

SPELEORONJENJE, ZNAČAJAN METOD ISTRAŽIVANJA I ZAŠTITE PODZEMNIH VODA U KARSTU

Saša MILANOVIĆ, dipl. ing. geologije
Rudarsko-geološki fakultet, Institut za hidrogeologiju
Đušina 7, 11 000 Beograd

REZIME

U hidrogeološkim, inženjersko-geološkim i hidrotehničkim zahvatima u karstu a vazanim za podzemne vode, karstne kanale, vrela i ponore, speleoronjenje je jedina istraživačka metoda koja omogućuje direktno osmatranje, proučavanje i egzaktno geološko kartiranje karstnih kanala i kaverni. Podaci prikupljeni tokom speleoronilačkih istraživanja znatno doprinose rekonstrukciji evolucije karstnog procesa u određenom regionu što je veoma značajno kod procene dubine karstifikacije i određivanja dominantnih pravaca kretanja podzemnih voda. U poslednjih trideset godina samo na području Srbije i Crne Gore je istraženo više od 40 izvorskih sifona, aktivnih pećinskih kanala i ponora od strane speleoronioaca.

Pored istraživanja za pomenute svrhe, zaštita karstnih podzemnih voda sve više dobija na značaju kao jedan od ključnih parametara regionalnog planiranja i razvoja karstnih regiona. Jedan od aspekata zaštite koji je potpuno zanemaren, je i uticaj brojnih čovekovih aktivnosti na endemske vrste koje naseljavaju potopljene karstne kanale. Zahvaljujući speleoronjenju omogućeno je osmatranje i proučavanje nekih od ovih vrsta neposredno, u njihovom prirodnom ambijetu. Pored čovečije ribice (*Proteus anguinus*) i ribe gaovice (*Paraphoxinus ghetaldi*) jedan od "najčešćih" stanovnika je i amfipoda-račić (iz reoda *Nipharus*) koja je tokom dosadašnjih speleoronilačkih istraživanja karsta Dinarida pronađena i snimljena na više lokaliteta.

Zaštita speleofaune i njenih endemskih vrsta je direktno povezana sa zaštitom podzemnih voda. Nažalost, delom zbog neobaveštenosti, a delom i zbog neodgovornosti, opstanak ovih vrsta je sve više ugrožen.

Ključne reči: karst, speleoronjenje, vodosnabdevanje, speleofauna, zaštita

UVOD

Cilj istraživanja podzemne karstne morfologije može da bude veoma raznovrstan, počev od želje za otkrivanje novog i nepoznatog, pa preko istraživanja u turističke svrhe, do isključivo naučnih ispitivanja i ispitivanja koja su vezana za rešavanje konkretnih hidrotehničkih problema. Tako, speleoronjenje (jedine direktne istraživačke metode podzemne morfologije karsta ispod nivoa podzemne vode i sifona ispunjenih vodom) se često koristi kao istraživačka metoda u hidrogeološkim i hidrotehničkim istraživanjima za potrebe vodosnabdevanja, i zaštite podzemnih voda, kao jedine metode koja omogućuje direktno osmatranje, proučavanje i egzaktno kartiranje karstnih kanala i kaverni. Duboke jame kao i neke pećine se mogu koristiti za osmatranje oscilacija nivoa podzemnih voda i kao osmatrački objekti kod traserskih eksperimenata.

ŠTA JE SPELEORONJENJE ?

Speleoronjenje je grana speleologije tj. istraživačka disciplina koja se bavi istraživanjem podzemnih morfoloških oblika u karstu ispunjenih vodom. Speleoronjenje (speleodiving, cave diving) je relativno mlada istraživačka disciplina čiji je razvoj uporedo napredovao sa razvojem opreme za scuba i komercijalna ronjenja, a početak je vezan za početak rekreativnog ronjenja. Može se reći da je speleoronjenje "naučna, istraživačka i sportska disciplina" koja pruža izuzetno velike mogućnosti u hidrogeološkim istraživanjima karsta, tj. pruža najtačnije podatke o rasprostranjenju karstnih kanala ispunjenih vodom. Speleoronilačke aktivnosti se generalno mogu podeliti u tri grupe:

- Ronjenje karstnih vrela
- Ronjenje sifonskih kanala - ronjenje u pećinama
- Ronjenje u morskim speleološkim objektima

Pored gore navedene grube podele speleoronilačkih aktivnosti one se još dele i po: dubini, položaju (horizontalni i verikalni kanali), temperaturi vode, vidljivosti, udaljenosti sifonskog kanala od ulaza u speleološki objekat itd.

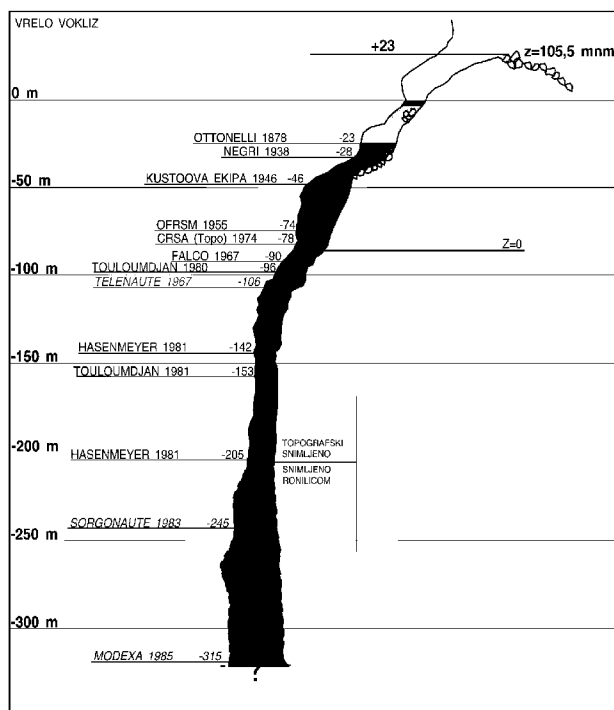
Pored nedvosmislene vrednosti speleoloških istraživanja već na samom početku ozbiljnijih istraživanja pojavile su se prepreke, u vidu vodenih ispuna (sifona), koje su onemogućavale dalje napredovanje i istraživanje. Sa pojavama takvih prepreka počelo se sa istraživanjima i otkrivanjima načina za njihovo savladavanje.

Verovatno jedan od prvih dokumentovanih pokušaja "speleoronilačke" aktivnosti seže u 1773 godinu, kada je Englez Gosp. Dej u pećini Pik pokušao da "na dah" preroni sifon. Prvi pokušaj ronjenja u karstnom vrelu zabeležen je na Voklizu kada je Nello Ottonelli uspeo da zaroni do dubine od 23 m. Novembra 1880-e godine Lambert je sa prototipom današnjeg ribridera preronio do kraja Severn tunela i time prešao distancu od 300 m da bi zatvorio vrata i sprečio dalje plavljenje tunela, tako da se može reći da je to bio prvi speleoronilački zahvat u hidrotehnici. Sledeći zabeležen pokušaj datira iz 1922 godine kada je Francuski istraživač Norbert Casteret uspeo da preroni dva kratka sifona (Grotte Du Montespan). To je ujedno bilo i prvo otkriće suvog pećinskog sistema iza vodene prepreke (sifona). Tada se (pre 82 godina) po prvi put i uvideo značaj speleoronilačkih istraživanja. Zatim je usledilo pojavljivanje ronilačke opreme "teški ronionci" i prvi uspeši u speleoronilačkim istraživanjima kao npr. u Grote Du Creugenat (Francuska) gde je 1934 godine uspešno proronjen sifon dužine 95 m.

Savremeni period speleoronjenja počinje sa izumom autonomnog ronilačkog sistema poznatog kao "Aqualung" 1943 godine od strane Emila Ganjana i Žaka Kustoa.

Godinama kasnije speleoronjenje se razvijalo veoma brzo da bi krajem osamdesetih godina od strane Kloda Touloumdjian i Jona Hasenmayer Vokliško vrelo bilo ispitano do dubine od 205 m (slika 1). Devedesetih godina se zakoračile korak dalje što se ogleda i u velikim dužinama proronjenih kanala, 5506 m u Vokula vrelu (US) (1998) sa prosečnom dubinom ronjenja od -87 m, kao i duboka ronjanja kada je Nunjo Gomez zaronio do dna V. Bushmansgat 1996 godine do dubine od -282 m. Zaron je trajao dvanaest sati i tokom ronjenja promenjeno je osam mešavina kao medija za

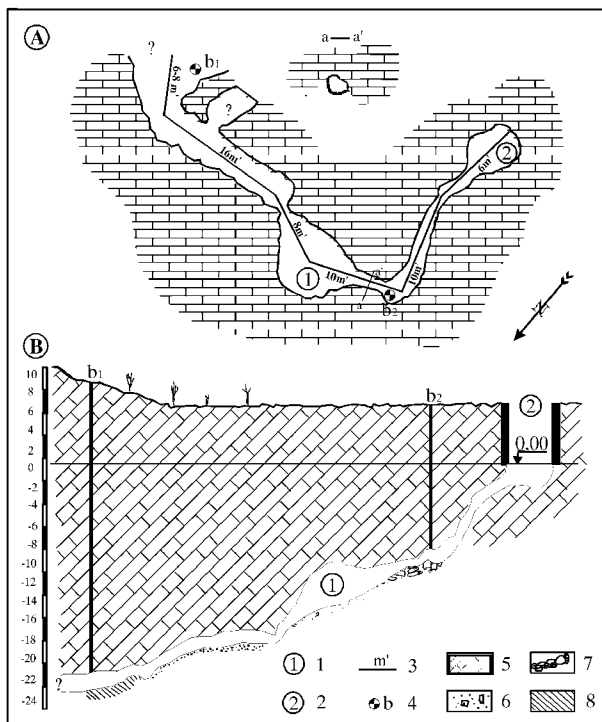
disanje. Takođe su istraženi i najveći podvodni pećinski sistemi od kojih treba izdvojiti Ox Bel Ha u Meksiku sistem sa od 96.800 km kanala.



Slika 1. Profil Vokliškog vrela sa etapama istraživanja

Uparedo sa razvojem ronilačke opreme razvijala se podvodna robotika (ronilice), pa je tako sa ronilicama tipa "Sorgonaut" i "Modexa" Vokliško vrelo ispitano do dubine od -315 m a pri tome se nije stiglo do njegovog dna (slika 1).

Počeci speleoronjenja na našim prostorima uglavnom se vezuje za ime Bože Paljetka koji je izveo niz speleoronilačkih zarona u poznatim karstnim vrelima i ponorima Dinarida, većinom u delu Crnogorskog i Hercegovačkog karsta. Njegovi rezultati poslužili su kao osnova za nova brojna speleoronilačka istraživanja, ali i kao nezamenjive hidrogeološke podloge za razne vrste istraživanja, npr. istraživanje vrela Opačica za vodozahvat Herceg Novog, slika 2, (Paljetak 1969). U fazi projektovanja reverzibilne HE Čapljine Paljetak je obavio veći broj ronjenja u ponore Popovog polja, a u toku realizacije objekta angažovan je na sprečavanju prodora vode u odvodni tunel na dubini oko -32 m ispod nule.



Slika 2. Vrelo Opačice A-plan, B-profil (B. Paljetak 1969)

O PRIMENI SPELEORONILAČKIH ISTRAŽIVANJA

Veoma složena hidrogeološka problematika karsta a posebno pravci i zone preraspodele voda u podzemlju još nisu u dovoljnoj meri razjašnjeni. Mnogobrojni pokušaji koji su do sada preduzimani da se upozna složen i kompleksan rezim karstne izdani, često nisu dali zadovoljavajuće rezultate. Pa čak i posle detaljnih i kompleksnih proučavanja geoloških, hidrogeoloških, hidroloških i geomorfoloških karakteristika neke zakonitosti karstne hidrogeologije i cirkulacije podzemnih voda u karstu su ostale nedovoljno jasne. Razmatranje hidrogeoloških odnosa, prostornog rasporeda, međusobne povezanosti i cirkulacije podzemnih voda u jednoj takvoj sredini više je nego teško i vezano je nekad sa dosta pretpostavki, a malo utvrđenih činjenica.

Speleologija i speloronjenje kao direktne metode istraživanja karstne podzemne morfologije i hidrogeologije neophodne su i u rešavanju praktičnih geoloških, hidrogeoloških i hidrotehničkih problema vezanih za izgradnju brana, gubljenje voda iz akumulacija, izradu tunela i podzemnih prostorija, a posebno kod vodozahvata i zaštite podzemnih karstnih voda i njihove specifične faune.

Nažalost sve gore navedeno iako ustanovljeno i potvrđeno nizom značajnih istraživanja u svetu, do danas ne nalazi veću zastupljenost u primenjenim istraživanjima karsta kod nas. Još uvek prisutna skeptičnost prema ovoj istraživačkoj metodi govori o veoma slaboj obaveštenosti stručne i privredne javnosti o velikim mogućnostima ovog vida istraživanja.

SPELEOGENEZA KARSTNE PODZEMNE MORFOLOGIJE (INICIJALNA FAZA)

Jedan od glavnih uslova za odvijanje speleogenetskog procesa je da podzemna voda mora da formira podzemne kanale-provodnike pre nego matična stena bude uklonjena površinskom erozijom. Da bi se takav proces odvio neophodna je velika količina dovoljno agresivne vode kao i prilično ujednačen podzemni tok velike energije.

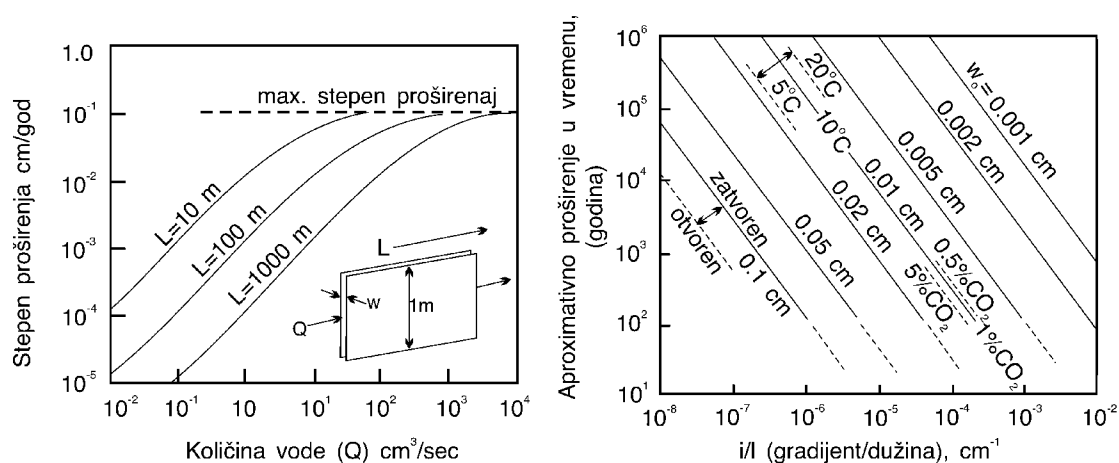
Početne faze nastanka karstnih provodnika se odlikuju veoma malim količinama voda u dubljim delovima, uskim pukotinama i prslinama kroz koje se voda kreće, kao i veoma mali hidraulički gradijent. Proširenje tih kanala je u direktnoj sprezi sa pripovršinskim delovima terena, koji se u ovoj fazi brže razvijaju (epikarst), da bi kasnije upravo oni služili za usmeravanje tokova u dublje delove izdani.

Početna faza nastanka karstne izdani odlikuje se potpunom zasićenošću kalcitskim i dolomitičnim rastvorom pre njihovog ponovnog pojavljivanja na površini. Totalna količina stenske mase uklonjena duž bilo kakvog podzemnog toka je gotovo nezavisna od hemijske rastvorljivosti, budući da voda ima dovoljno vremena da se uravnoteži sa stenom, još jednom zaviseći od stepena rastvorljivosti.

Stepen zasićenosti zavisi od procenta, onosno čistoće rastvorljivih minerala, koncentracije CO₂, tipa karstnog sistema (otvoreni ili zatvoreni) i temperature.

Razviće podzemnih provodnika prelazi u sledeću fazu onog trenutka kada se čitavom dužinom uspostavi tok. Od tog trenutka počinje "ubrzan" proširivanje tj. razvoj podzemnih kanala koji po proračunu iznose između 0,001 i 0,01 cm/god (Palmer, 2003). U ovoj fazi sve je značajniji proces fizičkog razaranja stene i abrazije.

Na slici 3a. je prikazan stepen povećanja idealnog provodnika u funkciji od količine vode i dužine provodnika. Budući da ne postoji uniformni stepen proširenja kanala, aproksimirano se može prikazati njihovo povećanje u zavisnosti od raznih faktora (slika 3b).



Slika 3. A-Glavni stepen proširenja pukotina u krečnjaku, u funkciji količine vode (Q) i dužine toka (L). Q=količina vode po metru inicijalne pukotine. Odnosi se na zatvoreni sistem, $T=10^\circ\text{C}$, $P_{\text{CO}_2}=0,01\text{ atm}$. (Palmer 2000).

B- Aproximativno proširenje "breakthrough" u vremenu. Na grafiku su vrednosti za zatvoreni sistem na $T=10^\circ\text{C}$ i $P_{\text{CO}_2}=1\%$, kao i ostale varijacije u odnosu na vrstu sistema i temperature (Palmer 2000).

Prema kompjuterskom modelu (Palmer, 1988., 1991. i Dreybrot, 1996.) može se pratiti širenje "razvoj" idealnog karstnog provodnika sa definisanom širinom (poprečni presek), dužinom, hidrauličkim gradijentom i hemijskim karakteristikama. Takav model pokazuje da je vreme širenja aproksimativno proporcionalan w^{-3} (i/L) $^{-1.4}$ P^{-1} , gde je w -prečnik ili širina inicijalnog provodnika, i -hidraulički gradijent, L -dužina toka i P -inicijalni P_{CO_2} .

Laminarni tok kroz ovakve provodnike je proporcionalan w^{-3} i , što je osnova promene dve najvažnije promenljive koje karakterišu vreme širenja. Visoki pritisci CO_2 su takođe od velikog uticaja, sve do trenutka kada se CO_2 odvoji i izgubi kao gas.

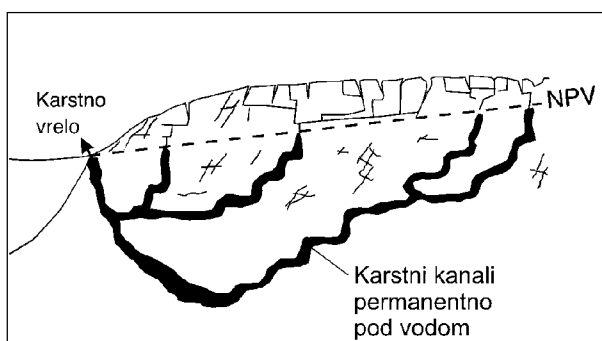
Temperatura ima veoma kompleksnu ulogu u procesu širenja kanala. Viša temperatura ubrzava hemijske reakcije, ali u dugim podzemnim tokovima tj. velikim sistemima ona može da ubrza širenje kanala u gornjim sistemima, zapravo da se dužinom toka tj. u nižim delovima gubi i smanjuje njeno dejstvo. Kako je prikazano na slici 3. brzina širenja karstnih kanala se povećava i do 5 puta u slučaju da se CO_2 utrošen u rastvaranje karbonatne stene, tj. dođe do brze zamene kao na primeru kada je voda u bliskom kontaktu sa nekim izvorom CO_2 . Ovakav postupak je veoma redak, pa se tako uglavnom početne faze nastanka karstnih provodnika vezuju za zatvorene sisteme, gde se CO_2 istroši u rastvaračkom postupku. U otvorenim sistemima a pod direktnim uticajem atmosferskih voda, CO_2 se često gubi već u kontaktu padavina i površi terena.

Iz gore navedenog može se reći da bi za pukotinu veličine 0,01 do 0,1 cm bilo potrebno nekoliko hiljada ili pak desetina hiljada godina da bi dostigla maksimalni stepen proširenja od trenutka kada je voda prvi put ušla u karbonatnu stenu. Npr. pukotina dužine 1 km, sa inicijalnom širinom 0,02 cm i hidrauličkim gradijentom od 0,02 (20 m/km), P_{CO_2} od 0,05 atm. i temperaturom od 10°C , u zatvorenom sistemu, maksimalni stepen proširenja će biti ostvaren za 30 000 godina.

Veoma je bitno razumeti da evolucija kao i speleogeneza karstne izdani predstavljaju ključ za razumevanje hidrodinamike karstnih izdani i njihov razvoj. Jednom kada voda sa površine prodre u karstno podzemlje njeno dalje poniranje, usmeravanje i akumuliranje preuzimaju podzemni karstni oblici u vidu pukotina, prslina, kaverni i kanala. S druge strane, pod pritiskom podzemnih voda u karstnoj izdani, odvija se stalni proces smanjenja kohezije i trenja među stenskim blokovima, što pospešuje rušenje tavanica i abraziju kanala u aktivnim ili povremeno aktivnim speleološkim objektima. Karbonatna povlata koja je izložena stalnom smanjenju debljine, bilo odozdo prema gore urušavanjem, bilo odozgo prema dole korozijom, erozijom i udubljanjem vrtača, lokalno je podložna kolapsiraju otvarajući i čineći dostupne speleološke objekte za istraživanje. Tako se može reći da speleogenetski procesi imaju važnu ulogu u formiranju i snižavanju karstnog reljefa.

PRIMERI ISTRAŽIVANJA U CILJU KAPTIRANJA KARSTNIH PODZEMNIH VODA

Kada se govori o zahvatanju podzemnih voda u karstu a na bazi speleoronilačkih istraživanja obično se misli na dva tipa karstne izdani ili shodno tome na dva tipa istraživanja.



Slika 4. Duboka sifonalna cirkulacija voda karstne izdani

Prvi i verovatno najznačajniji tip istraživanja je istraživanje dubokih sifonskih karstnih vrela. Razviće podzemnih morfoloških oblika duboko u karstnoj izdani, tj. znatno niže ispod nivoa podzemnih voda (slika 4.) je veoma zastupljeno a sa druge strane je i

veoma značajno kada se radi o zahvatanju karstnih voda. Značaj ovakvog tipa karstne izdani se prvenstveno ogleda u značajnim količinama podzemnih voda dostupnih za zahvatanje i veoma povoljnim uslovima kada se radi o kvalitetu voda, pre nego li ona dospe na površinu ili pak blizu površine.

Kada se govori o dubokim sifonalnim karstnim vrelima uglavnom se misli na karstna vrela većih izdašnosti ali i značajnih kolebanja izdašnosti. Pa ipak se veoma često i ne predpostavlja da su vode koje se dreniraju kroz ove sisteme samo prelive ogromnih podzemnih akumulacija i da je značaj ovakvih karstnih izdani upravo u zahvatanju i korišćenju voda iz dubokih delova izdani.

Nažalost, relativno je malo podzemnih morfoloških oblika ovog tipa koji su dobro istraženi. Ovakve podzemne oblike uglavnom srećemo u vidu sifonskih "vokliških" vrela, veoma zahtevnih sa stanovišta speleoronilačkih istraživanja. Dubine zaleganja kanala iznose od nekoliko desetina pa do nekoliko stotina metara, a jedan od najpoznatijih primera je upravo Vokliško vrelo (slika 1) u Francuskoj. U Srbiji i Crnoj Gori je poznat veći broj vrela (do sada speleoronilački istraženih) sa dubokim zaleganjem karstnih kanala tabela 1.

Tabela 1. Istražena (ili delimično istražena) karstna vrela sa dubokom sifonalnom cirkulacijom u Srbiji i Crnoj Gori

Srbija

Naziv vrela	Lokalitet	Dužina istraženih kanala	Dubina istraženih kanala	Broj sifona	Mogućnost daljih istraživanja
Vrelo Mlave	Žagubica	120 m	73 m	1	moguće istraživanje
Vrelo Krupaje	Beljanica	150 m	72 m	1	moguće istraživanje
Vrelo Krupac	Niš	170 m	86 m	1	nemoguće istraživanje
Vrelo	Pirot	65 m	30 m	1	moguće istraživanje
Topilo	Niš	50 m	22 m	1	moguće istraživanje

Crna Gora

Naziv vrela	Lokalitet	Dužina istraženih kanala	Dubina istraženih kanala	Broj sifona	Mogućnost daljih istraživanja
Opačica	Herceg N.	58m	22m	1	moguće istraživanje
Sopot	Risan	350m	42m	2	moguće istraživanje
Spila	Risan	270m	52m	3	moguće istraživanje
Ljuta	Orahovac	70m	133m	1	moguće istraživanje
Gurdić	Kotor	460m	52m	2	moguće istraživanje
Krvenica	Tuzi	250m	50m	1	moguće istraživanje
Gornopoljski vir	Nikšić	80m	63m	1	moguće istraživanje
Obošničko oko	Nikšić	130m	37m	1	moguće istraživanje
Vilina pećina	Petrovac	100m	42m	1	moguće istraživanje

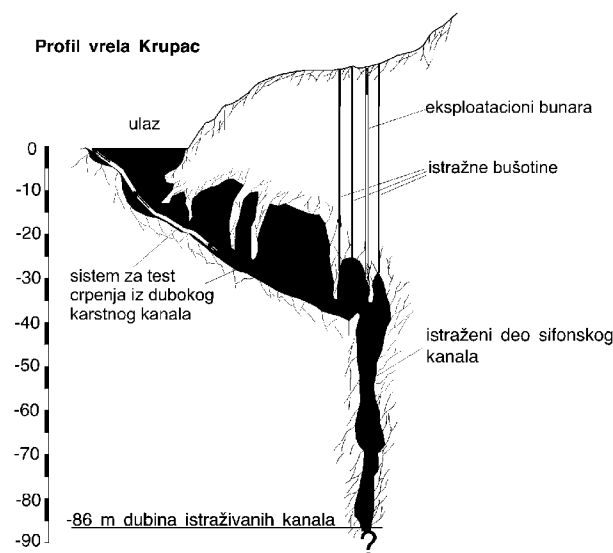
Drugi tip istraživanja se odnosi na istraživanja karstnih kanala velikog horizontalnog a malog vertikalnog rasprostranjenja. Za ovu teoriju je karakteristično da je za nastanak pećina najpovoljnija zona nivoa podzemne vode, tj. da se radi o karstnim kanalima koji se nalaze o zoni kolebanja nivoa podzemnih voda.

U sklopu istražnih radova za kaptiranje izvora Krupac kod Niša speleoronjenje je dalo ključni doprinos. Speleoroniooci firme za podvodne radove Aqua Mont iz Beograda su istražili i uradili nacrt glavnog izvorskog karstnog kanala u dužini 170 m, do dubine 86 m u odnosu na preliv izvora, odnosno preko 100 m ispod površine terena. Na osnovu tog nacrtu definisana je lokacija privremenog vodozahvata tj. istražno eksploatacione opreme, direktno iz karstnog kanala. Postavljanjem dve pumpe kapaciteta 2x200 l/s na dubinu od 30 m omogućilo je da se u višegodišnjem periodu tj. u minimumima izvedu testovi crpenja i time se dobiju podaci o raspoloživim količinama voda. Time je omogućeno da se u sušnom periodu crpe statičke rezerve, odnosno da se minimalni kapacitet višestruko uveća i ujedno saznaju prave rezerve Krupačke izdani.

Pošto su opitima dokazane raspoložive količine voda na osnovu speleoronilačkih podataka su projektovane istražne bušotine sa ciljem da se sa površine uđe u glavni kanal. Tok istražnog bušenja dve istražne bušotine (jedna kao kontrolna) bio je praćen i verifikovan nadzorom interne televizije čija se kamera spuštala kroz "open hole" i markirala svetlo spuštenu kroz drugu istražnu bušotinu. Veoma precizno snimljena topografija potopljenog karstnog kanala, njeno tačno povezivanje sa površinskom geodezijom kao i kvalitetna izrada istražnih bušotina omogućili su precizno definisanje lokacije eksploatacionog bunara. Bunar je ušao u glavni vertikalni kanal i omogućio postavljanja pumpe na dubinama do 65 m. Postavljanjem pumpe na ovim dubinama i precrcpljivanjem vrela u sušnom periodu biće omogućeno znatno povećanje minimalnog kapaciteta izvorišta a time i značajno poboljšano vodosnabdevanje Niša u malovodnim periodima. Na slici 5. je prikazan profil Krupačkog vrela sa sistemom za testiranje izdašnosti vrela direktno iz karstnog kanala kao i pozicija izvedenih istražnih bušotina i bunara.

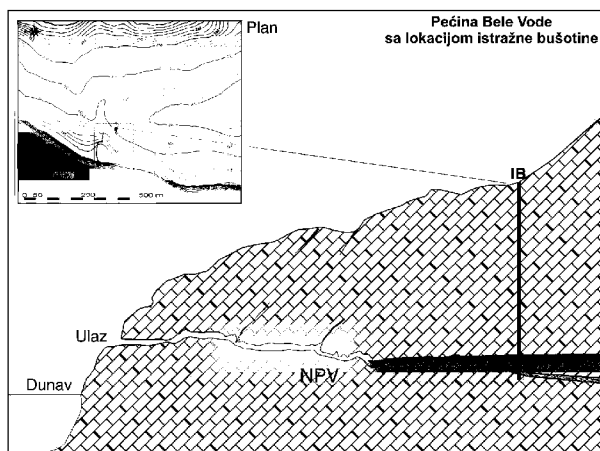
Jedan od veoma karakterističnih primera speleoronilačkih istraživanja u karstu je istraživanje pećine Bele Vode i njenih potopljenih kanala. Tokom dosadašnjih speleoloških istraživanja kao i rekognosciranja terena karstne oaze Miroč, istraženo je ili rekognoscirano više od 30 speleoloških objekata. Jedan deo ovih objekata je bilo neophodno detaljno

istražiti i sa takvim podacima steći jasniju sliku o razvijenosti aktivnih karstnih kanala. U toku 2000. i 2001. godine, izvedena su namenska speleološka, speleoronilačka i hidrogeološka istraživanja pećine Bele Vode, kao najreperezentativnijeg podzemnog morfološkog objekta kojim se ulazi u drenažni sistem karstnog masiva Miroč. Istraživanja ovog speleološkog objekta izvedena su u više faza koje se generalno mogu podeliti u dve faze: istraživanje suvih kanala i istraživanje potopljenih karstnih kanala. Pećina Bele vode je zapravo deo aktivnog pećinskog izvorskog sistema, čiji su niži nivoi bili pristupačni pre podizanja kote Dunava kod Đerdapa. Nakon podizanja nivoa Dunava, niži aktivni kanali ove pećine, našli su se pod vodom, tako da je najviši fosilizovani kanal sada postao povremeno aktivan.



Slika 5. Profil vrela Krupac – sa položajem pumpi za testiranje bunara, istražnih bušotina i eksploatacionog bunara

Speleoronilačkim istraživanjima utvrđeno je da je pećina Bele vode razvijena po rasedu i sistemu pukotina generalno upravni na klisuru Dunava, sa generalnim pravcem pružanja suvih i potopljenih kanala 285°-105°. Ukupna dužina do sada poznatih kanala iznosi 285 metara, od čega je 125 m aktivnih (vodenih) kanala. Suvi deo objekta Bele Vode se završava sa dva sifonska jezera od kojih je samo jedan pristupačan za speleoronilačko istraživanje dok je drugi isuviše malih dimenzija za dalje napredovanje. Ronjenjem ovog kanala je potvrđena pretpostavka da Bele Vode pripadaju glavnom drenažnom sistemu Miroča. Kanal je promenljivih gabarita od metarskih dimenzija pa do veoma uskih prolaza (slika 6.).

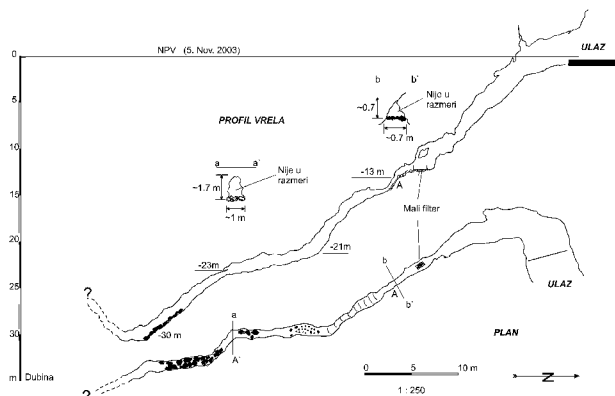


Slika 6. Profil pećine Bele Vode sa situacionom kartom i položajem istražne bušotine

Na bazi ovih istraživanja predložen je optimalni vodozahvat podzemnih voda na lokalnosti Bele Vode i to izradom vertikalnog vodozahvata sa površine terena, na udaljenju oko 400 m od Dunava, odnosno od potopljenog vrela Bele Vode.

Na osnovu rezultata speleoronilačkih ispitivanja i precizno snimljene morfologije kanala i pravaca kretanja podzemnih voda, te njihove projekcije na površinu terena određena je najpovoljnija lokacija za izradu istražnih bušotina, a potom i eksploatacionih bunara (slika 6.).

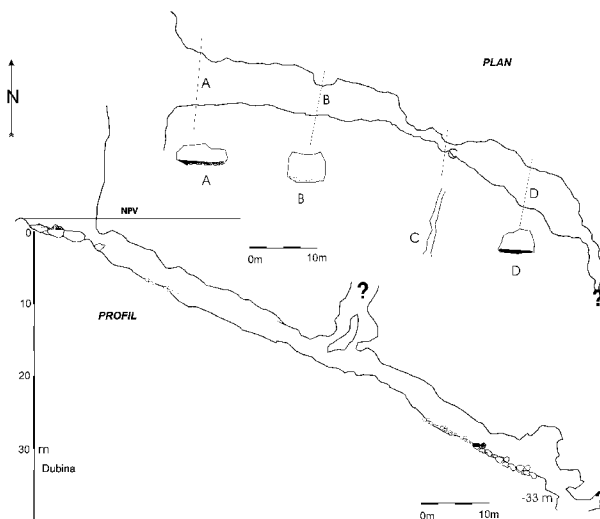
Ovako lociran bunar omogućuje da se pored dinamičkih rezervi ovog dela karstne izdani Miroča zahvati i deo statičkih rezervi u periodu kada crpljenje samo dinamičkih rezervi ne zadovoljava potrebe.



Slika 7. Istraženi kanali vrela Sekerpinari 1

Kao nezaobilazna metoda speleoronilačka istraživanja su se pokazala na vrelu Sekerpinari u Turskoj (slika 9). Vode ovog vrela koristi multinacionalna kompanija Danone za flaširanje. Sekerpinari vrela pripada tipu takozvanih Vokliških ili karstnih sifonskih vrela. Velika karstna izdan vrela Sekerpinari se drenira kroz dva kanala na veoma bliskom rastojanju Sekerpinari 1 i 2 (Slika 7,8.). Prema rezultatima speleoronilačkih istraživanja oba kanala se spuštaju na dubinu oko 30-35 m ispod nivoa pražnjenja, i predmet su detaljnih istraživanja.

Mutnoća predstavlja generalno najveći problem i limitirajući faktor flaširanja karstnih voda, a predstavlja čestu pojavu nakon intenzivnih padavina.



Slika 8. Plan i profil vrela Sekerpinari 2

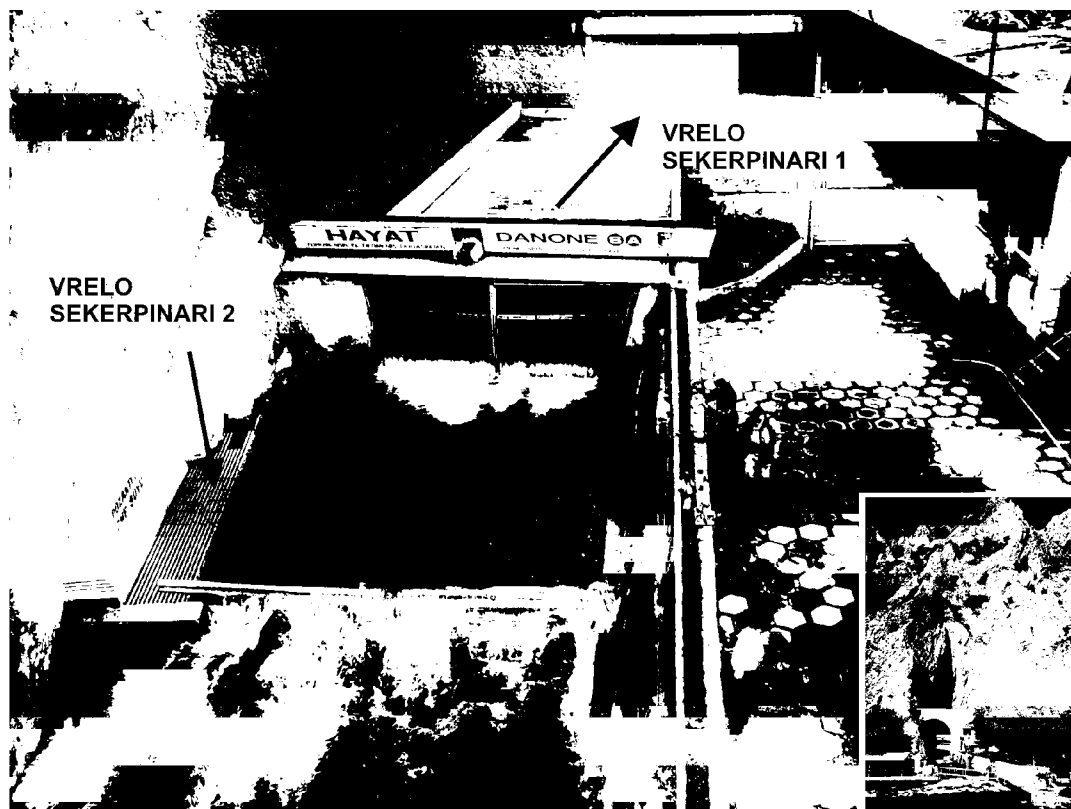
Povećanje mutnoće u oba kanala vrela Sekerpinari su uglavnom posledica suspendovanog materijala u gornjim delovima kanala sa znatno sporijim brzinama podzemnih tokova. Ova zapažanja su potvrđena tokom detaljnih speleoronilačkih istraživanja novembra 2003-će godine.

Shodno napred spomenutom dolazi se do zaključka da se u većini slučajeva problema zamućivanja karstnih vrela problemi mogu rešavati u više pravaca i to zaobilazeći skupe sisteme za prečišćavanje već jednostavno iskorišćavanjem prirodnih uslova pražnjenja, brzina u kanalima, preraspodele pritiska u zaleđu i njihov direktan uticaj na pražnjenje.

Dubokim speleoronilačkim istraživanjima se ustanovilo da migracija i sedimentacija suspendovanih čestica koje

prouzrokuju mutnoću zavisi prvenstveno od morfologije karstnih kanala. U suženim delovima kanala, sa niskim tavanicama, prisustvo suspendovanog materijala, a time i

mutnoća, se povećava da bi se na veoma malom rastojanju ponovo smanjivala, a gledajući po dubini gotovo i nestajala u kanalima velikih prečnika.



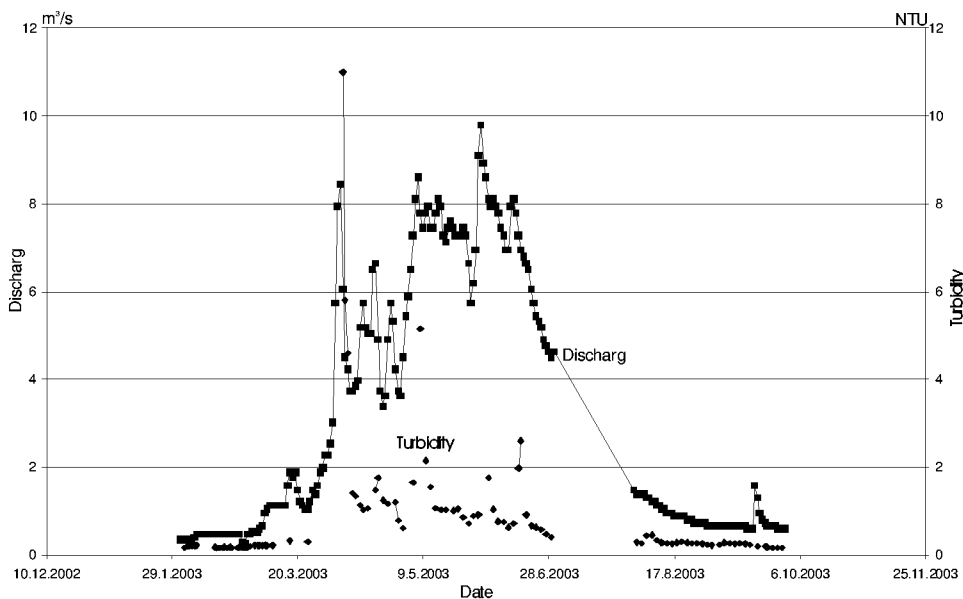
Slika 9. Karstno vrelo Sekerpinari u Turskoj

Osmatranjem karstnih kanala pri raznim brzinama proticaja utvrđeno je da mutnoća na vrelo nije posledica istovremene infiltracije površinskih voda i unošenja suspendovanih materijala. Potrebno je više vodnih talasa da bi se taj materijal transportovao do mesta isticanja. Interesantno je to da se u neposrednom zaleđu izvora ovaj materijal taloži uglavnom po tavanicama suženih delova kanala što nije u skladu sa činjenicom da su u tim delovima brzine veće a tečenje turbulentno. Samo pokretanje tog materijala zavisi od brzine tečenja u kanalu, a mutnoća je najveća kada, posle dugog sušnog perioda i male izdašnosti, dođe do naglog povećanja proticaja.

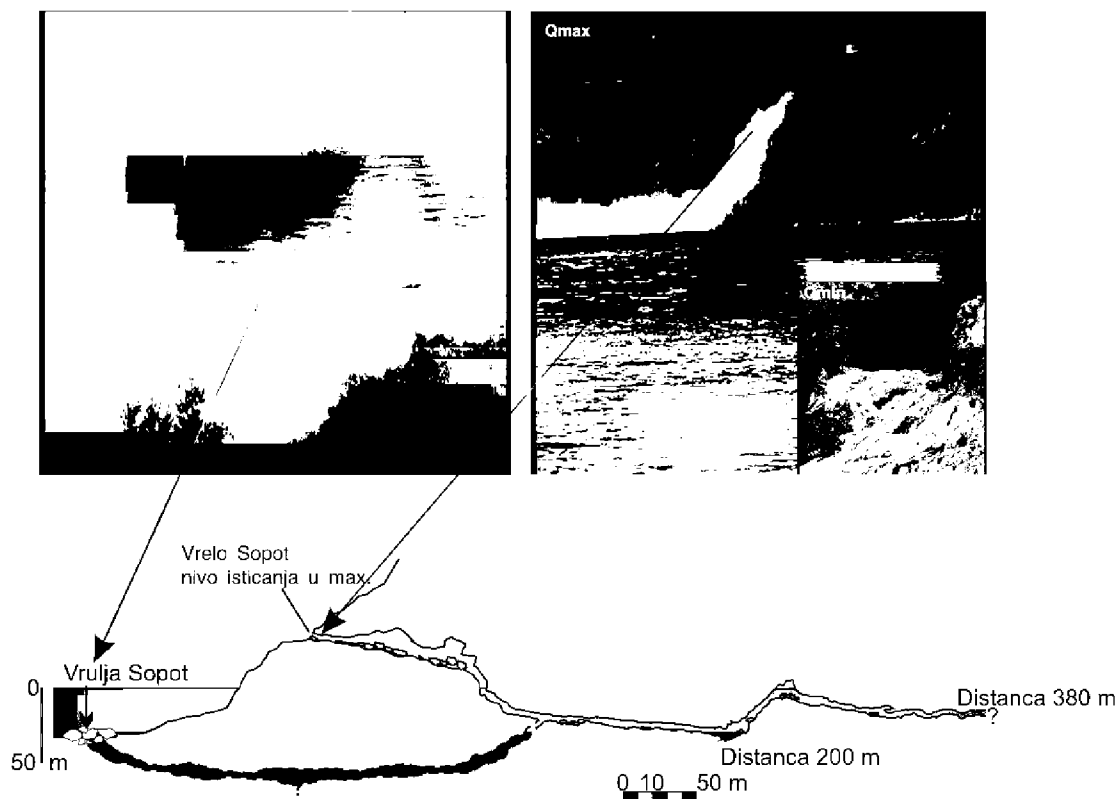
Na slici 10 je prikazana zavisnost mutnoće od izdašnosti vrela Sekerpinari. Analizirajući grafik jasno se uočava da je pojava mutnoće vezana za veće izdašnosti od 2 m³/s i da je već sa prvim povećanjem proticaja došlo do "ispiranja" najvećeg dela suspendovanog materijala.

Kasnije, u istom ciklusu velikih voda zamućenja nema ili je znatno manje čak i u slučajevima kada je isticanje na vrelu veće nego kod prvog talasa kada je registrovano najveće zamućenje.

Speleoronilačka istraživanja su uspešno primenjena za istraživanje dubokih sifonskih kanala vrela Gurdić, Orahovačka Ljuta, Sopot i Spila Risanska u Bokokotorskom zalivu, do dubina preko 130 m. Svi ovi podaci ukazuju na neophodnost daljih izučavanja sa ciljem da se prikupe validni podaci o granicama intruzije slanih voda u zaleđe Bokokotorskog zaliva, kao i novi podaci o mogućnostima zahvatanja podzemnih voda u karstnim kanalima dubokog zaleđa ovih vrela. Ova istraživanja mogu znatno da doprinesu uspešnijem rešavanju vodosnabdevanja ovog dela crnogorskog primorja. Na slici 11. prikazano je vrelo Sopot i nivoi njegovog pražnjenja.



Slika 10. Prikaz zavisnosti mutnoće od izdašnosti



Slika 11. Karstno vrelo i vrulja Sopot sa nivoima dreniranja u max. i min.

ZAŠTITA PODZEMNIH VODA I NJENE FAUNE KROZ PRIZMU SPELEORONILAČKIH ISTRAŽIVANJA

Zaštita karstnih podzemnih voda sve više dobija na značaju kao jedan od ključnih parametara regionalnog planiranja i razvoja karstnih regiona. Karstna sredina je neobično osjetljiva na bilo kakvu promenu prirodnih karakteristika, a njena reakcija na poremećaj je brza i često drastična.

Kompleksnost problema i osjetljivost karsta zahtevaju interdisciplinarni pristup, ali ključna profesionalna odgovornost leži na hidrogeolozima. Jedan od novih vidova istraživanja koji su značajno doprineli kako u poznavanju same karstne izdani tako i u rešavanju problema zaštite karstnih izdani su i speleoronilačka istraživanja.

Nova era u izučavanju karstnog podvodnog podzemlja gotovo da u celosti može da zahvali napretku opreme za ronjenje i ljudskom entuzijazmu i želji za otkrivanjem nepoznatog i nedostupnog.

Dugogodišnjim istraživanjem podzemlja došlo se do jedinstvenih korelacija i veza karstnih kanala, pukotina i prslina te njihovih uloga u održavanju podzemnih ekosistema.

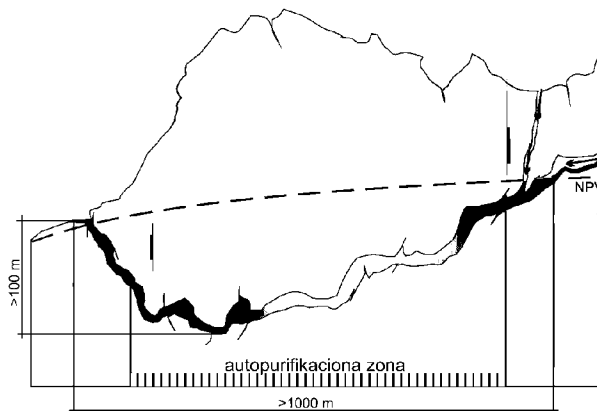
Postojeći koncepti zaštite podzemnih voda karstnih terena generalno se zasnivaju na dva ključna parametra: vremenu koje voda provede u podzemlju i rastojanju koje podzemna voda treba da pređe od mesta infiltracije do vodozahvatnog objekta.

Karstni sistemi generalno imaju dve jasno izražene tačke uticaja zagađenja bez mogućnosti prečišćavanja: prva – zona infiltracije, kroz ponore, ponorske zone ili pukotinske sisteme do zone potpune saturacije tj. zone nivoa podzemnih voda; druga – zona je zona dreniranja tj. zona gde na veoma malom rastojanju dolazi do mešanja podzemnih i površinskih voda neposredno pre isticanja kao i na samu zonu dreniranja u čijoj široj i dubljoj zoni postoje zone uticaja površinskih uslova.

Na slici 12. su shematski prikazane zone uticaja površinskih agenasa na podzemne vode i sem u izuzetnim slučajevima delimičnu i ograničenu autopurifikacionu zonu karstne izdani. Generalno, autopurifikaciona sposobnost karsta je veoma slaba.

Na slici 12. je prikazan onaj deo izdani posebno u zoni dreniranja koji se uglavnom kaptira a koji su daleko

izloženiji od dubljih delova karstne izdani. Samim tim zahvatanje dubljih horizonata uglavnom može da obezbedi i veću sigurnost u pogledu kvaliteta podzemnih voda.



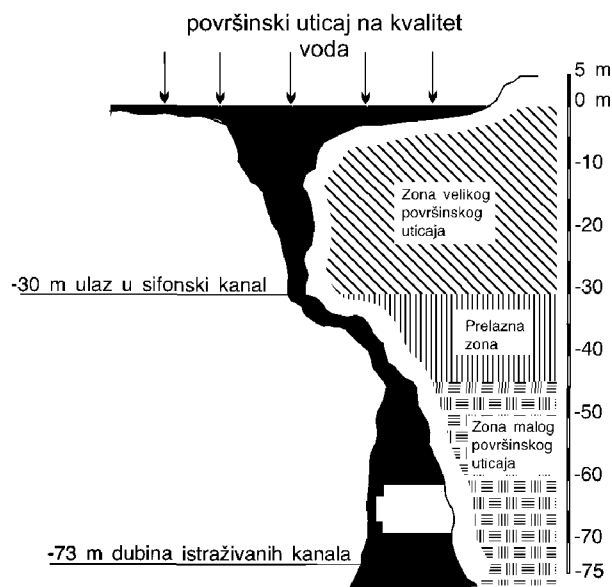
Slika 12. Shematski prikaz zona uticaja površinskog faktora kod duboke sifonske cirkulacije

Površinski uticaj u zonama poniranja i dreniranja podzemnih voda u slučaju dubokih sifonskih karstnih vrela kao izdani sa najinteresantnijim karakteristikama kod vodosnabdevanja mogu se izdvojiti na delove sa direktnim uticajem do dubina prodiranja dnevnog svetla, zatim prelazna zona koje čine kanali sa neposrednim ulaskom u karstnu izdan i delimičnom podložnošću spoljnih faktora i na kraju zona malog površinskog uticaja koja se sa dubinom i udaljenošću od zone dreniranja gubi i nestaje (slika 13.). Dimenzije, dubine i dužine kao i njihov uticaj na napred spomenuto zavise u onoj meri u kojoj morfološki mogu da odvoje sredine i daju im ulogu prirodnih zavesa od površinskog uticaja.

Radi što boljeg razumevanja specifičnosti zaštite karstne izdani, neophodno je poznavanje mnogih faktora, od kojih su sledeći naznačeni kao najznačajniji:

- prihranjivanje izdani je veoma brzo, a odvija se uglavnom kroz zone koncentrisane infiltracije. To su ponorske zone sa kapacitetom gutanja od par litara u sekundi do preko 100 m³/s;
- ogromne količine vode koje teku kroz karstne provodnike velike propusne moći;
- brzina podzemnog tečenja je velika, uglavnom preko 2 cm/s, a u pojedinim slučajevima iznosi 20 - 50 cm/s, što znači da je vreme zadržavanja u podzemlju vrlo kratko (u poređenju sa nekim nekarstnim izdanima gde je brzina podzemne vode od 10 do 100 m godišnje);

- hidrogeološka anizotropija karstne izdani je izuzetno naglašena, odnosno koncept elementarnog hidrogeološkog volumena nije primenljiv;
- proces vodozame u karstnoj izdani je veoma brz. U vlažnom periodu godine 50% do 100% zapremine izdani biva zamenjen novom vodom.
- i kao posledica svih nabrojanih karakteristika, karst ima veoma ograničenu sposobnost autopurifikacije.



Slika 13. Zone površinskog uticaja na primeru karstnog vrela Mlava

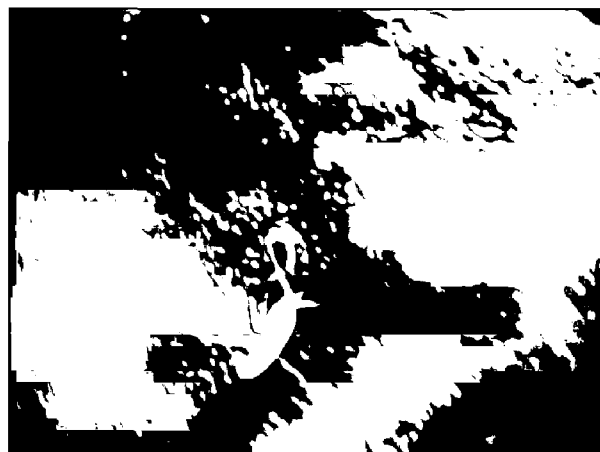
SPELEOFAUNA PODZEMNIH TOKOVA

Jedan od aspekata koji je potpuno zanemaren kod zagađenja i očuvanja podzemnih voda u karstu je i uticaj brojnih čovekovih aktivnosti na endemske vrste koje naseljavaju potopljene karstne kanale. Zahvaljujući speleoronjenju omogućeno je osmatranje i proučavanje nekih od ovih vrsta neposredno, u njihovom prirodnom ambijetu. Pored čovečije ribice (*Proteus anguinus*) i ribe gaovice (*Paraphoxinus ghetaldi*) jedan od "najčešćih" stanovnika je amfipoda-račić (iz roda *Nipharus*) koji je tokom dosadašnjih speleoroničkih istraživanja karsta Dinarida pronađen i snimljen na više lokaliteta (slika 14.). Za razliku od amfipoda i čovečije ribice koji opstaju jedino u potopljenim karstnim kanalima i potpunom mraku gaovica deo godine provede u površinskim tokovima. Za izlazak iz podzemlja kao i za povratak gaovica koristi brojne estavele u karstnim poljima (Popovom, Mokrom, Fatničkom, Gatačkom).

Nasuprot bogatstvu speleo faune u Dinaridima u zoni karsta Karpatu-Balkanida do sada nisu pronađeni

nikakvi značajni karakteristični primerci podvodne speleofaune.

Čovečija ribica kao simbol karsta i čiste vode upravo je i najpoznatiji stanovnik karstnog podzemlja. Poslednji put je snimljena u prirodnom staništu 2003 godine u estaveli Dražin Do kod Trebinja na dubini od oko -35 m i na udaljenosti 200 m od ulaza (Slika 15). Za vreme speleoroničkih istraživanja su snimljena dva primerka dok je u istom periodu nedaleko u Popovom Polju u pećini Baba snimljen još jedan primerak na dubini od 5 m. Tada prikupljenim podacima ustanovilo se da čovečija ribica živi od pripovršinskih voda pa sve do dubokih karstnih kanala koji su verovatno i poslužili kao putevi za njenu migraciju.



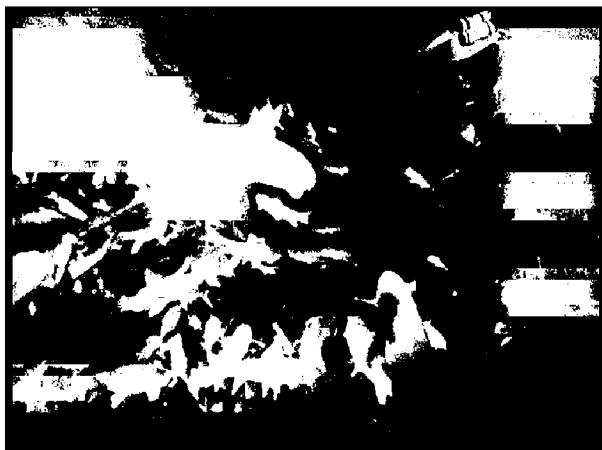
Slika 14. Snimak amfipode pronađenog u vrelima Bokokotorskog zaliva, Hercegovine i u vrelu Raške



Slika 15. Snimak čovečije ribice u njenom prirodnom staništu (Dražin Do, dubina -30 m, distanca 150 m od ulaza)

Da su podzemni karstni kanalim katkad i staništa velikih jata riba pokazuju istraživanja vrela Sekerpinari u Turskoj. Na dubini većoj od 30 m u karstnim kanalima vrela egzistira jato od više hiljada riba veličine i preko 30 cm, kao vrsta koja je nekad u prošlosti iz površinskih

voda promenila svoje stanište i migrirala duboko u karstnu izdan (Slika 16.). Samo noću ove ribe ili jedan njihov deo izlazi na površinu, zadržavaju se uglavnom u izvorišnoj zoni i pred zoru se ponovo povlače duboko u podzemlje.



Slika 16. Jato riba u svom prirodnom staništu (-33 m dubina), karstno vrelo Sekerpinari (Turska). Primerak ribe izvađene iz Sekerpinari vrela

Navedeni primeri predstavljaju samo deo iskustava koja ukazuju na velike mogućnosti speleoroničkih istraživanja pri izučavanju i zaštiti karstnih sistema, kaptiranju podzemnih voda, očuvanja endemskih vrsta, ali i u rešavanju praktičnih inženjerskih problema, pre svega na realizaciji hidrotehničkih objekata u karstu.

LITERATURA

- [1] Čučković S., 1978. *The Question of the Survival of the Well-known Endemic – Proteus Anguinus in the Part of the Trebišnjica Power System*, Jugoslovenski komitet za visoke brane, Simpozijum o uticaju veštačkih jezera na čovekovu sredinu, Trebinje
- [2] EPA, 2002, *A Lexicon of Cave and Karst Terminology with Special Reference to Environmental Karst Hydrology*, National Centre for Environmental Assessment, Washington, U.S.A.
- [3] Klimchouk A., D. Ford, A. Palmer, W. Dreybrodt, 2000. *Speleogenesis - Evolution of Karst Aquifers*, National Speleological Society, Inc. Huntsville, Alabama, U.S.A.
- [4] Milosavljević A. *Privatan arhiv*, Beograd
- [5] Milanović S., Milosavljević A. 2003. *Sekerpinari Spring, Speleo-Diving Report, Phase II*, Turkey
- [6] Milanović S., *Privatan arhiv*, Beograd
- [7] Milanović S., 2004. *Hidrogeološka funkcija podzemnih morfoloških oblika u karstu*, Seminarski rad, Beograd
- [8] Paljetak B., 1969. *Izveštaj o izvršenim ronilačkim istražnim radovima na izvorskom sistemu Opačica*, Herceg Novi.

CAVE DIVING, SIGNIFICANT METHOD OF INVESTIGATION AND KARST GROUNDWATER PROTECTION

by

B.Sc.Saša MILANOVIĆ, research assistant
Institute of Hydrogeology, Faculty of Mining and Geology
University of Belgrade, Djusina 7,

Summary

In hydrogeological, geological engineering and hydrotechnical problems in karst related to the groundwater, karstic channels, caverns, springs and ponors, cave diving is only exploration method which enable direct observation, investigation and exact geological mapping of karstic channels and caverns. Data collected during cave diving investigations appreciably yield to reconstruction of karst process evolution in particular region, what is very important in prediction of karstification and determination of main groundwater directions. In past thirty years more than 40 speleological objects as spring, caves and ponors were investigated in Serbia and Montenegro by cave divers.

Besides investigations for mentioned purpose, protection of karst groundwater is getting more and more as important parameter of regional planning and

development of karstic regions. One of groundwater protection aspects totally unattended is human influence on endemic species which are settling karstic channels filled with water. Thanks to cave diving it is enabled to observe and investigate some of these species directly in their environment. Besides human fish (*Proteus anguinus*) and fish *gaovica* (*Paraphoxinus ghataldi*) one of most often inhabitants is amphipoda rank of (*Nipharus*) which is till now found in many locations of Dinaric karst.

Protection of speleofauna and endemic species is directly connected with groundwater protection. Unfortunately, partly because of unawareness and partly because of irresponsibility, survival of these species is in the mark of questions.

Key words: karst, cave diving, watersupply, speleofauna, protection

Redigovano 02.11.2004.