

ISTRAŽITI, RAZUMJETI I ZAŠTITITI – SPELEOLOŠKA I HIDROLOŠKA ISTRAŽIVANJA U SPELEOLOŠKOM SUSTAVU ZRAČAK NADE 2 – KAVERNA U TUNELU UČKA

Dino Grozić, mag. oecol.
Karsterra, vl. Dino Grozić
Jušići 14, Jušići, Hrvatska
dgrozic.karsterra@gmail.com

**dr. sc. Lovel Kukuljan,
mag. chem.**
Speleološka udruga „Estavela“,
Školska ulica 4, Kastav

Krški vodonosnici, koji su osjetljivi na salinizaciju i prekomjerno iskorištavanje, suočavaju se s nepovoljnim promjenama uslijed klimatskih promjena, što rezultira značajnim socioekonomskim i ekološkim posljedicama. Kako bi se osiguralo njihovu učinkovitu zaštitu, važno je temeljito razumjeti strukturu i funkcioniranje ovih vodonosnika. Najbolji način za smanjenje nepredvidivosti, često povezane s ovom hidrološkom “crnom kutijom”, jest provođenje istraživanja i mjerenja izravno unutar krškog podzemlja, a ne samo na ulazima i izlazima. U ovom članku predstavljeni su rezultati hidrološkog praćenja podzemnog toka u speleološkom sustavu Zračak nade 2 – Kaverna u tunelu Učka, koji predstavlja pouzdan izvor pitke vode već više od 40 godina. Speleološka istraživanja su, osim toga, kartirala podzemnu hidrološku mrežu i otkrila značajno proširenje Sustava, što otvara mogućnosti za bolje upravljanje postojećim vodnim resursima te potencijalno otkrivanje novih.

Ključne riječi: hidrologija krša, speleologija, dinamika podzemnih voda, vodni resursi, špiljski sustav

1. UVOD

Krški izvori u gornjem dijelu Učke ključni su za vodoopskrbu Opatije i šireg područja. Posebno se ističe kaptaža u tunelu Učka, koja je u funkciji od 1983. godine, osiguravajući kontinuiranu opskrbu pitkom vodom. Ovaj podzemni vodeni tok nastao je na kontaktu vapnenaca i vodonepropusnih slojeva fliša, a površinski sliv proteže se kroz nenaseljeno krško područje unutar Parka prirode Učka, što jamči visoku kvalitetu i čistoću vode. Ipak, povremeno se bilježe niski protoci ljeti te visoki protoci u jesen i zimu, koji premašuju kapacitete crpljenja i skladištenja. Zbog toga postoji trajna potreba da se ovaj sustav vodoopskrbe unaprijedi, uz istovremeno bolje istraživanje i zaštitu postojećih vodnih resursa.

Značajan trenutak bio je pronalazak kaverne u tunelu Učka 1977. godine, tijekom izgradnje tunela za cestovnu

povezanost Istre i Kvarnera. Na stacionaži 1+632 s kvarnerske strane, bušenjem je otkrivena šupljina na lijevoj strani tunela, iz koje je potekao snažan vodeni tok, preplavivši tunel. Svjesni važnosti ovog izvora vode na takvoj lokaciji i nadmorskoj visini, stručnjaci iz Hrvatskog geološkog zavoda preporučili su opsežno speleološko i hidrološko istraživanje. Ta istraživanja otkrila su složenu mrežu podzemnih dvorana i kanala s aktivnim vodotocima, ukupne istražene duljine od 1490 metara i vertikalnog raspona od 135 metara poznatu pod nazivom Kaverna u tunelu Učka. Iako je 1982. godine izgrađeno kaptažno postrojenje, prva bakteriološka ispitivanja pokazala su da voda nije bila ispravna za korištenje. Tek nakon što je utvrđen i saniran izvor onečišćenja – kanalizacijski sustav odmarališta udaljenog oko 0,7 km i visinski položenog oko 300 m

iznad kaptaze – voda je mogla biti sigurno integrirana u opskrbni sustav (Božičević 1978; Božičević 1985).

Daljnja speleološka istraživanja započela su oko tri desetljeća nakon prvog otkrića, 2011. godine, otkrićem špilje pod nazivom Zračak nade 2, smještene u blizini prijevoja Poklon, otprilike 400 metara iznad Kaverne i tunela Učka. Potaknuti ciljem povezivanja Kaverne s površinom, istraživači su proveli opsežna speleološka istraživanja. Ti su napori kulminirali 2015. godine kada su otkrivene goleme podzemne dvorane i aktivni vodeni tok, sličan onome unutar Kaverne. Glavna nit vodilja tijekom istraživanja bila je izražena cirkulacija zraka, uzrokovana značajnom visinskom razlikom između gornjeg ulaza kod prijevoja Poklon i donjeg ulaza u tunelu. Najveći izazov u daljnjem istraživanju prema Kaverni bio je potopljeni prolaz – sifon. Ta je prepreka savladana krajem 2017. godine kada su speleoronioci uspješno prošli kroz njega i otkrili otvoreni vertikalni nastavak. U veljači 2018. godine postignuta je značajna prekretnica kada su ronioci zaronili u sifon, opremili vertikalne dijelove užetima i prošli posljednjih stotinu metara vodenih kanala, čime su spojeni Zračak nade 2 i Kaverna u jedinstveni Sustav. Tako je istraživanjem potvrđeno da je novootkriveni vodotok zapravo uzvodni dio postojećeg toka unutar Kaverne (Glavaš 2021).

Nakon ovog važnog otkrića, u razdoblju 2018. – 2019. godine, istraživačke aktivnosti su se značajno intenzivirale kroz projekt koji financiraju Hrvatske vode pod nazivom “Speleološka istraživanja podzemnih sustava povezanih sa zahvatom u tunelu Učka”. Projekt su podržali i javni isporučitelj vodnih usluga Liburnijske vode d.o.o., tvrtka Bina-Istra d.d. i Park prirode Učka. Tijekom istraživanja provedenih prije i za vrijeme projekta otkrivena je opsežna mreža podzemnih dvorana i kanala, koja se prostire daleko izvan prethodno kartiranih granica Kaverne, gdje je 1983. godine izgrađena podzemna kaptaza. Izvor onečišćenja, koji je 1982. godine onemogućio uključivanje kaptaze u tunelu u vodovodni sustav, detaljno je istražen i utvrđen kao niz uskih vodenih kanala, smještenih svega 60 metara ispod odmarališta INA-e. U tim kanalima pronađeni su bazeni s crnim muljem gotovo četiri desetljeća nakon sanacije kanalizacijskog sustava odmarališta. Ovo otkriće istaknulo je dugotrajnu prisutnost zagađivala u podzemlju, brz protok krških tokova i njihovu neučinkovitost u filtraciji ovih tvari. Kartiranje špiljskog sustava otkrilo je da se njegov opseg proteže izvan granica IB. zone sanitarne zaštite sliva, što zahtijeva revalorizaciju i proširenje tih granica kako bi se obuhvatilo šire hidrogeološko područje (Dukarić i sur. 1999).

Do završetka projekta 2019. godine ukupna istražena duljina špiljskog sustava iznosila je 5582 metra. Naknadna istraživanja produžila su ovu duljinu na 6596 metara do 2021. godine, s vertikalnim rasponom od 430 metara između najviše i najniže točke. Tako je sustav Zračak nade 2 – Kaverna u tunelu Učka postao najduži speleološki objekt u Primorsko-goranskoj županiji i osmi

najdulji u Republici Hrvatskoj. Speleološki nacrt Sustava objavljen je 2021. godine (Kukuljan i Grozić 2021).

Iako je jedan od glavnih ciljeva projekta bio precizno kartiranje složene geometrije ovog špiljskog sustava, drugi važan cilj bio je uspostaviti kontinuirano hidrološko praćenje pomoću mreže automatiziranih uređaja. Ovi uređaji (loggeri) bilježe ključne parametre kao što su razina vode, temperatura i električna vodljivost. Prvi put, takav pristup omogućio je precizno određivanje vodne bilance unutar Sustava, čime se daleko unaprijedio prijašnji, sporadični način mjerenja protoka. Također, terenska mjerenja omogućila su utvrđivanje prostorne varijabilnosti i vremenske dinamike protoka te fizikalno-kemijskih svojstava vode. Ovo poboljšano razumijevanje izravno doprinosi naporima za smanjenje potencijalnih rizika i poboljšanje mjera zaštite vodnih resursa (Grozić i Kukuljan 2020).

2. METODE

Glavniciljspeleoloških istraživanja je precizno kartiranje geometrije speleološkog objekta. U ovom kontekstu, geometrija se odnosi na prostorni obuhvat podzemne šupljine, koji se prikazuje speleološkim nacrtom. Speleološki nacrt uključuje legendu, mjerilo, tlocrt i izduženi profil, koji prikazuje špiljski prostor na okomitoj ravnini, uz podatke o udaljenosti, azimutu i nagibu. Za ta mjerenja koristio se modificirani laserski daljinomjer Leica Disto X310 (DistoX) visoke preciznosti (točnost udaljenosti 2 mm, točnost azimuta i nagiba 0,5°). Uređaj je zahtijevao redovitu kalibraciju kako bi se neutralizirao utjecaj magnetskog polja na funkcionalnost kompasa te prilagodbe magnetske deklinacije nakon svakog istraživanja. Tijekom istraživanja, podaci prikupljeni DistoX-om automatski su se prenosili na ručni uređaj (PDA ili pametni telefon) za izradu početne skice. Ta skica je zatim digitalizirana i pretvorena u konačni nacrt. Prilikom izrade nacrt, zabilježene su ključne značajke poput prisutnosti vodenih tokova, protoka zraka, morfologije poda i stropa te potencijalnih nastavaka za daljnje istraživanje. Ovakav detaljan prikaz omogućuje procjenu podzemnog sliva, pružajući vrijedne uvide u hidrološke i geološke karakteristike špilje.

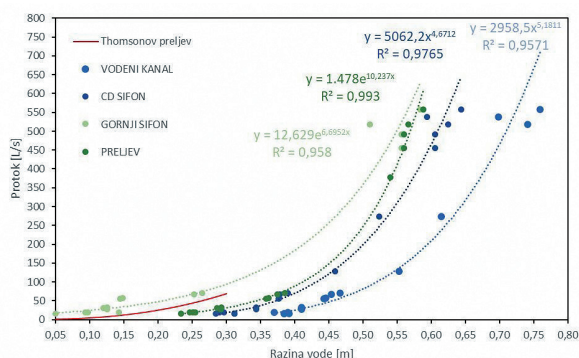
Unutar špiljskog sustava postavljena je mreža kontinuiranog praćenja koja je obuhvaćala sedam stalnih točaka za praćenje vodostaja, šest točaka za mjerenje protoka vode i sedam točaka za praćenje temperature zraka. Lokacije za hidrološko praćenje raspoređene su duž gotovo cijelog Sustava, uključujući i nekoliko sekundarnih lokacija gdje se pretpostavlja značajan prtok.

Hidrološko praćenje provodilo se pomoću loggera koji su bilježili tlak vode (pretvoren u razinu vode; rezolucija 0,21 cm) i temperaturu (rezolucija 0,1°C) (HOBO Water Level Data Logger U20L-01, Onset Computer), ili električnu vodljivost (EC; rezolucija 1 μS/cm) i temperaturu (HOBO Fresh Water Conductivity Data Logger U24-001, Onset Computer). Prilikom svakog preuzimanja podataka s tlačnih sonde, točne

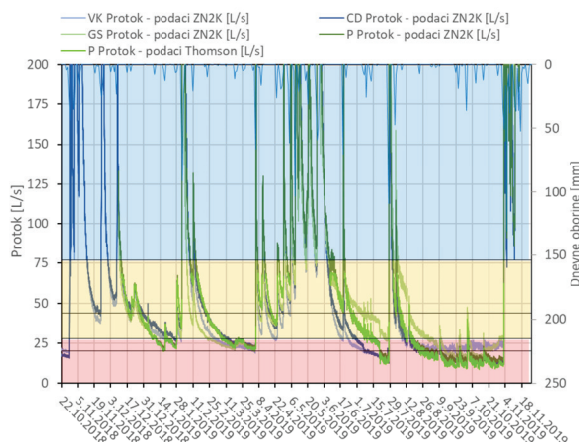
točnost izračunatog protoka iznosi 5 % (Moore 2005). Dana 2. rujna 2018. ova metoda je testirana i uspoređena s drugim tehnikama mjerenja protoka, uključujući hidrometrijsko krilo i Thomsonov preljev (trokutasti s kutom 90° i s ostrim rubovima, prikladan za protoke do 69 L/s), koji je postavljen uzvodno od kaptažnog bazena 1983. godine.

3. REZULTATI I RASPRAVA

Tijekom trajanja projekta zabilježeno je nekoliko ekstremnih vremenskih događaja koje su uzrokovale veće mjesečne količine oborina u odnosu na višegodišnji prosjek. U usporedbi s prosječnim vrijednostima klimatološke postaje Rijeka (1948. – 2018.) i meteorološke postaje Vela Učka (1954. – 2003.), svibanj, srpanj i studeni 2019. godine istaknuli su se kao izrazito kišni mjeseci. U svibnju je meteorološka postaja na Poklonu zabilježila čak 418,1 mm oborina, što je 317 % višegodišnjeg prosjeka za postaju Vela Učka. Na Poklonu su zabilježena i ekstremna dnevna odstupanja, gdje su u tri slučaja količine oborina premašile 100 mm: 9. svibnja (103,4 mm), 28. srpnja (109,3 mm) i 5. listopada 2019. (131,0 mm). S druge strane, sušni mjeseci bili su prosinac 2018. te siječanj, ožujak i rujan 2019., u kojima



Slika 2: Krivulje protoka izračunate za četiri glavna mjesta praćenja izračunate iz svih dostupnih ručnih mjerenja protoka. X os – razina vode (m), Y os – protok (L/s). Crvena krivulja prikazuje protoke izračunate iz Thomsonovog preljeva



Slika 3: Hidrogram za četiri lokacije za cijelo promatrano razdoblje do protoka 600 L/s (skraćeno na 200 L/s radi preglednosti). desna Y os – protok (L/s), lijeva Y os – oborina (mm). Plavo područje - srednje visoka i visoka voda; Žuto područje - srednje i srednje niske vode; Crveno područje - niska voda.

je palo samo 21 %, 24 % i 22 % višegodišnjeg mjesečnog prosjeka za postaju Vela Učka. Takvi vremenski uvjeti bili su korisni za hidrološko praćenje, jer su obuhvatili oba ekstrema hidrološkog režima u Sustavu i ukazali na posljedice rijetkih dnevnih oborinskih ekstrema.

Kontinuirano praćenje razine vode pokazalo je brzu reakciju na oborine na svim lokacijama, nakon čega je uslijedila postupna recesija prema baznoj razini, koja osigurava cjelogodišnji protok vode unutar špiljskog sustava. Značajna varijabilnost protoka otkrivena je kako kontinuiranim praćenjem tako i terenskim mjerenjima. U sušnim razdobljima, minimalni protok glavnog vodotoka iznosio je 15,6 L/s, dok su sekundarni pritoci imali protoke oko 0,1 L/s. Maksimalni zabilježeni protok glavnog vodotoka dosegno je 558 L/s, dok su bočni pritoci doprinijeli s minimalnim protokom (2 – 13 L/s). Protoci glavnog toka bili su od dva do tri reda veličine veći od bilo kojeg drugog izmjenjenog pritoka unutar Sustava.

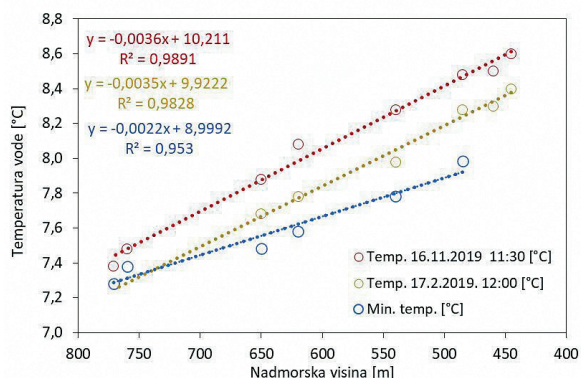
Slika 1 prikazuje tlocrt Sustava, ističući varijabilnost protoka tijekom sušnog razdoblja (crvene strelice) i vlažnog razdoblja (plave strelice). Na temelju prikaza može se zaključiti da poznati pritoci unutar Sustava općenito vrlo malo doprinose bilanci glavnog vodotoka. To znači da glavni tok već ima relativno visok protok pri ulasku u poznate dijelove Sustava. Točna lokacija ovog ulaza još uvijek nije poznata zbog blokova koji prekrivaju veći dio dna špilje, no prema morfologiji kanala najvjerojatnija lokacija je južni dio Sustava.

Na temelju ručno mjerenih podataka, konstruirane su krivulje protoka za četiri lokacije (slika 2). Pomoću tih krivulja izrađeni su hidrografi za cijelo promatrano razdoblje, s maksimalnim protokom od 600 L/s (slika 3). Tijekom tog razdoblja zabilježeno je 13 događaja u kojima su protoci premašili 600 L/s, dok je prosječni izračunati protok iznosio 56 L/s. Vodni uvjeti definirani su krivuljama trajanja, koje su uspostavile granice za niske, srednje i visoke vode unutar Sustava. Na temelju dnevnih prosjeka za razdoblje od 332 dana, kreirana je krivulja trajanja protoka (Searcy 1959) za protoke do maksimalnih 600 L/s. Prema Srebrenoviću (1986), vodni uvjeti definirani su na sljedeći način: niska voda: > 80 % (77 L/s). Strmi dio krivulje ukazuje na veliku varijabilnost protoka i povremene ekstreme, koji su posljedica brzog otjecanja vode tijekom jakih oborina. Blagi završni dio krivulje ukazuje na zalihe vode u podzemnom masivu koje osiguravaju stalni protok tijekom cijele godine, bez presušivanja.

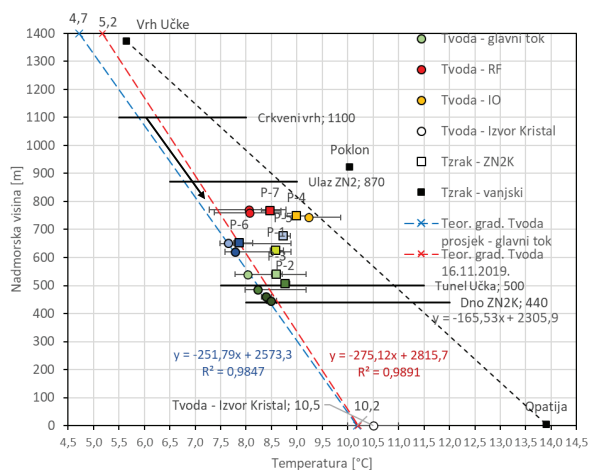
Hidrokemijska mjerenja otkrila su značajne razlike između glavnog toka i pritoka. Glavni tok vode bio je općenito hladniji (prosječno 7,7 – 8,2 °C) s nižim EC vrijednostima (prosječno 278 μS/cm), dok su pritoci bili topliji (oko 8 – 9,5 °C) s višim EC vrijednostima (300 – 450 μS/cm). Razlike u EC vrijednostima upućuju na različite izvore vode i njezine podzemne putove. Niže EC vrijednosti u glavnom toku sugeriraju izravniji unos vode s površine, što znači kraći put i/ili veću brzinu, dok veće EC vrijednosti kod pritoka ukazuju na duži

podzemni put.

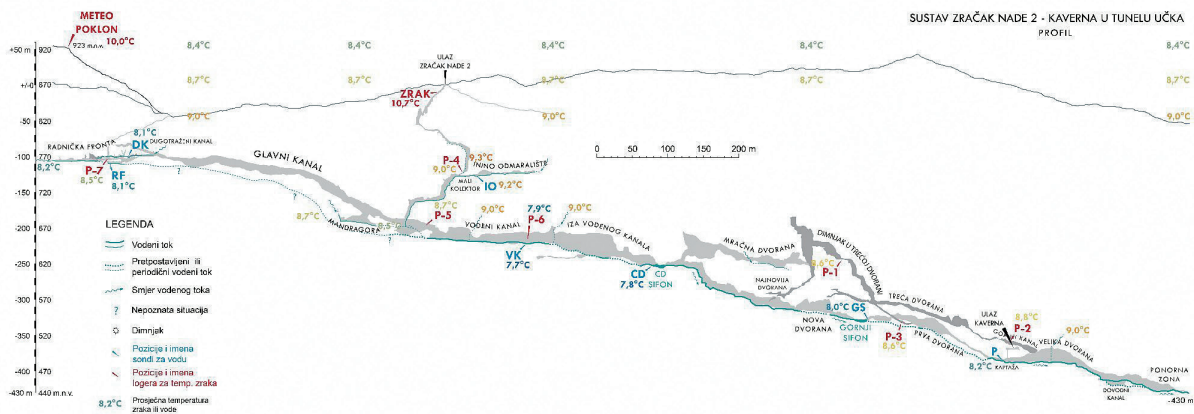
Duž sustava postoji velika varijabilnost hidrokemijskih parametara, kako u vremenu (periodične ili trenutne promjene) tako i u prostoru. Prostorno gledano, glavni



Slika 4: Vertikalni temperaturni gradijent protoka vode Sustava. X os – nadmorska visina (m), y os – temperatura vode (°C). Plavo – minimalna izmjerena temperatura, žuto – temperatura mjerena u zimskom razdoblju (17. 2. 2019., u 12 sati), crveno – temperatura izmjerena u vrijeme visokog vodostaja (16. 11. 2019., u 11.30)



Slika 5: Prosječne temperature zraka i vode te njihovi gradijenti i ekstrapolacije za Učku. X os – temperatura (zrak ili voda, °C), y os – nadmorska visina (m). Točke označavaju temperaturu vode, a kvadrati temperaturu zraka. Obje veličine imaju prikazane raspone koji pokazuju minimalne i maksimalne vrijednosti. Gradijenti su prikazani isprekidanim linijama (crna – vanjski zrak, plava i crvena – temperatura vode). Crna strelica prikazuje teoretsko zagrijavanje vode koja teče s 1100 m nadmorske visine. Izvor: Kukuljan i Grozić, 2019.



Slika 6: Prosječne temperature zraka i vode prikazane na profilu Sustava

tok vode postupno se zagrijava nizvodno, dok su pritoci, koji se nalaze u vadoznom dijelu sustava, općenito topliji od glavnog toka.

Zbog otvorenih (epifreatskih) uvjeta unutar pukotinske mreže krškog masiva, zrak u podzemlju također ima utjecaj na temperaturu vode. Zrak u podzemlju nije statičan, već dolazi do promjena i gibanja uzrokovanih vanjskim utjecajima (promjene temperature, tlaka, strujanja i sl.), a iste promjene su se posljedično odrazile i na vodu. Kontinuirano mjerenje temperature zraka pokazalo je smanjenje temperaturne varijabilnosti s dubinom. Dok temperatura zraka iznad zemlje varira i do 30 °C, pod zemljom se raspon smanjuje na samo 1 °C. Unutar sustava temperatura zraka varira između 8,25 i 9,25 °C.

Usporede li se prosječne vrijednosti temperature vode na lokacijama duž glavnog vodotoka s lokacijama na jugu Sustava i nadmorskim visinama tih lokacija, može se dobiti jasan linearni odnos. Rezultat je vertikalni temperaturni gradijent za vodu koji je između 0,22 i 0,36 °C/100 m (slika 4). Teorijska vrijednost iznosi 0,234 °C/100 m, a predstavlja zagrijavanje vode uslijed trenja tijekom vertikalnog transporta (Luetscher i Jeannin 2004). Slika 4 prikazuje gradijente izračunate s: minimalno izmjerenim temperaturama vode (podaci iz sonde, plavo) i izmjerenim ili očitanim podacima sa sonde 17. veljače 2019. (žuto) i 16. studenoga 2019. (crveno). Mnogi primjeri iz prakse pokazuju da će se, zbog učinkovite izmjene topline, temperatura zraka u špiljama s vodenim tokovima približiti ovoj vrijednosti (umjesto 0,5 °C/100 m, što je očekivani gradijent za vlažan zrak u podzemlju (Luetscher i Jeannin 2004)). Gradijent izračunat za vodu iz prosjeka nešto je veći od teorijske vrijednosti, što se može objasniti značajnim utjecajem zraka. Naime, zrak u Sustavu je općenito topliji, pa dodatno pridonosi zagrijavanju glavnog vodenog toka. Ekstrapolacija gradijenta u oba smjera omogućuje dobivanje procjene očekivane temperature vode u području prihranjenja ili istjecanja. Gradijenti vode i zraka i njihove ekstrapolacije prikazani su na slici 5.

Iz priloženih podataka vidljivo je da je temperatura zraka obično za oko 0,5 °C viša od prosječne temperature vode

na istom mjestu. Sve izmjerene temperature zraka nalaze se unutar raspona između temperature vanjskog zraka i temperature vode. Vertikalni temperaturni gradijent vanjskog zraka (crna točkasta linija) temelji se na dvjema vrijednostima dobivenim iz dugoročnih podataka.

Na temelju tih vrijednosti kreirana su dva vertikalna gradijenta za podzemnu vodu. Ekstrapolacijom tih gradijenata može se procijeniti očekivana temperatura vode na različitim nadmorskim visinama, primjerice na 1400 m (4,7 – 5,2 °C) i na razini mora (10,2 °C). Zanimljivo je da je izmjerena temperatura vode na obalnom izvoru u Opatiji između 10 i 11 °C (Kuhta 2005).

Prema gradijentima podzemne vode, može se zaključiti da voda iz najviših vrhova u slivu (Crkveni vrh i Jazvina, oba na 1101 m n.m.) ulazi u Sustav s temperaturom 7,2 – 7,4 °C. Najniža zabilježena temperatura vode u Sustavu, na južnom kraju, iznosi 7,3 °C. Prikaz odnosa temperatura zraka i vode nalazi se na slici 6, u izduženom profilu Sustava.

4. ZAKLJUČAK

Kombiniranom primjenom speleoloških i hidroloških metoda, čija je metodologija primjene prikazana u ovom radu, značajno je smanjena nepredvidivost krškog vodonosnika koji se koristi za vodoopskrbu Opatije i šireg obalnog područja. Iako se nalazi u netaknutom i nenaseljenom planinskom području, unutar zaštićenog Parka prirode, ovaj vodonosnik i dalje može biti ugrožen potencijalnim izljevima, prekomjernom eksploatacijom ili negativnim utjecajem klimatskih promjena.

Prvi korak u učinkovitoj zaštiti vodonosnika jest precizno određivanje granica slivnog područja, što je

postignuto kombinacijom speleoloških i hidroloških metoda. Nova geometrija jamskog sustava Zračak nade 2 – Kaverna u tunelu Učka pokazuje da se najjužniji dio proteže izvan granica zone sanitarne zaštite (IB. zona), što može biti osnova za reviziju ili proširenje tih granica.

Iako dosadašnja speleološka istraživanja nisu otkrila dodatne izvore vode, jer brojni pritoci minimalno doprinose vodnoj bilanci, postoji mogućnost otkrivanja novih pritoka s obzirom na velike dimenzije Sustava i potencijal za daljnja istraživanja. Također, prvi put je stvorena kontinuirana vremenska serija protoka za jednu hidrološku godinu, omogućujući preciznije praćenje količine i dinamike vode.

Zbog velikih udaljenosti i visinskih razlika unutar špiljskog sustava, zabilježeni su značajni temperaturni trendovi koji mogu pomoći u preciznijem određivanju slivnih i izljevni zona, ne samo u ovom, već i u sličnim krškim masivima.

Metodologija kombinirane primjene speleoloških i hidroloških analiza koja je predstavljena u ovom radu može se uspješno primijeniti i u analizi ostalih krških vodonosnika.

ZAHVALE

Istraživanja su provedena u sklopu projekta "Speleološka istraživanja podzemnih sustava povezanih sa zahvatom u tunelu Učka" koji financiraju Hrvatske vode, br. 325-01/18-10/0000056. Autori zahvaljuju svim speleološkim društvima koji su istraživali Sustav od 2011. godine i doprinijeli ovom projektu te tvrtki Liburnijske vode d.o.o. na podršci. ■

LITERATURA

Božičević, S. 1978. Tunel Učka – Speleološka istraživanja nabušanih kaverni (Stacionaža 1+475 1+630 Kvarnerska strana). Izvještaj. Fond Geol. zavoda. Zagreb.

Božičević, S. 1985. *Morfogeneza speleoloških pojava Istre i njihova zavisnost o geološkim i hidrogeološkim uvjetima na primjeru nabušene Kaverne uz tunel Učka*. Disertacija. Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu. Zagreb.

Dukarić, F.; Biondić, R.; Biondić B. 1999. Zaštitne zone izvorišta pitke vode na padinama Učke – Hidrogeološki istražni radovi. Izvještaj. Arhiv IGI. Zagreb.

Glavaš, I. 2021. Pozadina jedne ideje: Sustav Zračak nade 2 – Kaverna u Tunelu Učka. *Subterranea Croatica*. 19(30).

Kuhta, M.; Matičec, D.; Stroj, A. 2005. Vodoistražni radovi na izvorištu Kristal u Opatiji. Izvješće druge faze

istraživanja. Hrvatski geološki institut. Zagreb.

Kukuljan, L. i Grozić, D. 2019. Speleološka istraživanja podzemnih sustava povezanih sa zahvatom u tunelu Učka. Neobjavljeni elaborat. Naručitelj: Hrvatske vode. Izvođač: Arbos d.o.o. Pazin.

Kukuljan, L. i Grozić, D. 2021. Sustav Zračak nade 2 – Kaverna u tunelu Učka. *Subterranea Croatica*. 19(30).

Luetscher, M. i Jeannin, P.-Y. 2004. Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*. 2(2): 9.

Moore, D. 2005. Slug Injection Using Salt in Solution. *Streamline – Watershed Management Bulletin*. 8 (2): 1–6.

Searcy, J. K. 1959. *Manual of hydrology; part 2, Low-flow techniques*. US Geological Survey Supply Paper W.

Srebrenović, D. 1986. *Primijenjena hidrologija*. Tehnička knjiga. Zagreb. 510 str.

EXPLORE, UNDERSTAND AND PROTECT – ON SPELEOLOGICAL AND HYDROLOGICAL RESEARCH IN THE UČKA CAVE SYSTEM, CROATIA

Abstract: Karst aquifers, vulnerable to salinization and overexploitation, experience unfavorable trends due to climate change, with significant socio-economic and environmental consequences. A thorough understanding of the structure of a karst aquifer and its functioning is crucial for its effective protection. The most effective strategy to reduce the unpredictability associated with this hydrological 'black box' is to conduct research and measurements directly in the system and not just at its inputs and outputs. This study presents the results of hydrological monitoring of a cave stream in the Učka Cave System, which has been a reliable source of water for over 40 years. In addition, speleological explorations have mapped the underground hydrological network and also revealed a significant extension of the cave, providing opportunities for improved management of existing and potential discovery of new water resources.

Key words: karst hydrology, speleology, groundwater dynamics, water resource, cave system

FORSCHEN, VERSTEHEN UND SCHÜTZEN – SPELÄOLOGISCHE UND HYDROLOGISCHE FORSCHUNGEN IM SPÄLEOLOGISCHEN SYSTEM ZRAČAK NADE 2 – HÖHLE IM UČKA-TUNNEL

Zusammenfassung: Karstgrundwasserleiter, die anfällig für Versalzung und Übernutzung sind, unterliegen aufgrund des Klimawandels ungünstigen Veränderungen, was zu erheblichen sozioökonomischen und ökologischen Folgen führt. Um ihren wirksamen Schutz zu gewährleisten, ist es wichtig, die Struktur und Funktionsweise dieser Grundwasserleiter gründlich zu verstehen. Der beste Weg, die mit dieser hydrologischen "Black Box" häufig verbundenen Unvorhersehbarkeiten zu verringern, besteht darin, Untersuchungen und Messungen direkt im Karstuntergrund und nicht nur an den Zu- und Abflüssen durchzuführen. In diesem Artikel werden die Ergebnisse der hydrologischen Überwachung der unterirdischen Strömung im speläologischen System Zračak nade 2 – Höhle im Učka-Tunnel vorgestellt, die schon seit mehr als 40 Jahren eine zuverlässige Trinkwasserquelle ist. Die speläologischen Untersuchungen haben auch das unterirdische Gewässernetz kartiert und eine erhebliche Erweiterung des Systems festgestellt, was neue Möglichkeiten für eine bessere Bewirtschaftung vorhandener Wasserressourcen und für eine potenzielle Entdeckung neuer Wasserressourcen eröffnet.

Schlüsselwörter: Karsthydrologie, Speläologie, Grundwasserdynamik, Wasserressourcen, Höhlensystem

