleja 7, Varaždin, Hrvatska

### Sažetak

U radu su prikazani hidraulički odnosi unutar vodonosnika s ograničenom prihranom, a koji u početnoj fazi istraživanja za potrebe projekta nisu prepoznati, te su posljedično doveli do ograničenja u upotrebljivosti sustava. Prikazani primjer dodatno je istraživao nakon problema uočenih na strojarskom dijelu instalacija u sustavu dizalice topline. Utvrđeno je da kvaliteta vode korespondira sa crnom količinom i može se izravno povezati s dinamičkom razinom podzemne vode. Pogoršanje kvalitete vode manifestira se u pojavi pijeska u uzrocima, a daljnjim povećanjem crpne količine voda se zamućuje crvenkastim dispergiranim česticama. Kemijska analiza vode pokazuje vrlo visoke razine željeza i mangana. Ovo zapažanje trebalo je inicijalno upozoriti na stroga ograničenja u dugotrajnom zahvaćanju vode iz ovog vodonosnika. Dubina vodonosnog sloja na dva crpna zdenca je značajno različita, odnosno 3 i 6 m, što dodatno ukazuje na ograničenja u vodonosniku, tj. ograničenu prihranu sloja. Nakon provedenih detaljnih istraživanja utvrđen je novi režim eksploatacije sa smanjenom crpnom količinom koji je pušten u pogon i promatran kroz narednih mjesec i pol dana. Za smanjene crpne količine i zaustavljenu eksploataciju na crpnom zdencu s malom visinom vodonosnog sloja, postignute su pozitivne promjene u kvaliteti vode, a vidljive na smanjenom talogu filtra, ali i kemijskom sastavu vode. Zaključno, sa smanjenjem crpne količine, dane su i preporuke za preinake na dizalici topline potrebne za osiguranje dugotrajnog rada sustava. Izmjene se odnose na sustav filtracije, dezinfekcije i ugradnje novog izmjenjivača topline prilagođenog za rad sa zemnom vodom.

### Ključne riječi

Dizalice topline, crpljenje podzemne vode, intenzivno zapunjavanje filtra, crvenkasta boja vode, visoke razine željeza u vodi, rastavljivi izmjenjivač topline.

## 1 Uvod

Na istražnoj lokaciji u eksploataciji su dva zdenca u paralelnom radu, međusobno udaljena 16 m, te jedan upojni zdenac. Voda iz zdenaca koristi se za sustav dizalice topline voda-voda. Sustav je zaustavljen zbog začepjenja filtra i izmjenjivača u primarnom krugu zemne vode. Svrha dopunskih istraživanja bilo je davanje ocjene o mogućnosti daljnje eksploatacije podzemne vode, revizije ukupno raspoloživih crpnih kapaciteta, te procjene kvalitete vode (Strelec et al. 2020). Dopunskim mjerenjima utvrđeno je da nije moguće postići stacionarno stanje konusa depresije u crpnom zdencu ni za najmanju crpnu količinu. Vodonosni sloj relativno je male hidrauličke vodljivosti,  $k = 5$  m/dan. Povrat dinamičke razine vode u vodonosniku pokazuje promjenjivi gradijent povratne krivulje s vremenom, a što ukazuje na promjenjive uvjete prihrane vodonosnog sloja, odnosno na poluotvoreni vodonosnik (Zlatko Polak 1995), ali i na ograničenja prihrane vodonosnika zbog blizine nepropusne granice (David Keith Todd 1959), (Glen M. Duffield 2007).

Sukladno provedenim detaljnim mjerenjima određene su prihvatljive granice kolebanja razine podzemne vode, odnosno ograničeno je dinamičko sniženje vode u crpnom zdencu. U probnom periodu crpna količina u cijelosti se zahvatila iz jednog zdenca. Redovito je praćena kvaliteta vode kroz sediment koji se nakuplja u filtru. Povišene razine željeza u vodi i boja taloga ukazuju na pojavu mikrobiološkog opterećenja. Dinamičke razine na kraju probnog perioda dodatno su se snizile, a utjecaj konusa proširio. Za vrijeme probnog rada iscrpljena količina odvođena je izvan sustava upoja, čime je dokazano da prihrana vodonosnog sloja ni sa smanjenim crpnim količinama nije dovoljna. Nakon ovog zaključka, povrat vode preusmjeren je u drugi eksploatacijski zdenac koji se u ovoj fazi nije koristio, pri čemu se razine polako podižu za količine dodatne prihrane ostvarene kroz povrat vode. Dio vode bilo je potrebno putem preljeva odvoditi izvan sustava vodonosnika jer upoj zdenca nije dovoljan. Pri takvom režimu eksploatacije značajnije osciliraju temperature crpne vode zbog "temperaturnog proboja" (Strelec et al. 2024). Iz tog razloga potrebna je izmjena pločastog filtra bolje prilagođen kvaliteti vode i temp. razlici. Filtraciju koloidnog замуćenja predloženo je provesti pješćanim filtrom, a dezinfekciju dozatorom natrijevog hipoklorida. Kao rezultat istraživanja usvojena je preporuka za odabir vrste i izvedbe izmjenjivača za buduće projekte.

## 2 Metode

Plan za dopunska istraživanja uključivao je pojedinačno testiranje svakog od eksploatacijskih zdenaca u trajanju od 1 dan, pri čemu je protokolom mjerenja praćena dinamička razina vode u oba zdenaca, ali i kvaliteta vode za svaki crpni korak sve do pojave замуćenja (Slika 1). Prilikom dodatnih testiranja crpne količine odvođene izvan sustava upoja, dodatnim cjevovodom izvan strojarnice u sustav javne odvodnje. Ispuštanje voda izvan sustava povrata u vodonosnik omogućilo je neovisno praćenje konusa sniženja podzemne vode, ali i vizualno praćenje kvalitete vode na izljevu.

Opažanja dinamičkih razina podzemne vode provedena su hidrostatskim sondama s integriranim registratorima tipa Eltratec GSR120NT. Mjerene vrijednosti uključuju hidrostatsku razinu stupca vode, temperaturu i električnu vodljivost. Registrirani podaci iz sonde vremenski su kodirani, što omogućuje preklapanje mjernih krivulja iz opažачkih zdenaca. Protok vode mjereno je na dodanom turbinskom vodomjeru kod samog izljeva, gdje je opažana kvaliteta vode.

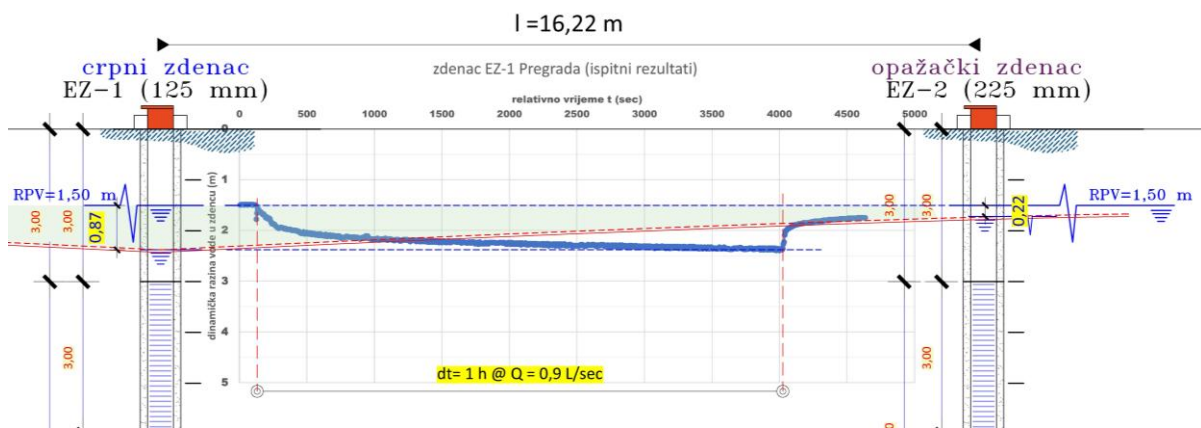
## 3 Rezultati

Promjena protoka izvodila se na zapornom ventilu nakon izmjenjivača. Protok je očitavan na vanjskom dodatnom vodomjeru, a dinamičke razine podzemne vode sondama u zdencima. U prvom koraku pokušala se odrediti crpna količina kod koje se može postići stacionarno stanje, bez daljnjeg širenja konusa sniženja. Stacionarno stanje nije postignuto ni za crpnu količinu od svega  $q=0,9$  l/s (Slika 2).



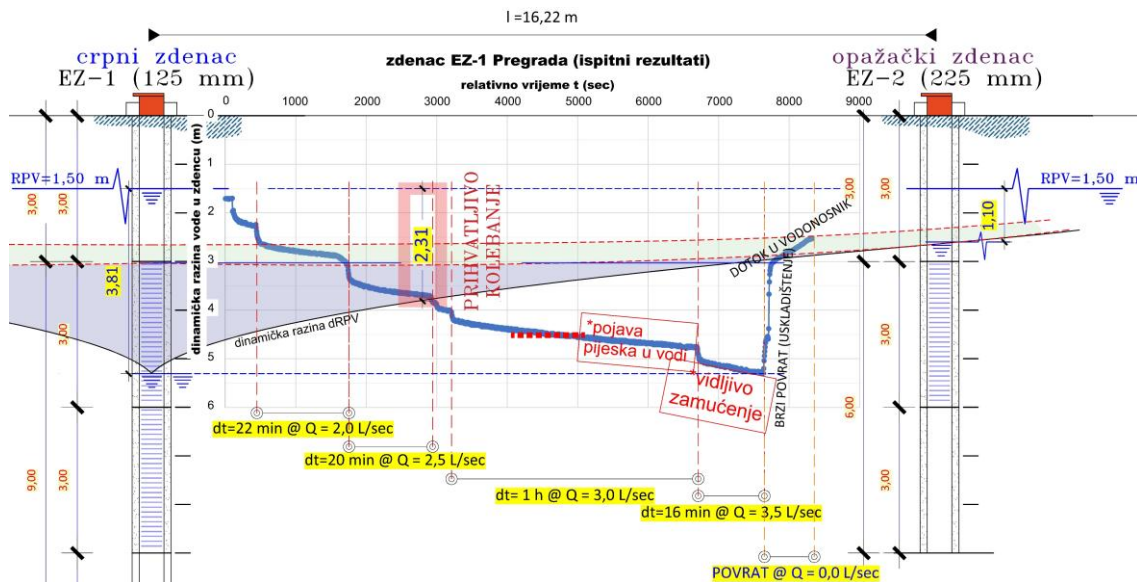
**Slika 1.** Otvoreni izljev vode iz primarnog kruga zemne vode radi praćenja kvalitete vode sukladno crpnom režimu. Na slici „A“ pri protoku od 0,9 l/s voda je visoke bistroće, na slici „B“ pri protoku od 2,5 l/s voda je smanjene bistroće, na slici „C“ kod protoka 3,5 l/s voda je замуćena.

Za objašnjenje mjerenih dinamičkih krivulja važna je činjenica da je vodonosni saturirani sloj različite visine na promatranim zdenacima. Kod EZ-1 visina sloja je 6 m, dok je na EZ-2 svega 3 m. Zdenac EZ-1 bušen je u sklopu prethodnih istražnih radova, te je dobivena informacija o visini saturiranog sloja kalkilirana u ukupnu izdašnost. Nakon bušenja dodatnog zdenca EZ-2 utvrdilo se da je saturirani sloj upola manji nego na EZ-1, i to na svega 16 m međusobne tlocrtno udaljenosti zdenaca. Ovdje se dakle radi o ograničenom vodonosniku kojem je minimalno s jedne strane utvrđeno isklinjavanje sloja, odnosno postojanje nepropusne barijere.



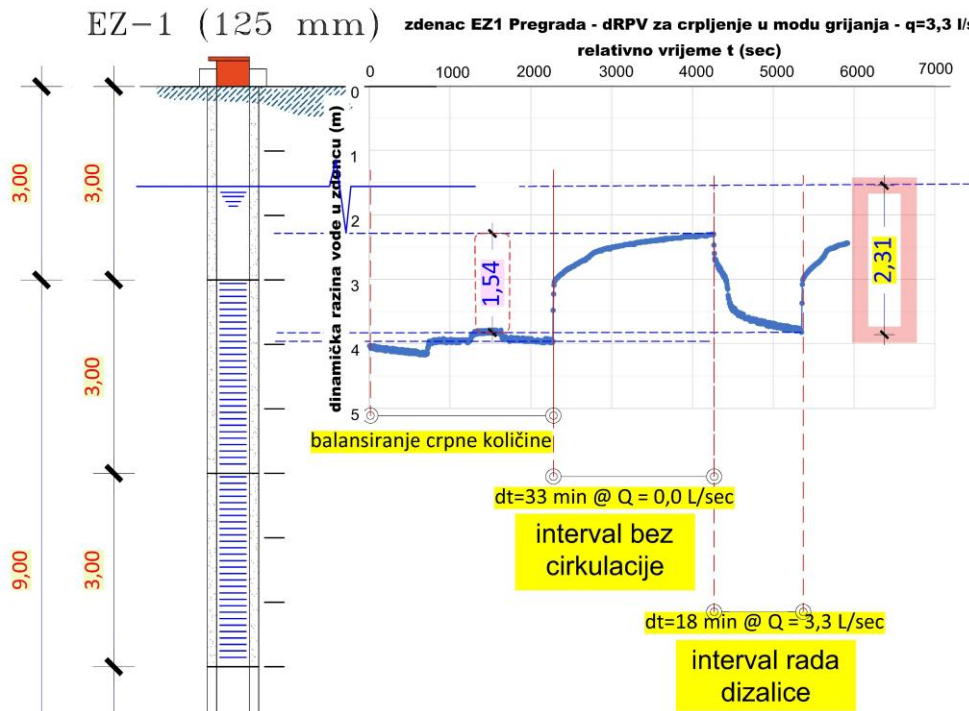
Slika 2. Krivulja sniženja razine vode u zdenacu EZ-1 prikazana plavom krivuljom, te projekcija konusa sniženja na crpnom i opažačkom zdenacu u završnom vremenu intervala mjerenja.

Daljnijim mjerenjima u koracima (tzv. step-test) opažani su nagibi krivulja sniženja, te je istovremeno praćena kvaliteta vode na otvorenom izljevu. Na krivuljama su zabilježeni trenuci pojave pijeska, kao i pojava zamućenja. Krivulje su bilježene u nekoliko ponovljenih mjerenja, te su dodatno opažani povrti na oba praćena zdenca (Slika 3).



Slika 3. Krivulja sniženja razine vode u zdenacu EZ-1 prikazana plavom krivuljom, te projekcija konusa sniženja na crpnom i opažačkom zdenacu u završnom vremenu intervala mjerenja.

Kako dizalica topline radi intervalno u smislu proizvodnja topline koju sprema u spremnik ogrjevne vode (engl. puffer), te se nakon toga zaustavlja do ponovnog punjenja spremnika, tako se i rad dubinskih crpki zaustavlja u stanju mirovanja sustava. Sukladno potrebi za toplinskom energijom u vrijeme istraživanja (hladno vrijeme, temp. zraka cca. 4°C), radni režim sustava je cca. 30 min. period rada, te 18 min. period isključenja. U ovom smislu posebno je istraživana crpna količina kod koje se povrt dinamičke razine u vremenu mirovanja u potpunosti povrti na početnu razinu (Slika 4).



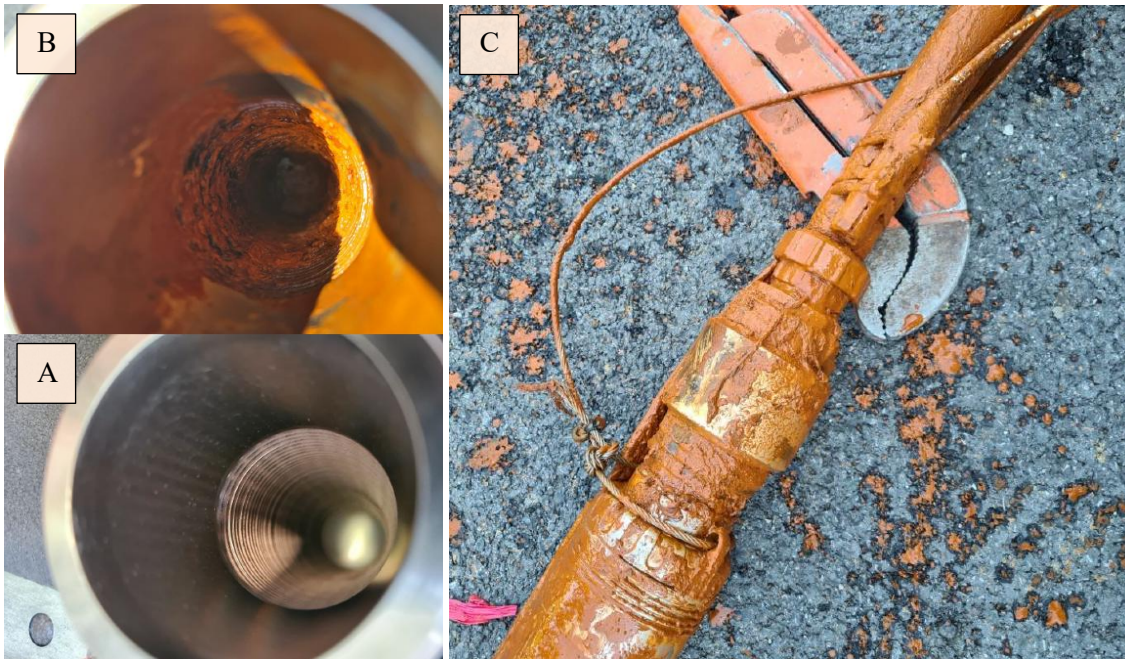
Slika 4. Krivulja sniženja (plavo) prilikom balansiranja crpne količine sa ciljem utvrđivanja kratkoročne ravnoteže prihrane u vodonosnik radi zadovoljenja intervalnog rada dizalice.

### 3.1 Kvaliteta vode nakon smanjenja crpnih količina

Zatečena kvaliteta podzemne vode iz eksploatacijskih zdenaca na ispitnoj lokaciji vrlo je loše kvalitete, o čemu svjedoče fotografije taloga na izmjenjivaču ali i dubinske pumpe (Slika 5).

Loša kemijska kvaliteta vode iz zdenaca utječe na:

- rad potopnih pumpi u zdenacima (korozijska, nakupljanje naslaga)
- cjevovode od zdenaca prema strojarnici (korozijska, nakupljanje naslaga)
- česta začepljenja mehaničkog filtera
- toplinski izmjenjivač topline (nakupljanje naslaga „eng. fouling“)



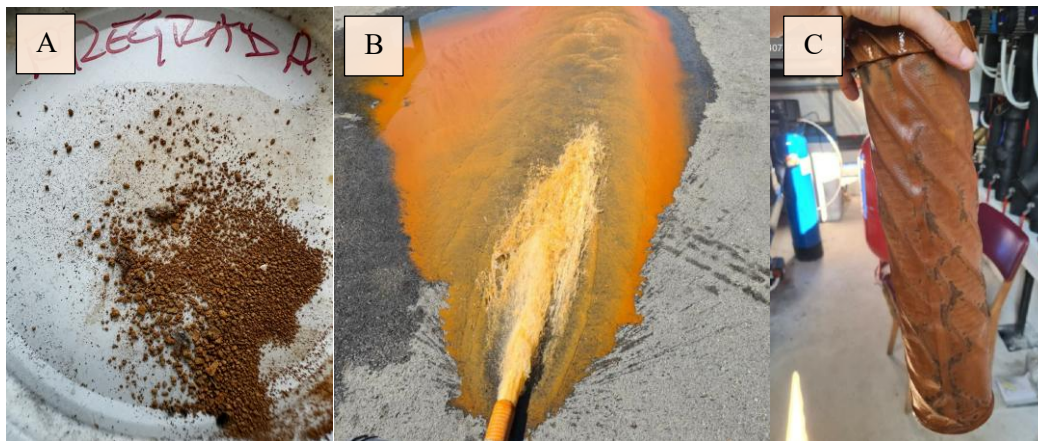
**Slika 5.** Fotografije stanja unutrašnjosti izmjenjivača prije začepljenja na slici „A“ i poslije začepljenja na slici „B“, te fotografija taloga na potopnoj dubinskoj pumpi nakon vađenja na slici „C“.

Stanje opreme sa Slike 5 bio je razlog za provedbu dodatnih istraživanja i utvrđivanje mogućih rješenja. Osnovna kemijska analiza vode pokazuje povećane količine željeza i mangana. U Tablici 1 su prikazana dva datuma ispitivanja. Stariji datum iz kolovoza 2024. odnosi se na uzorak vode prethodno smanjenju crpnih količina, dok se datum kolovoz 2025. odnosi na uzorak nakon uvedenog režima smanjene količine crpljenja i isključivanja zdenca EZ-2 iz eksploatacije. Iz mjerenja je jasno vidljivo da smanjeni crpni kapacitet, odnosno smanjena dubina konusa depresije rezultira smanjenim sadržajem željeza i mangana, kako je vidljivo u Tablici 1. Iz prikazanog bi se moglo zaključiti da se voda višeg sadržaja otopljenih metala nalazi bliže granici nepropusne podine.

**Tablica 1.** Kemijska analiza podzemne vode uzeta nakon filtra u primarnom krugu.

			Rezultat 21.08.2024.	Rezultat 06.08.2025.
pH vrijednost	HRN EN ISO 10523:2012	pH		7,6
Električna vodljivost	HRN EN 27888:2008	$\mu\text{Scm}^{-1}$ pri 20°	846	892
Isparni ostatak	Gravimetrija	mg/L	580	
Željezo (Fe)	HRN ISO 8288:1998	mg/L	10,4	1,288
Mangan (Mn)	HRN ISO 8288:1998	mg/L	0,608	0,380

Iz navedenog je jasno vidljiva važnost ispitivanja kemijskog sastava vode prije projektiranja sustava za korištenje podzemne vode. Važno je i shvatiti da se ne radi uvijek o sedimentu kao mehaničkom onečišćenju u vodi koji oštećuje sustav, čak su i veći problem bakterije koje se mogu razviti u uvjetima povišenih koncentracija određenih elemenata (Johnson Division 2007). Voda iz istraživanog plitkog vodonosnika ostavlja crvenkasti talog koji podsjeća na mulj. Kod ovakve pojave obično se smatra da se radi o mehaničkoj nečistoći i oksidacijskim procesima. Laboratorijska ispitivanja ukazuju na potpuno suprotno, „crveni mulj“ je vrsta anaerobnih bakterija, zvanih željezovite „fero“ bakterije koje žive u vodi bogatoj željezom (Mitrić 2020). Nisu štetne za ljude, što nije slučaj i za instalacije. Mogu se pojaviti i kao smeđe, crvene ali i bijele ljepljive, sluzave suspendirane tvari u vodi. Talože se na svim dijelovima izloženih stjenki instalacija. Zanimljivo je da se mogu razmnožavati i u aerobnim uvjetima.



**Slika 6.** Na slici „A“ je fotografija crvenog taloga nakon isušivanja (suhi ostatak taložine), na slici „B“ je vidljiva boja vode iz „air lifta“ prilikom čišćenja, te slika „C“ stanje fitarskog uloška nakon vađenja.

Generalno, za koncentracije željeza više od 0,3 mg/L mogu se pojaviti problemi vezani uz prisutnost željezovitih bakterija. Same povišene vrijednosti željeza u vodi ne moraju izravno značiti pojavu anaerobnih željezovitih bakterija, ali su značajan indikator vjerojatnosti pojave bakterija.

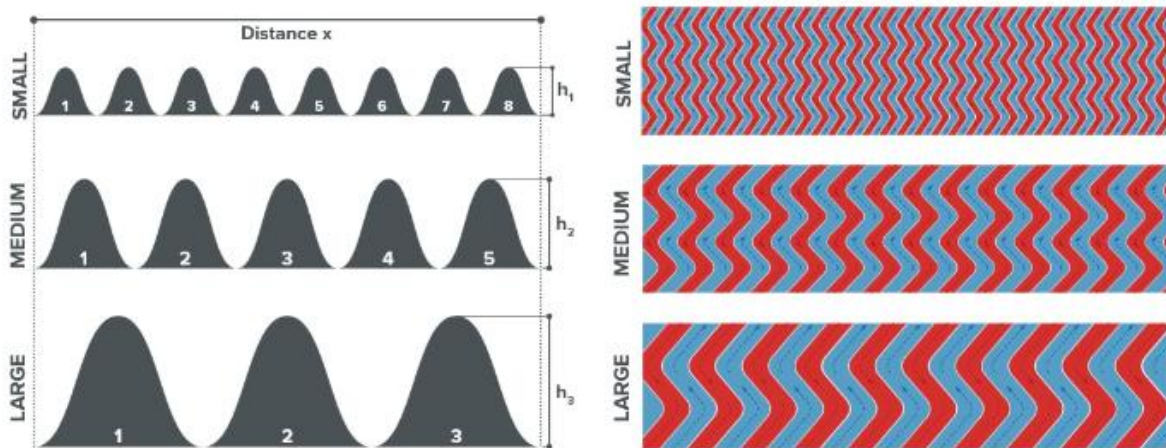
Pozitivno kod ove vrste bakterija je da reagiraju na dezinfekciju natrijevim hipokloridom, kao i ostale bakterije. Ovo je učinkovita mjera suzbijanja negativnih posljedica taloženja na cijevnom sustavu. Dakle, ugradnja dozatora u primarni krug zemne vode, predstavlja učinkovitu zaštitu sustava nizvodno čime se značajno produžuje interval čišćenja, održavanja sustava. Ugradnjom dozatora nisu zaštićene instalacije uzvodno u krugu, kao npr. dubinske pumpe. Sanacija zdenaca provodi se periodički, prema potrebi, postupkom hiperkloriranja. Kod ovih postupaka potrebno je pratiti slobodni klor na izlazu vode kako ne bi došlo do pogoršanja kvalitete vode koja se vraća u podzemlje.

### 3.2 Odabir toplinskog izmjenjivača

Posebnu pažnju treba posvetiti odabiru izmjenjivača u primarnom krugu zemne vode, ali i filtraciji kao zaštitnom elementu. Jedan od zaključaka ovog istraživanja je razumijevanje sastava podzemne vode koja je šira od strojarskog pogleda na toplinski kapacitet vode i učinkovitost izvedbe izmjenjivača. Primarni kriterij odabira izmjenjivača u krugu podzemne vode treba biti trajnost, te s time povezana mogućnost održavanja. U aluvijalnim šljunkovitim vodonosnicima podzemna voda gotovo uvijek sadrži čestice veličine pijeska. Količina sadržanog pijeska ne mora se činiti značajna gledajući na malom uzorku (npr. 3-5 g/m<sup>3</sup> vode), no za velike količine precrpljene vode kakve su prisutne u toplinskim sustavima, na godišnjoj razini može se iznimno raditi i do nekoliko stotina kilograma sedimenta. Općenito u prvoj godini korištenja, sediment je značajnije prisutan, dok se s vremenom njegov udio smanjuje. U tu svrhu ispred toplinskog izmjenjivača, kao zaštitni element, uvijek se ugrađuje filtar. „Finoću“ filtra i njegovu propusnost također je potrebno pažljivo odabrati. Filtri s izmjenjivim uložnim elementima kao primarni „hvatač“ sedimenta obično zahtijevaju često održavanje izmjenom ili ispiranjem uloška, što predstavlja opterećenje i obavezu izvođača koji s time stvara dodatne troškove, te nisu pogodni za ovakve sustave. Automatizirani filtri s funkcijom samočišćenja su prilično limitirani u smislu kapaciteta samočišćenja u vremenskom periodu. To je opet posebno važno u početnom vremenu rada jer često ostaju zaglavljivi kod inicijalnog pogona novog sustava, kada je količina sedimenta velika. Također je važno napomenuti tehničku karakteristiku samočistivih filtara, a to je da funkcija čišćenja radi samo pri protoku vode i dovoljno velikom tlaku. Stoga ih je potrebno konfigurirati na aktivnost kod rada pumpi, a ni u kojem slučaju na vremenski program.

Iz prakse se kao najbolje rješenje za sediment pijeska pokazalo rješenje hidrociklonskog odvajaa koji pokupi glavninu sedimenta grublje frakcije, te automatiziranog samočistivog filtra finije gradacije kao drugog stupnja, koji u tom slučaju stigne obavljati funkciju samočišćenja.

Začepljenje izmjenjivača najjednostavnije definiramo kao nakupljanje depozita koji na površinama izmjenjivača grade talog nalik površinskoj ljusci, a može se sastojati od suspendiranih četica sedimenta, kemijskog taloženja netopivih soli ili organskih naslaga algi i bakterija. Nataložena ljuska predstavlja toplinski izolator, čime se smanjuje učinak izmjenjivača i smanjuje protok vode (Matt Hale 2019). Shodno navedenom, postoje izvedbe pločastih izmjenjivača koji su prilagođeni za rad s fluidom opterećenim suspendiranim česticama. U industrijskoj primjeni takve izmjenjivače predstavljaju rastavljivi pločasti izmjenjivači. Još se nazivaju i pločasti izmjenjivači s brtvama. Rastavljivost im omogućava dugoročno održavanje, ali i modularnost te mogućnost proširenja. Osim rastavljivosti zbog održavanja, primarni odabir vrši se prema obliku i veličini korugacije, odnosno uzorka i veličine nabora kanala na pločama (Kelvion.com 2018). Uzorak kanala također pomaže smanjenju taloženja, (Slika 7).



**Slika 7.** Veličina otvora nabora vezana uz broj nabora po jedinici duljine ploče izmjenjivača izravno utječe na otpornost uzorka na taloženje sedimenta. Za krug podzemne vode pogodan je srednji „medium“, (Kelvion.com 2018).

Proizvođač „Kelvion“ u svoji preporukama za smanjenje taloženja preporuča horizontalni „H“ nabor oblika riblje kosti. Naime, isti proizvođač obrazlaže to činjenicom da se povećanjem turbulencije toka vode kroz nabore na ploči izmjenjivača smanjuje taloženje. Istovremeno je jasno da se u takvim uvjetima turbulentnog toka povećavaju otpori toku, čemu je posljedica povećani pad tlaka na izmjenjivaču. Veličina otvora djelomično kompenzira povećane otpore. Ova vrsta toplinskog izmjenjivača također može biti kompaktnih dimenzija pogodnih za smještaj u skućene strojarne. Kao referenca odabira kod proizvođača Kelvion, navedeno zadovoljava model KELVION NT (New Technology) CD (Compact Design), H (horizontalna riblja kost), M („medium“ veličina kanala).

Iz svega navedenog jasno je da odabir kompaktnih tvrdo lemljenih nerastavljivih izmjenjivača nije primjeren za upotrebu sa zemnom vodom kod koje kemizam i količina sedimenta varira u širokim granicama.

#### 4 Diskusija

Istraživanjem je određeno da se voda za rad sustava dizalice topline može zahvatiti u kapacitetu od  $q=3,30$  l/s. Mjera je potvrđena u probnom periodu rada sustava. Uvjet za dugotrajan rad je osigurati povrat iscrpljenih količina u vodonosnik sustavom upojnih zdenaca. Kako je upojnost vodonosnog sloja promjenjiva sukladno razinama podzemne vode koje su pod sezonskim utjecajem, ali i potrebama crpnih količina sustava dizalice, preljev viška vode koja ne može biti upojen i dalje treba predvidjeti izvan sustava podzemnog vodonosnika. Kvaliteta zahvaćene vode nakon smanjenih crpnih količina pokazuje značajno smanjenje udjela željeza u vodi, a sukladno tomu i sadržaj taložnog koloida, te se može filtrirati primjenom sustava pješčanog filtra i dezinficirati dozatorom natrijevog hipoklorida.

## 5 Zaključak

Rezultati mjerenja ukazuju da je za postizanje punog toplinskog kapaciteta ugrađene dizalice topline, pri optimiziranoj (smanjenoj) crpnoj količini iz zdenca, potrebno ugraditi novi izmjenjivač prilagođen kvaliteti podzemne vode i protoku. Samo parametar toplinskog učinka uređaja nije dovoljan kod projektiranja sustava dizalica topline voda-voda i odabira izmjenjivača u krugu zemne vode, što je konačni zaključak provedenih istraživanja, ali se isto može usvojiti i u obliku preporuke za projektiranje. Dakle, potrebno je odabrati robusnije izvedbe pločastih izmjenjivača rastavljive izvedbe koji su bitno bolje prilagođeni nekvalitetnoj podzemnoj vodi. Takvi izmjenjivači dostupni su na tržištu i posebno su dizajnirani za sustave podzemne vode koja je gotovo uvijek u određenoj mjeri opterećena suspendiranim česticama. Kod povećanih udjela željeza u vodi treba očekivati pojavu željezovitih bakterija, te sukladno kemijskoj analizi predvidjeti dezinfekciju dozatorom natrijevog hipoklorida. Također je uputno izbjegavati zahvaćanje vode bliže podini vodonosnog sloja. Iz prezentiranog mjerenja, voda pri „dnu“ vodonosnika sadrži povišene udjele otopljenih metala.

## Literatura

- David Keith Todd. 1959. *Groundwater Hydrology*. 1st ed. Berkeley, California: John Wiley & Sons, Inc.
- Glen M. Duffield. 2007. *AqTESOLV for windows, user guide*.
- Johnson Division. 2007. *Groundwater and wells*. 3rd ed. Sterrett, R. J. ed. Smyth Co Inc.
- Kelvion.com. 2018. [file:///C:/Users/Kristijan/Downloads/PF\\_PHE\\_GPHE\\_EN-1.pdf](file:///C:/Users/Kristijan/Downloads/PF_PHE_GPHE_EN-1.pdf).
- Matt Hale. 2019. <https://www.watertechonline.com/process-water/article/14071807/understanding-and-preventing-heat-exchanger-fouling>.
- Mitrić, M. 2020. Impact of groundwater quality on heat pump operation. *REHVA Journal* (04), pp. 72–79. Available at: <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/impact-of-groundwater-quality-on-heat-pump-operation> [Accessed: 15 February 2026].
- Strelec, S., Dodigović, F., Grabar, K. and Marinčić-Kovačev, B. 2020. The Influence of Aquifer Parameters on the Design of Extraction and Recharge Wells for the Heat Pump Systems. In: Prof.dr. Jesus Martinez-Fries ed. *The 3rd International Electronic Conference on Geosciences, IECG 2020*. SciForum. Available at: <https://iecg2020.sciforum.net/>.
- Strelec, S., Jug, J. and Grabar, K. 2024. *Geotehnička i geofizička terenska istraživanja*. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet.
- Zlatko Polak. 1995. *Hidrogeologija za građevinare*. Zagreb: Poslovna knjiga Zagreb, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Građevinski fakultet Sveučilišta u Osijeku