

# Hidraulički tranzijenti u karstnoj sredini tokom rada hidroelektrane; Hydraulic Pressure Transients in the Karst Environment During Hydroelectric Power Plant Operation

Maја Todorović, Marina Ćuk Đurović, Igor Jemcov



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Hidraulički tranzijenti u karstnoj sredini tokom rada hidroelektrane; Hydraulic Pressure Transients in the Karst Environment During Hydroelectric Power Plant Operation | Maја Todorović, Marina Ćuk Đurović, Igor Jemcov | Knjiga apstrakata 10. Simpozijuma o zaštiti karsta, Zlatibor, 14-15. oktobar 2023.; Abstract volume of the 10th Symposium on karst protection, Zlatibor, October 14-15 2023 | 2023 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008403>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: [www.dr.rgf.bg.ac.rs](http://www.dr.rgf.bg.ac.rs)

AKADEMSKI SPELEOLOŠKO – ALPINISTIČKI KLUB  
STUDENT SPELEOLOGICAL AND ALPINISTIC CLUB



**KNJIGA APSTRAKATA**

10. SIMPOZIJUM O ZAŠTITI KARSTA

---

10<sup>TH</sup> SYMPOSIUM ON KARST PROTECTION

**ABSTRACT VOLUME**



**Knjiga apstrakata 10. Simpozijuma o zaštiti karsta**  
**Abstract volume of the 10<sup>th</sup> Symposium on karst protection**

IZDAVAČ / PUBLISHED BY

Akademski speleološko – alpinistički klub (ASAK)  
Studentski trg 16, Beograd

UREDNIK / EDITOR

Ana Mladenović

TEHNIČKA PRIPREMA / PRE-PRESS

Ana Mladenović

DIGITALNO IZDANJE

ISBN 978-86-907923-6-8





Akademski speleološko – alpinistički klub (ASAK) iz Beograda deseti, jubilarni put organizuje Simpozijum o zaštiti karsta, 14 – 15. oktobra 2023. godine na Zlatiboru. Simpozijum su podržali Opština Čajetina, Odbor za kras i speleologiju SANU, Društvo geomorfologa Srbije, Geografski institut "Jovan Cvijić" SANU, Komisija za karst Srpskog geološkog društva i Savez speleoloških organizacija Srbije.

Student Speleological and Alpinistic club (ASAK) from Belgrade organizes the Symposium on karst protection for the 10<sup>th</sup> time, from October 14<sup>th</sup> to 15<sup>th</sup> 2023 on Zlatibor Mts. The Symposium is supported by the Municipality of Čajetina, Board on karst and speleology SASA, Serbian Society of Geomorphologists, Geographical Institute "Jovan Cvijić" SASA, Karst Commission of the Serbian Geological Society and Federation of Speleological Organizations of Serbia (SSOS).

#### **Organizacioni odbor / Organizing Committee:**

**Ana Mladenović** (ASAK i Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**Predrag Stošić** (ASAK)  
**Bojana Đajić** (ASAK)  
**Gojko Paskota** (ASAK)  
**Jelena Čalić** (ASAK i Geografski institut "Jovan Cvijić" SANU)  
**Mihajlo Mandić** (ASAK)  
**Selena Blagojević** (ASAK)

#### **Naučni odbor / Scientific Committee:**

**dr Ana Mladenović** (ASAK i Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**dr Jelena Čalić** (ASAK i Geografski institut "Jovan Cvijić" SANU)  
**dr Ivana Budinski** (Institut za biološka istraživanja "Siniša Stanković" Univerziteta u Beogradu)  
**prof. dr Slobodan Marković** (Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Novom Sadu)  
**prof. dr Igor Jemcov** (Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**prof. dr Zoran Stevanović** (Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**prof. dr Aleksandar Petrović** (Geografski fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**dr Dragan Antić** (Biološki fakultet Univerziteta u Beogradu)  
**dr Dragan Nešić** (Zavod za zaštitu prirode Srbije)  
**dr Milovan Milivojević** (Geografski institut "Jovan Cvijić" SANU)  
**dr Marko Milošević** (Geografski institut "Jovan Cvijić" SANU)



## SADRŽAJ

<b>1990. – 2023.</b>	
<i>Mihajlo Mandić</i> .....	3
<b>Karstno vrelo Опачица – реткост приобалног карста Боке Которске</b>	
<i>Зоран Никић, Оливера Доклестић, Васо Мрваљевић, Ненад Марић</i> .....	6
<b>Cijanobakterije kao komponenta lampenflore u turističkim pećinama Srbije</b>	
<i>Slađana Popović, Gordana Subakov Simić, Olga Jakovljević, Marija Pečić, Dragana Predojević, Nataša Nikolić</i> .....	12
<b>Implementacija hidrohemijskih i multivarijantnih statističkih metoda za razumevanje hidrodinamike karsta</b>	
<i>Marina Ćuk Đurović</i> .....	15
<b>Opšte odlike karsta planine Zlatar (jugozapadna Srbija)</b>	
<i>Dragan Nešić</i> .....	20
<b>Rastovačka pećina u klisuri Panjice kod Arilja</b>	
<i>Milorad Kličković, Aleksandra Zatezalo</i> .....	25
<b>Izazovi u proučavanju pećinskih stonoga Dinarskog krasa – primer litobiomorfnih stonoga (Chilopoda, Lithobiomorpha)</b>	
<i>Anja Kos, Dalibor Stojanović, Teo Delić, Maja Zagmajster</i> .....	26
<b>Gornja Baračeva špilja – povijest paleontoloških istraživanja</b>	
<i>Hrvoje Cvitanović, Slaven Vuković</i> .....	30
<b>Speleon – Centrar podzemne baštine</b>	
<i>Slaven Vuković, Hrvoje Cvitanović</i> .....	31
<b>Anthroleucosomatidae (Myriapoda, Diplopoda, Chordeumatida) Balkanskog poluostrva: pregled „Bulgarosoma“ kompleksa rodova</b>	
<i>Mirko Šević, Dragan Antić, Slobodan Makarov</i> .....	32
<b>Valisneria spiralis – nova vrsta alohtone biljke u kraškim vodama Bosne i Hercegovine</b>	
<i>Mihajlo Stanković, Marlena Ćukteraš, Marinko Dalmatin</i> .....	37
<b>Geomorfološke posledice poplava 2014. godine u karstu Dževrinske grede (istočna Srbija)</b>	
<i>Jelena Ćalić, Dejan Jeremić, Ana Mladenović</i> .....	41
<b>Hidraulički tranzijenti u karstnoj sredini tokom rada hidroelektrane</b>	
<i>Maja Todorović, Marina Ćuk Đurović, Igor Jemcov</i> .....	45
<b>Novija speleološka istraživanja u Parku prirode Stara planina na teritoriji Opštine Knjaževac</b>	
<i>Mladen Milošević</i> .....	50
<b>Speleološki objekti klisure reke Ribnice: biodiverzitet, značaj, ugroženost</b>	
<i>Mirko Šević, Mihailo Vujić, Vukašin Gojšina, Dragan Antić, Dalibor Z. Stojanović, Slobodan E. Makarov</i> .....	57
<b>Pregled najnovijih speleoloških istraživanja centralnog dela Zlatara</b>	
<i>Nenad Rumenić, Predrag Matović</i> .....	61



## **Hidraulički tranzijenti u karstnoj sredini tokom rada hidroelektrane**

### **Hydraulic Pressure Transients in the Karst Environment During Hydroelectric Power Plant Operation**

Maja Todorović<sup>1</sup>, Marina Ćuk Đurović<sup>1</sup>, Igor Jemcov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> – Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, Srbija

#### Summary

The study investigates dynamic variations in pore pressure within complex aquifer systems in carbonate rocks near a concrete-lined headrace tunnel during various operational phases of the hydroelectric power plant. The innovative research methodology includes measuring pore pressures of groundwater (water column height) in the rock mass behind the tunnel's lining enabling the characterization of hard-to-reach hydrogeological environments. Internal piezometers were strategically deployed for precise pressure monitoring, facilitating an in-depth exploration of the hydrogeological response. Continuous monitoring provided valuable insights into the behavior of the hydrogeological environment in response to hydraulic transients with a focus on water-mass oscillations, induced by the hydropower plant's operation regimes. The pore pressure response to hydraulic transients has indicated hydraulic conductivity and the degree of karstification, revealing a high level of anisotropy and heterogeneity of carbonate systems along the tunnel route. Findings reveal diverse reactions of the karst aquifers delineating areas of high, moderate, and limited reactivity, that represent a direct consequence of the lining condition, hydrogeological characteristics, and proximity to the surge tank. The results have shown that continuous monitoring and collection of high-frequency data on pore pressures are essential for an adequate characterization and assessment of karst system dynamics, while the developed methodology can be applied in hydrogeological investigations in tunnels for various purposes.

#### **1. Uvod**

Antropogeni uticaj na karstne izdani kao posledice inženjerskih aktivnosti je teško sagledati usled međusobnog uticaja različitih geoloških karakteristika i uslova izgradnje veštačkih objekata (Lu et al., 2020). Kada su tuneli u pitanju, istraživanja su uglavnom obuhvatala probleme stabilnosti tla, objekata i prodora-gubitaka vode (Li et al., 2016), dok samom uticaju režima rada tunela tokom rada hidroelektrana, nije posvećena adekvatna pažnja (Zheng et al., 2020). Radni režim hidroelektrane, koji uključuje česte promene usled rada turbina generiše hidrauličke tranzijente, koji se ogledaju u dva fenomena: hidraulički udar i oscilacije vodenih masa (Neupane et al., 2020, 2021). Hidraulički udar, kao posledica pokretanja i prestanka rada turbine, se prostire prema vodostanu, koji ima funkciju amortizacije hidrauličkog udara u tunelu. Na ovaj način, vodostan postaje izvor oscilacija vodenih masa, koje se dalje prenose uzvodno, duž hidrauličkog tunela što svakako ima za posledicu i interakciju sa okolnom hidrogeološkom sredinom. Razmatranje složenosti uticaja hidrauličkih tunela na podzemne karstne sisteme zahteva dugoročni monitoring (Hartmann et al., 2014), koji je veoma teško sprovesti. Stoga, istraživanje uticaja



hidroelektrana na karstne sisteme uglavnom se sprovodi primenom numeričkih simulacija (Zheng et al., 2020). U cilju razumevanja složenog procesa interakcije karstnih hidrogeoloških sistema i hidrauličkih tunela, na primeru hidroelektrane (HE) Piroć, razvijena je inovativna metodologija monitoringa pornih pritisaka u stenskoj masi duž trase tunela.

## **2. Metode merenja pornih pritisaka u karstnoj sredini u uslovima postojanja hidrauličkog tunela**

U cilju merenja prenosa tranzijenata (prelaznih režima) iz hidrauličkog tunela u karstnu sredinu, iz tunela kroz geološku sredinu su izvedeni bočni-unutrašnji pijezometri specifične konstrukcije, koja obezbeđuje kontinualno osmatranje pornih pritisaka u karstnoj sredini, u neposrednom okruženju tunela. Tehničke karakteristike unutrašnjih pijezometara sa sistemom ventila omogućavaju nesmetanu instalaciju mernih sondi - divera. Kriterijum izbora lokacija unutrašnjih pijezometara se zasnivao na indikacijama hidrauličke povezanosti između stenske mase i tunela, koje su se manifestovale isticanjima u uslovima ispražnjenog tunela. Monitoring pornih pritisaka sproveden je na detaljnom nivou sa frekvencijom merenja od 10 min, i tokom perioda od oko 1.5 godine prikupljeno je ukupno 72000 podataka, što je predstavljalo ukupnu memoriju sonde. Navedeni period obuhvatio je stanje punjenje tunela do postizanja stacionarnog hidrodinamičkog režima, kao i operativne radne i testne cikluse HEP.

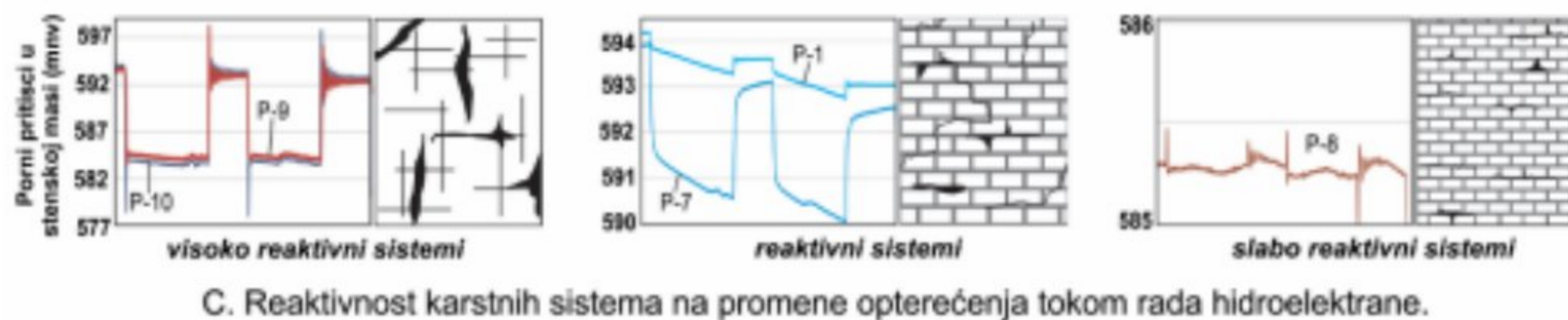
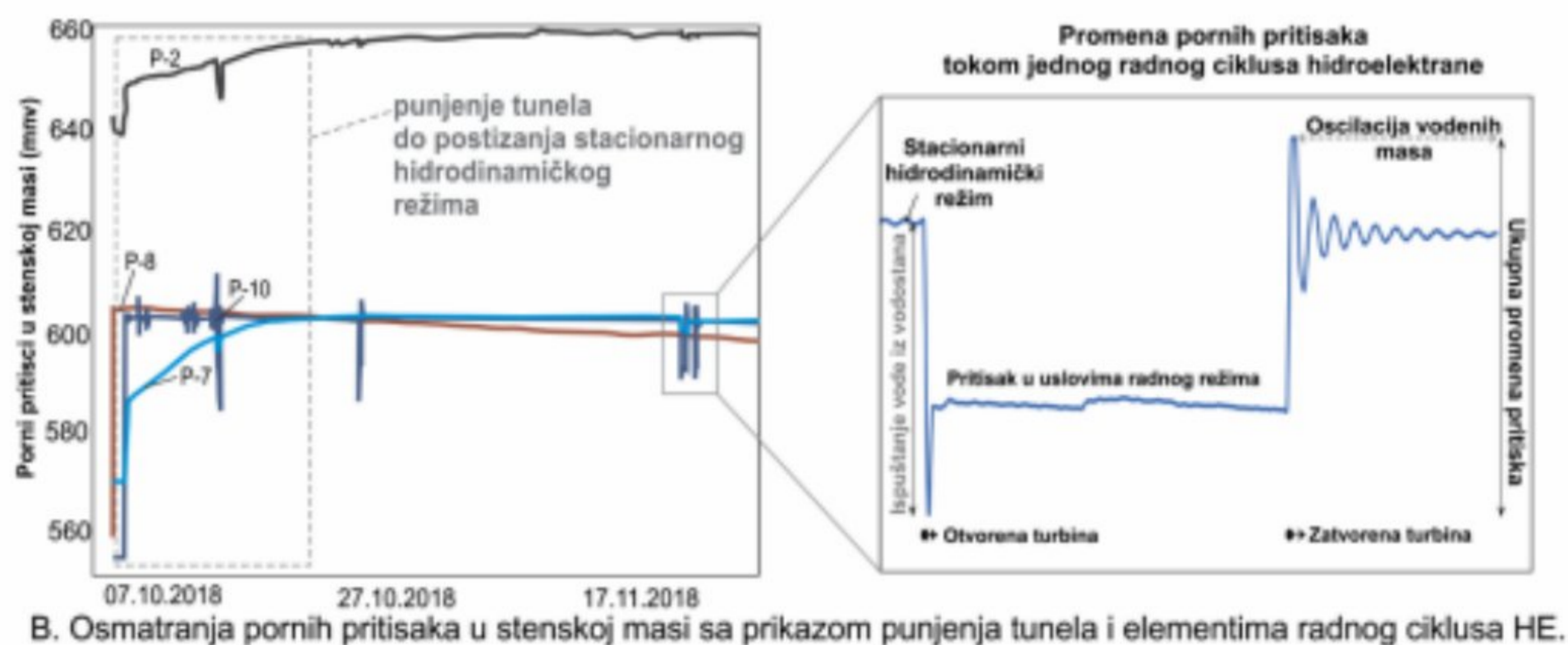
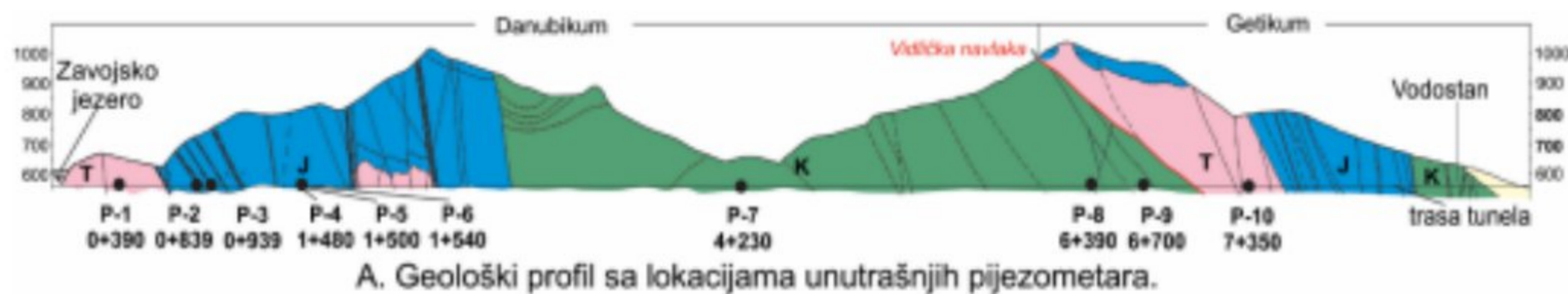
## **3. Hidraulički odziv karstne hidrogeološke sredine izazvan tranzijentima u radu HE**

Polaznu osnovu predstavljalo je ispitivanje pornih pritisaka u karstnoj sredine u uslovima ispražnjenog tunela, što približno odgovara prirodnim-neporemećenim uslovima stanja pornih pritisaka u karstnoj sredini. Raspodela pornih pritisaka bila je neujednačena duž tunela, što predstavlja posledicu uticaja geoloških karakteristika, prisustva slabo-vodopropusnih komponenti u karstu, kao i složenih tektoničkih uslova. Visok sadržaj glinovito-laporovite komponente, kao i prisustvo nekarbonatnih formacija, u prvoj sekciji (od 0-2 km), uzrokovao je pojavu konstantno visokih pornih pritisaka. U ostalim delovima duž trase tunela, u kojima dominiraju krečnjaci različitog stepena karstifikacije, konstatovane su značajno niže vrednosti pornih pritisaka. Analiza pornih pritisaka tokom punjenja tunela ukazala je na različite mehanizme punjenja, što je najvećim delom posledica stepena ispucalosti, odnosno karstifikacije okolne stenske mase. Vreme potrebno za dostizanje hidrauličke ravnoteže između pritiska u tunelu i okolnoj geološkoj sredini pokazalo je značajnu varijabilnost: od gotovo trenutnog odgovora karstne izdani (P-9 i P-10) do maksimalno 14 dana (P-7) (Slika 1), ukazujući na prisustvo slabo-ispucalih do karstifikovanih sistema.

Analiza pornih pritisaka unutrašnjih pijezometara tokom ciklusa rada HE, ukazala je na različite reakcije pri pojavi hidrauličkih tranzijenata u tunelu. Fluktuacije pornih pritiska merenih u reprezentativnim unutrašnjim pijezometrima, koje reflektuju različit stepen transfera tranzijenata u geološku sredinu, omogućile su detaljnu hidrogeološku karakterizaciju karstnih hidrogeoloških sistema. Sprovedenom analizom identifikovane su zone visoke i umerene reaktivnosti, kao i nereaktivne zone, što predstavlja direktnu posledicu različitog stepena razvijenosti karstnog procesa.



Visoko reaktivne zone, locirane su u blizini vodostana (Slika 1A), a reprezentativni pijezometri ukazuju na karstifikovane krečnjake gornje krede (P-9), kao i tektonski deformisane slojevite krečnjake srednjeg trijasa (P-10). Ova zona pokazuje gotovo trenutne reakcije na oscilacije pritiska unutar tunela. Blizina vodostana, odnosno zone najvećeg uticaja tranzijenata, nesumnjivo utiče na slabljenje betonske obloge, kroz koju se vrši transfer u geološku sredinu, posebno kada su u pitanju karstifikovani krečnjaci. Obrazac reakcije hidrogeološke sredine ponavljao se tokom svih radnih ciklusa i predstavljao je direktnu refleksiju promena nivoa vode u vodostanu. Tranzijenti izazvani promenom režima iz stacionarnog u radni, dovode do pada pritiska u hidrogeološkoj sredini, usled otvaranja turbina i uticaja vodostana. Nakon izjednačavanja pritiska u tunelu i vodostanu, dolazi je do porasta pritiska u stenskoj masi i dostizanja ravnoteže sa pritiskom tokom radnog režima HE. Prestanak rada turbina dovodi do pojave hidrauličkog udara i naglog izdizanja vode u vodostanu, a zatim i oscilacije vodenih masa, pri čemu se ove promene jasno reflektuju na porne pritiske u stenskoj masi (Slika 1B). Tokom vremena, dolazi do postepenog slabljenja oscilacija usled gubitaka u stenskoj masi. Brzina propagacije hidrauličkih tranzijenata u geološku sredinu ukazuje na brzinu interakcije, što je posebno izraženo u uslovima dobre hidrauličke provodljivosti karstifikovanih sistema (Slika 1C).



**Slika 1.** Geološki profil duž ose tunela sa lokacijama unutrašnjih pijezometara i rezultati monitoringa pornih pritisa u stenskoj masi tokom različitih režima rada hidroelektrane.



Umereno reaktivni pijezometri (P-1, P-7) ukazali su na niže promene pritiska i odloženu reakciju unutar slabo karstifikovanih, odnosno ispucalih sistema. U slučaju pijezometra P-1 koji se nalazi u krečnjacima srednjeg trijasa, hidraulički tranzijenti su ukazali na veoma slabo karstifikovani sistem, koji karakteriše ograničena propusnost i sistem slabo povezanih pukotina. S druge strane kašnjenje reakcije pornih pritisaka u stenskoj masi u zoni P-7 koja odgovara laporovitim krečnjacima donje krede, tokom punjenja tunela ukazuje na prisustvo dobro struktuiranog karstnog sistema koji karakteriše veoma dobra povezanost. Odsustvo krupnih kanalskih sistema indikovano je značajnom atenuacijom hidrauličkih tranzijenata, koja se manifestuje kroz usporeni i dugotrajni transfer. Inertni – nereaktivni pijezometar P-8 pokazao je minimalni transfer tranzijenata koji se odnosi na sredinu izrazito niske karstifikacije, što odgovara laporcima sa krečnjačkom drobinom gornje krede (Slika 1C).

#### 4. Zaključak

Analiza pornih pritisaka u stenskoj masi u različitim radnim fazama, na primeru HE Piroto, omogućila je dublje razumevanje fenomena transfera hidrauličkih tranzijenata u karstu i njihovu primenu u hidrogeološkoj karakterizaciji. Odziv pornih pritisaka u stenskoj masi pri tranzijentima nastalim usled rada HE, ukazao je na prostornu heterogenost hidrogeoloških sistema u karbonatnim stenama. Identifikovane su zone visoke, umerene i ograničene reaktivnosti koje su pokazale da i u uslovima postojanja betonske obloge i masivnog injektiranja nije moguće izvršiti potpunu hidrauličku izolaciju tunela. Različita reaktivnost unutrašnjih pijezometara predstavlja direktnu posledicu stanja obloge, hidrogeoloških karakteristika kao i blizine vodostana. Transfer tranzijenata ukazao je na hidrauličku provodljivost odnosno stepen karstifikacije, otkrivajući visok stepen anizotropnosti i nehomogenosti karbonatnih sistema duž trase tunel. Odziv pornih pritisaka se razlikovao između litoloških članova ali i unutar samih jedinica, čime je istaknut značaj uticaja tektonskih karakteristika na stepen karstifikacije i brzinu cirkulacije u karbonatnim sistemima. Ovo istraživanje se temelji na inovativnoj metodi za neprekidno merenje visine vodenog stuba u stenskoj masi neposredno iza obloge tunela, što omogućava karakterizaciju teško dostupnih hidrogeoloških sredina. Rezultati su ukazali da je kontinuirano praćenje i prikupljanje visokofrekventnih podataka o vrednostima pornih pritisaka neophodno za adekvatnu karakterizaciju i ocenu dinamike karstnih sistema dok se sprovedena metodologija može primeniti pri istraživanjima u uslovima postojanja tunela različite namene.

#### 5. Spisak literature

1. Zheng, X., Yang Z., Wang, S., Chen, Y, Hu, R., Zhao, X., Wu, H., Yang, X. 2020. *Evaluation of hydrogeological impact of tunnel engineering in a karst aquifer by coupled discrete-continuum numerical simulations*. Journal of Hydrology, 597 doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125765
  2. Li, S., Liu, R., Zhang, Q., Zhang, X. 2016. *Protection against water or mud inrush in tunnels by grouting: A review*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 8,753-766
  3. Hartmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J., Weiler, M. 2014. *Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches*. Rev. Geophys, 52: 218-242
  4. Lu, Y., Jiang Y., Hu, W., Cao, Min., Mao, Y. 2020. *A review of the effects of tunnel excavation on the hydrology, ecology, and environment in karst areas: Current status, challenges, and perspectives*. Journal of Hydrology, 586
  5. Neupane, B., Panthi, K. K., & Vereide, K. (2020). *Method for monitoring of pore pressure in jointed rock mass of an unlined headrace tunnel subjected to varying power plant operation: A case study*.
-



---

Rock Mechanics for Natural Resources and Infrastructure Development- Proceedings of the 14th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering, September, 1303–1310. ISBN 978-0-367-42284-4

6. Neupane, B. (2021). *Long-term impact on unlined tunnels of hydropower plants due to frequent start/stop sequences*. Norwegian University of Science and Technology. ISSN 2703-8084