

# Модел миграције нитрата у епикарсту: лабораторијски експеримент

Бранислав Петровић



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

**[ДР РГФ]**

Модел миграције нитрата у епикарсту: лабораторијски експеримент | Бранислав Петровић | XVI Српски симпозијум о хидрогеологији, са међународним учешћем | 2022 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0006897>

UNIVERZITET U BEOGRADU  
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET  
DEPARTMAN ZA HIDROGEOLOGIJU

HG

XVI SRPSKI SIMPOZIJUM  
O HIDROGEOLOGIJI  
sa međunarodnim učešćem  
**ZBORNIK RADOVA**



ZLATIBOR  
28. septembar - 02. oktobar  
2022. godine



**XVI SRPSKI SIMPOZIJUM O HIDROGEOLOGIJI**  
sa međunarodnim učešćem  
**ZBORNİK RADOVA**

**IZDAVAČ:**

Univerzitet u Beogradu  
Rudarsko-geološki fakultet  
Đušina 7

**ZA IZDAVAČA:**

Prof. dr Biljana Abolmasov, dekan  
Rudarsko-geološki fakultet

**UREDNIK:**

Doc. dr Ana Vranješ

**TIRAŽ:**

100 primeraka

**ŠTAMPA:**

Štamparija Grafolik, Beograd

**GODINA IZDANJA: 2022.**

Na 12/19-oj. sednici Departmana za hidrogeologiju doneta je odluka o organizaciji XVI srpskog simpozijuma o hidrogeologiji sa međunarodnim učešćem, koja je utvrđena saglasnošću Nastavno-naučnog veća Rudarsko-geološkog fakulteta od 30.12.2019.

Naslovna strana: Sušičko vrelo, Zlatibor

CIP - Каталогизација у публикацији - Народна библиотека Србије, Београд

556(082)  
628.1(082)

СРПСКИ симпозијум о хидрогеологији са међународним учешћем (16 ; 2022 ; Златибор)  
Зборник радова / XVI Српски симпозијум о хидрогеологији са међународним  
учешћем, Златибор 28. септембар - 02. октобар 2022. године ; [уредник Ана  
Вранјеш]. - Београд : Универзитет, Рударско-геолошки факултет, 2022  
(Београд : Графолік). - [18], 514 стр. : илустр. ; 30 cm

Na врху насл. стр.: Departman за хидрогеологију. - Радови ćиr.и lat. -  
Тираж 100. - Стр. [5-6]: Уводна рећ / Dejan Milenić. - Abstracts. -  
Библиографија уз сваки рад.

ISBN 978-86-7352-380-4

а) Хидрогеологија - Зборници б) Снабдевање водом - Зборници

COBISS.SR-ID 74364937

## **ORGANIZACIONI ODBOR:**

### **Predsednik:**

*Doc. dr Ana Vranješ, dipl. inž.*

### **Članovi:**

*Prof. dr Petar Dokmanović, dipl. inž.*

*Doc. dr Ljiljana Vasić, dipl. inž.*

*Dr Tanja Petrović Pantić, dipl. inž.*

*Natalija Radosavljević, mast. inž.*

*Velizar Nikolić, dipl. inž.*

*Vukašin Vučević dipl.inž.*

*Andrej Pavlović, dipl. inž.*

*Dejan Drašković, dipl. inž.*

*Branko Ivanković, dipl. inž.*

*Nenad Toholj, dipl. inž.*

*Boban Jolović, dipl. inž.*

*Uroš Jurošević, dipl. inž.*

## **NAUČNI ODBOR:**

### **Predsednik:**

*Prof. dr Dejan Milenić, dipl. inž.*

### **Članovi:**

*Prof. dr Zoran Stevanović, dipl. inž.*

*Prof. dr Dušan Polomčić, dipl. inž.*

*Prof. dr Vesna Ristić Vakanjac, dipl. inž.*

*Prof. dr Igor Jemcov, dipl. inž.*

*Prof. dr Vladimir Živanović, dipl.inž.*

*Prof. dr Dragoljub Bajić, dipl. inž.*

*Doc. dr Jana Štrbački, dipl.inž*

*Doc. dr Saša Milanović, dipl. inž.*

*Prof. dr Veselin Dragišić, dipl. inž.*

*Prof. dr Milan Radulović, dipl. inž.*

*Prof. dr Zoran Nikić, dipl. inž*

*Doc. dr Nenad Marić, dipl. inž.*

*Prof. dr Petar Milanović, dipl. inž.*

## **PROGRAMSKO-UREĐIVAČKI ODBOR:**

### **Predsednik:**

*Prof. dr Dušan Polomčić, dipl. inž.*

### **Članovi:**

*Prof. dr Dejan Milenić, dipl. inž.*

*Prof. dr Nevenka Đerić, dipl. inž.*

*Doc. dr Ana Vranješ, dipl. inž.*

**ORGANIZATOR SIMPOZIJUMA:**

*UNIVERZITET U BEOGRADU*

*RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET*

*DEPARTMAN ZA HIDROGEOLOGIJU*

*u saradnji sa*

*DRUŠTVOM GEOLOŠKIH INŽENJERA I TEHNIČARA SRBIJE*

*SRPSKIM GEOLOŠKIM DRUŠTVOM*

*NACIONALNIM KOMITETOM IAH*

***POKROVITELJ:***

**REHAU d.o.o.**

***SPONZORI:***

Departman za hidrogeologiju, Rudarsko-geološki fakultet

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

BeoGeoAqua d.o.o.

Opština Čajetina

Turistička organizacija Opštine Brus

Hotel Zlatibor Mountain Resort&Spa

Knjaz Miloš

***DONATOR:***

Gold Gondola

Ibis-Inženjering

## МОДЕЛ МИГРАЦИЈЕ НИТРАТА У ЕПИКАРСТУ: ЛАБОРАТОРИЈСКИ ЕКСПЕРИМЕНТ MODEL OF MIGRATION OF NITRATE IN ЕPIKARST: A COLUMN LABORATORY EXPERIMENT

Бранислав Петровић<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Центар за хидрогеологију карста, Департман за хидрогеологију, Рударско-геолошки факултет, Универзитет у Београду, Ђушина 7, 11000 Београд. E-mail: [branislav.petrovic@rgf.bg.ac.rs](mailto:branislav.petrovic@rgf.bg.ac.rs)

**APSTRAKT:** Епикарст је део карстног изданског система који се налази у зони аерације и представља сложену област додира и мешања неконсолидованог материјала са површине терена, остатака карбонатних стена измењених корозивном водом, флоре и фауне и њихових остатака, који је делимично и повремено засићен подземном водом. Подручје истраживања примењених мултидисциплинарних истраживања био је карстни масив Суве планине (ЈИ Србија), односно подручје око мале пећине Печ, настале у епикарсту. Између осталих истраживања, опит трасирања (На-флуоресцеин) у пећини Печ помогао је у одређивању брзине епикарстног (потповршинског) тока, док је експеримент са „лакми“ контаминантом, на истој локацији, дефинисао брзину миграције загађујуће супстанце. Током експеримената у пећини Пећ прикупљени су подаци искоришћени за израду физичког модела епикарста у лабораторијским условима. Током експеримента у лабораторијским условима коришћен је контаминант: амонијум нитрат (вештачко ђубриво АН). Дијаграм специфичне електричне проводљивости показао је да различити модели епикарста (према саставу) различито реагују на контаминант. Експерименти у моделу епикарста показали су да је могуће симулирати протикање подземних вода кроз епикарст у лабораторијским условима, сличним онима у природним условима, на локалитету пећине Печ.

**Кључне речи:** епикарст, модел, нитрати, специфична електрична проводљивост

**ABSTRACT:** The epikarst is a part of the karst outcrop that is located within the unsaturated zone of karst aquifer and represents a complex point of contact and mixing of unconsolidated material from the terrain surface, remains of carbonate rocks altered by corrosive water, flora and fauna, and their remains, which is partially saturated with groundwater. The study area for the multidisciplinary research was the karst massif of Suva planina Mountain (SE Serbia), specifically area surrounding one small cave Peč, developed in the epikarst. Among other research, the Na-fluorescein dye tracing test at Peč cave determined the velocity of the epikarst (subsurface) flow, while the experiment with "light" contaminant, at the same location, defined the velocity of the contaminant migration. During the experiments at the Peč cave data were collected and used for the design of a physical model of epikarst in laboratory conditions. During the experiment in the laboratory conditions a contaminant: ammonium nitrate (AN), artificial nitrogen-based fertilizer was used. The diagram of specific electrical conductivity showed that models of epikarst (different composition) react differently to the contaminant. Experiments in the epikarst model showed that it is possible to simulate the flow of groundwater through the epikarst in laboratory conditions, like in natural one, at the Peč cave site.

**Key words:** epikarst, model, nitrate, electrical conductivity

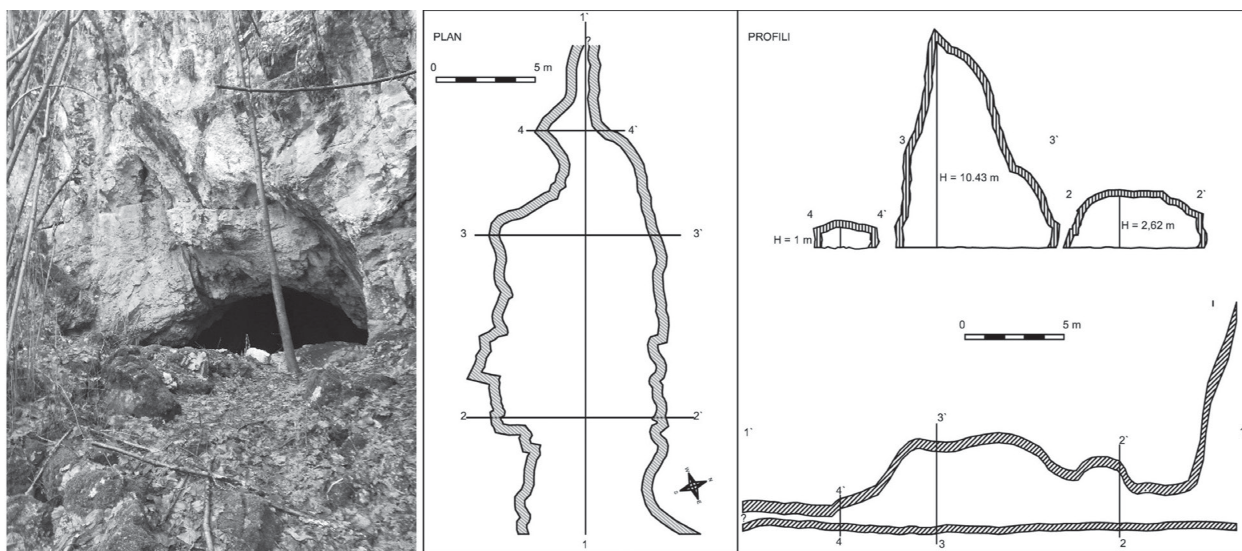
### УВОД

Епикарст представља највиши део стенске масе који је изложен карстификацији, тј. слој делимично измењене матичне стене који још увек није постао земљиште, а у којем је циркулација воде значајно већа и хомогенија (вертикално и хоризонтално) у односу на остатак карстификоване стенске масе (Klimchouk, 2000). Контраст у вертикалном профилу у погледу ефективне порозности и пропусности између зоне епикарста и остатка карбонатне стенске масе је од изузетне важности за хидрогеолошку функцију ове приповршинске зоне (Petrović, 2020), односно могућност инфилтрације површинских вода је значајно лакша у односу на отицај из епикарстне у „праву“ дубљу карстну издан. Дебљина зоне епикарста може варирати у широком дијапазону, од 10 cm до 30 m (Klimchouk, 2000), а најчешће се процењује на пар метара па до 10-15 метара (Klimchouk, 2004). У већини карстних области и карстне издани треба очекивати присуство епикарста, али оно није обавезно.

Овај део углавном несатурисане или делимично сатурисане издани се у многоме разликује од лебдећих издани које су нпр. формиране у интегрануларној средини. Разлика је у томе што се квантитативне особине лебдећих издани формираних у збијеној издани не разликују од особина основне издани, понекад вода има и исти квалитет, док вода из епикарстне издани има другачије одлике од подземне воде „праве“ карстне издани и у погледу начина филтрације воде и у погледу квалитета воде. Постојање ове „структуре“ у оквиру већ комплексне карстне издани, почело је да се намеће

истраживачима средином седамдесетих година прошлог века, када је уочено да биланс, између осталих осматраних параметара, указује на постојање слоја, изнад слободног нивоа карстне издани, у ком је могуће задржавање подземне воде и касније постепено испуштање те воде у карстну издан. У прорачуну су коришћени и подаци о утрешку инфилтрираних падавина од стране биљака, али и количине воде која директно испарава из земљишта (Mangin, 1973, 1975). Настанком епикарста у оквиру надизданске зоне карстног система у процесу карстификације и еволуцијом процеса уз развој свих пратећих елемената бавили су се: Klimchouk & Andrejchuk, 1996, Klimchouk et al, 1996; Hudson & Harrison, 1997; Price & Knill 2009; Price & de Freitas, 2009. Међутим, најзначајније закључке о еволуцији карстног процеса (самим тим и епикарста) донели су: Gunn (1985); Williams (1983, 1985), тј. Ford & Williams (2007); Klimchouk (1987, 1995, 2000, 2004). Главне карактеристике епикарста су 1) акумулирање подземне воде и 2) стварање услова за формирање концентрисаних токова у подини. Прва карактеристика повећава природну заштиту, док друга повећава рањивост подземних вода на загађење (Живановић, 2011). Приликом филтрације воде кроз епикарст долази до раздвајања тока на три компоненте (Klimchouk, 2004): 1. филтрација кроз вертикалне канале (окна или дренаже), 2. филтрација кроз зону аерације и 3. процуивање кроз надизданску зону. Хомогеност порозности, а самим тим и водопропусност горњег слоја епикарста, постепено опада са дубином, самим тим и дифузна инфилтрација, која је на „врху“ епикарста интензивна у потпуности опада на његовом „дну“. Филтрација воде се одиграва кроз пукотине које дубоко продиру кроз слој, некада и до карстне издани, тако да више од 50% инфилтриране воде доспева у издан у виду „концентрисаног“ тока, директно кроз те високо проводне канале – „дренове“ (Kivaly, 2003).

Шире истражно подручје обухватило је зону прихрањивања карстних врела Мокра, Дивљана, Горња Коритница и извора Бежиште, која се налазе у подножју источних падина Суве планине. Геолошка грађа Суве планине је комплексна и последица је вишеструких тектонских догађаја, који су довели до настанка антиклинале правца пружања северозапад-југоисток и каснијег издизања њеног северозападног дела (Петровић & Мариновић, 2021). Најзначајнији догађај који је довео до данашњег изгледа Суве планине и настанка тренутних хидрогеолошких услова је издизање антиклинале и еродовање карбонатних седимената горњојурске и доњокредне старости тј. откривања језгра антиклинале у С3 делу планине, изграђено од девонских и пермских еластичних седимената (Вујисић et al, 1971). Микролокација истраживања била је пећина Печ, на делу падине Суве планине изнад села Бежиште, око 2,3 km од села и истоименог карстног извора. Улазни отвор пећине Печ (Слика 1) налази се на висини од 885 m.n.m., пећински канал је једноставног тунеластог облика, дуг око 20 метара, улазни отвор пећине има изглед елипсе, широк је 7,5 m, висине 2-2,5 m, на највишем делу дворана је висока 10,43 m. Изнад самог улаза у пећину се до висине од 10,5 m пружа кречњачки одсек.



**Слика 1.** Улаз у пећину Печ (лево); Скица плана и профила пећине Печ (десно)  
**Figure 1.** Entrance of Peć cave (left); Sketch of the plan and profile of the cave Peć (right)

Прикупљени подаци на терену, током спровођења опита трасирања и експеримента са „лаким“ контаминантом послужили су за дизајн, израду и тарирање физичког модела епикарста за опите у лабораторијским условима. Приликом израде лабораторијског модела резултати теренских опита су послужили да се поставе односи између:

- дебљина слојева: земљишта, епикарста и стене до пећинске таванице,
- површина и запремина простора обухваћена експериментом,
- брзина кретања обележивача – контаминанта,
- концентрација и количина контаминанта на уласку и на изласку из система,
- количина воде која се процеђују кроз осматрану запремину у функцији времена.

За потребе лабораторијског експеримента набављене су транспарентне цеви Ø200/194 mm, од клирита (плексигласа), дужине 2 метра. Дно је херметички затворено и уграђене су славине за испуштање

воде из система и узимање узорака. Изнад цеви постављени су судови познате запремине, преко којих се вршило „прихрањивање“ система водом. Након формирања модела су спроведена 2 опита, један је приказао мешање вода у оквиру епикарста, док је други приказао како модел епикарста реагује на увођење контаминанта у виду вештачког азотног ђубрива.

## МЕТОДОЛОГИЈА ИСТРАЖИВАЊА

Употреба трасера у теренским хидрогеолошким истраживањима омогућава утврђивање правца и брзине циркулације изданских вода, повезаност водоносних хоризоната, повезаност површинских и подземних вода, и наравно зона прихрањивања и истицања (Milanović, 1979; Goldscheider et al. 2008; Geyer et al. 2008). Опитом трасирања је одређена брзина кретања „надизданског“ тока кроз повлату пећине Печ, помоћу инертног обележивача (Na-флуоресцеин). У овом случају трасер је примењен за потребе дефинисања брзине инфилтрације површинске воде и циркулације у надизданској зони и зони епикарста на локацији пећине Печ.

У циљу дефинисања способности епикарста да „преради“ одређене загађујуће супстанце на основу дужине боравка воде у подземљу, али и на основу састава ове надизданске зоне спроведен је *in situ* експеримент са „лаким“ контаминантом, ради дефинисања ретенционих својстава епикарста, функционисања процеса самопречишћавања у епикарсту, у условима различитих количина процедурне воде у пећини. „Лаки“ контаминант је по свом саставу стајско ђубриво растворено у води. Пошто је стајско ђубриво природног (органског) порекла, као контаминант је лаког састава, јер се у природним условима може разградити на нешкодљиве супстанце, али у кратком временском периоду одвијања опита било је показатељ миграције загађујућих супстанци. За потребе дефинисања хемијске контаминације праћена је концентрација азотне тријаде ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_2^-$  и  $\text{NO}_3^-$ ), мерени су основни физичко-хемијски параметри (специфична електрична проводљивост, pH, Eh, укупне растворене материје) помоћу теренског уређаја: Hanna Instruments - HI98194.

Подаци и резултати теренских опита су послужили да се дефинише састав 2 физичка модела епикарста (Слика 2):

- 1) Модел 1 представља случај када изнад карстификоване стенске масе постоји слој епикарста и земљишта: карстни канал и карстификовани кречњак су представљени металним туш цревом са славином и комадима кречњачке стене унутар транспарентне цеви; епикарст је представљен уз помоћ комада кречњака и земљишног материјала (у којем преовладава црвеница); на врху модела је земљишни слој.
- 2) Модел 2 представља случај епикарста и карстификованог кречњака без присутног земљишта на површини: карстни канал и карстификовани кречњак су симулирани металним туш цревом са славином и комадима кречњачке стене унутар цеви.

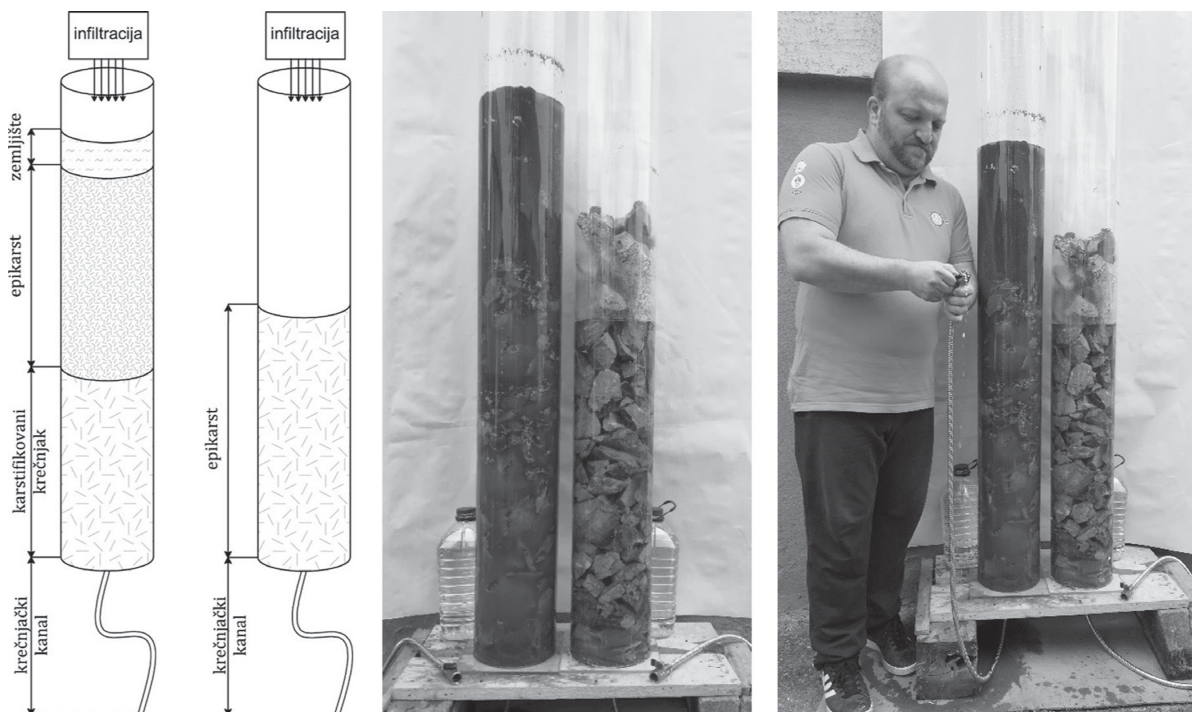
## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Након убацивања материјала (стена и земљишта донетог са терена Суве планине) у моделе је прво уведена дестилована вода ради засићења тла и успостављања филтрације кроз моделе испуштањем воде на славини (Слика 2.), а након тога је уведена и кишница (прикупљена на терену), која је надоместила воду истеклу из модела током успостављања филтрације.

Након успостављања интензитета процеђивања воде слично условима на терену, у модел 2 је преко „туш“ решетке уведена вода са карстног врела Бежиште. Циљ је био да се креирају природни услови који владају у епикарстној издани и да се провере услови дисперзије, два раствора различитих одлика, који постоје унутар физичког модела. Током опита, мерена је специфична електрична проводљивост, и концентрација нитрата. Уочено је да специфична електрична проводљивост у „епикарстној издани“ постепено расте и достиже еквилибријум, док је концентрација нитрата имала тренд опадања у таласима. Ове промене концентрације нитрата настају услед чињенице да је нитратни јон слаб анјонски лиганд, константно се адсорбује на честице земљишта, а затим се десорбује при наиласку подземне воде из врела Бежиште у којој је концентрација нитрата била нижа (Filipović & Lipanović, 1995; Brown et al, 2018). Резултати овог дела експеримента показују да се процес мешања два раствора одиграва брзо и да се успостављена равнотежа у погледу вредности специфичне електричне проводљивости не мења, док се не промене услови тј. не уведе нови раствор у средину.

Да би се у моделима 1 и 2 створили услови слични онима током теренског опита са контаминантом, модели епикарста су остављени у водом засићеном стању. Модел 1 је био испуњен дестилованом водом у коју је током времена додата кишница, а у Моделу 2 је сада био раствор подземне воде из претходног опита, настао мешањем кишнице и подземне воде карстног врела Бежиште. Уз помоћ славина је постигнуто да интензитет процеђивања кроз систем сада буде као приликом теста са контаминантом у пећини.



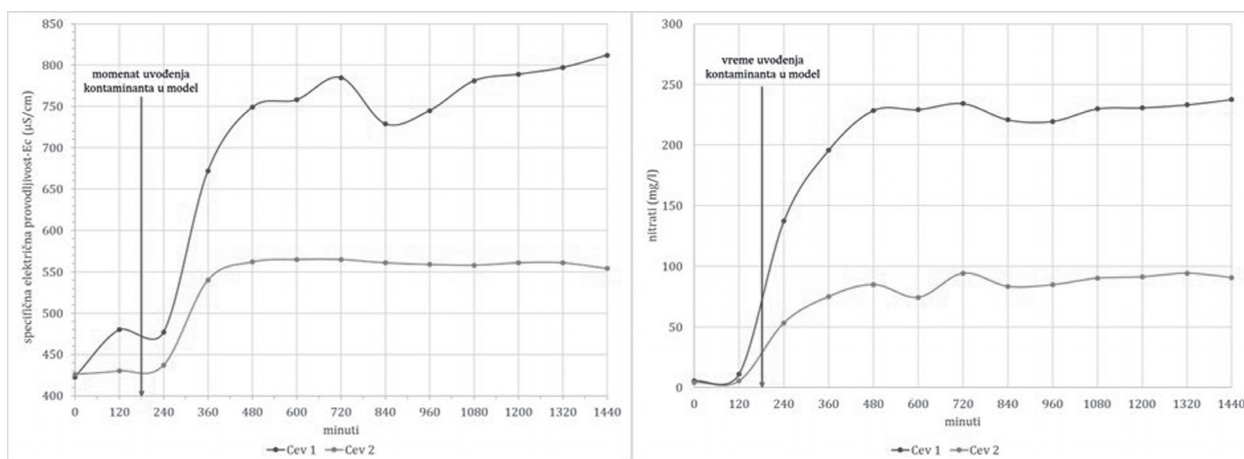


**Слика 2.** Скица лабораторијског модела (лево) и изглед модела 1 и 2 након израде и током експеримента (средина и десно)

**Figure 2.** Sketch of the laboratory model (left) and actual models 1 and 2 after saturation and during experiments (middle and right)

Контаминант је, у виду раствора вештачког азотног ђубрива, уведен у модел епикарста преко „туш“ решетке. Током трећег сата, након што је извршено успостављање услова процеђивања воде сличним оним у природи, извршено је наливање раствора контаминанта у сваку од цеви. Концентрација нитрата у контаминанту је била 1160 mg/l, а специфична електрична проводљивост 3070  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Након тога је мерење специфичне електричне проводљивости у процеђеној води и узорковање за одређивање концентрације нитрата, обављано на свака два сата, све док се модели нису у потпуности испразнили. Модели су другачије реаговали на унос високо „минерализованог“ контаминанта. У обе цеви је вредност специфичне електричне проводљивости већ у првом наредном узорку (1 час после наливања раствора контаминанта) била увећана (Слика 3). Вредности специфичне електричне проводљивости у две цеви се у просеку разликују за 30%.

Први максимум концентрације нитрата у Моделу 1 је достигнут 5 сати након наливања контаминанта. Након тога концентрација нитрата је имала мале промене, уз благи пораст да би узорак узет 21 сат након момента наливања контаминанта имао највиши садржај нитрата. Концентрација нитрата у Моделу 1 има сличан тренд као вредности специфичне електричне проводљивости (Слика 3). Равнотежна концентрација нитрата у моделу, у којем се врши мешање контаминанта и „чисте“ воде је постигнута (Filipović & Lipanović, 1995; Brown et al, 2018), док мала одступања у износу од 30-40 mg/l потичу од присутне адсорпције нитрата на кречњачке стене али и од мобилисања нитрата, који су конституенти земљишта искоришћеног при креирању физичког модела епикарста у Моделу 1. Први пик концентрације нитрата у Моделу 2 се достиже 5 сати након увођења контаминанта, а затим долази до благог опадања концентрације, да би одмах у следећем узорку био забележен максимум. Након тога се бележе ниже вредности концентрације нитрата, а тренд опадања је сличан тренду опадања вредности специфичне електричне проводљивости (Слика 3). Теоретски равнотежна концентрација нитрата у Моделу 2, је постигнута иако је требала да буде виша за око 30% (Filipović & Lipanović, 1995; Brown et al, 2018), а разлика која постоји се може донекле објаснити адсорпцијом/десорпцијом нитрата на кречњачке стене.



Слика 3. Дијаграм промене специфичне електричне проводљивости и концентрације нитрата током опита са контаминантом у лабораторијском моделу

Figure 3. Diagram of changes in specific electrical conductivity and nitrate concentration during contaminant experiment in laboratory model

## ЗАКЉУЧАК

Резултати експеримента показују да је могуће симулирати процеђивање воде кроз епикарст, у условима сличним природним условима, који постоје на локацији пећине Печ. Постигнута је вредност филтрације процедне воде кроз моделе, слично процеђивању воде приликом експеримента у пећини. Постигнута је умањење концентрације контаминанта (нитратни јон), као што је и у природним условима концентрација нитрата смањена (три пута), једино је смањење концентрације веће у моделима него у природним условима, скоро 5 пута у Моделу 1, а преко 12 пута је смањена концентрација у Моделу 2. Уколико се промена квалитета процедне воде у моделима посматра кроз промену специфичне електричне проводљивости онда је опет постигнуто умањење „минерализације“ коју је имао контаминант. У Моделу 1 је специфична електрична проводљивост контаминирание воде након филтрације кроз модел епикарста смањена скоро 4 пута, а у Моделу 2 је вредност специфичне електричне проводљивости смањена 5,5 пута. Лабораторијски експеримент у дизајнираном моделу епикарста је обезбедио почетне параметре за рад са хемијским контаминантима. Потребно је спровести експерименте у физичком моделу епикарста и са другим типовима контаминанта (осим вештачких ђубрива), уз обавезну проверу функционисања модела у случају микробиолошког загађења.

## Литература:

- Brown T. E., LeMay H. E., Bursten B. E., Murphy C., Woodward P., Stoltzfus M. E., 2018: Chemistry: The Central Science, 14th Edition, MasteringChemistry Series, Pearson, p. 1240
- Filipović I. & Lipanović S., 1995: Опћа i anorganska hemija I i II, Nova školska knjiga, Zagreb, p. 1145
- Вујишић Т. et la, 1971: ОГК СФР Југославије, лист Бела Паланка К 34-33 тумач и карта, P=1:100.000, Савезни геолошки завод (СГЗ), Београд, п. 69
- Geyer T., Birk S., Liedl R., Sauter M., 2008: Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs, J Hydrol, 348, pp. 452–463
- Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart C., 2008: Tracer tests in karst hydrogeology and speleology, Int J Speleol, 37, pp. 27–40
- Gunn J., 1985: A conceptual model for conduit flow dominated karst aquifers, in Karst Water Resources (eds. Gultekin Gunay, A. Ivan Johnson; Proceedings of the Ankara - Antalya Symposium, July 1985), IAHS Publ. no. 161, pp. 587-596
- Живановић В., 2011: Оцена рањивости подземних вода од загађења на примерима карста Србије, Магистраска теза, Универзитет у Београду, Рударско-геолошки факултет, Београд, п. 215
- Hudson J.A. & Harrison J.P., 1997: Engineering rock mechanics: an introduction to the principles, Pergamon, Tarrytown, NY, p. 444
- Kiraly L., 2003: Karstification and Groundwater Flow, Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, Vol 1, Issue 3, pp. (Republished from Gabrovšek, F. (Ed.). 2002. Evolution of karst: from prekarst to cessation. Postojna-Ljubljana, Založba ZRC, 155-190.)
- Klimchouk A.B., 1987: Conditions and peculiarities of karstification in the shallow subsurface zone of carbonaceous massifs, Caves of Georgia, v. 11, (In Russian, res. Engl.), pp. 54-65.
- Klimchouk A.B., 1995: Karst Morphogenesis in the epikarstic zone, Cave and Karst Science, Vol. 21, No. 2, Transactions of the British Cave Research Association, pp. 45-50

- Klimchouk A.B., 2000: The formation of epikarst and its role in vadose speleogenesis, In: Speleogenesis: Evolution of karst aquifers (Eds. Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N. and Dreybrodt W.), National Speleological Society of America, pp. 261-273, Huntsville, AL-USA
- Klimchouk A.B., 2004: Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution, Speleogenesis and evolution of karst aquifers, The Virtual Scientific Journal, pp. 1-13
- Klimchouk A.B. & Andrejchuk V.N. 1996: Breakdown development in cover beds, and landscape features induced by intratratal gypsum karst. In: Gypsum Karst of the World (Klimchouk A.B., Lowe D., Cooper A., and Sauro U. (eds.)), International Journal of Speleology Theme issue 25 (3-4), pp. 127-144
- Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N., Dreybrodt W. (eds), 1996: Speleogenesis; Evolution of Karst Aquifers, National Speleological Society Press, Huntsville, AL, 527 pp.
- Mangin A., 1973: Sur la dynamiques des transferts en aquifere karstique, Proceedings of the 6th International Congress of Speleology, Olomouc, CSSR, Vol. 6, 157–62
- Mangin A., 1975: Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, 3eme partie, Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. Ann Spéléol 30(1):21–124
- Milanović P., 1979: Hidrogeologija karsta i metode istraživanja, Hidroelektrane na Trebišnjici, Institut za korištenje i zaštitu voda na kršu, Trebinje, p. 302
- Petrović B., 2020: Funkcionisanje i uticaj epikarsta na režim, bilans i kvalitet podzemnih voda istočnog dela karstnog sistema Suve planine, Doktorska disertacija, Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu
- Петровић Б., Мариновић В., 2021: Примена дискретног ауторегресивно – кросрегресивног модела покретног просека за прогнозу дневних вредности издашности врела Мокра и Дивљана, Записници Српског Геолошког Друштва, Српско геолошко друштво, Београд, ISSN: 0372-9966, pp. 1-14
- Price D.G. & Knill J., 2009: Ground Response to Engineering and Natural Processes, in: Engineering Geology - Principles and Practice (ed. de Freitas M. H.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 229-246
- Price D.G. & de Freitas M. H., 2009: Withdrawal of Support by Surface Excavations, in: Engineering Geology - Principles and Practice (ed. de Freitas M. H.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 247-294
- Williams P.W., 1983: The role of the subcutaneous zone in karst hydrology, Journal of Hydrology, 61, pp. 45-67
- Williams P.W., 1985: Subcutaneous hydrology and the development of doline and cockpit karst. Zeitschrift für Geomorphologie, 29(4), pp. 463–482