

# Chemické zloženie a mikrobiologický profil krasových vôd Krásnohorskej jaskyne (Silická planina, Slovenský kras)

Dagmar Haviarová<sup>1</sup>, Milan Seman<sup>2</sup>, Jaroslav Stankovič<sup>3</sup>, Renáta Flaková<sup>4</sup> & Zlatica Ženišová<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky, Správa slovenských jaskýň, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš; haviarova@ssj.sk

<sup>2</sup>Katedra molekulárnej biológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina 842 15 Bratislava

<sup>3</sup>Speleoklub MINOTAURUS, Edeléňska 10, 048 01 Rožňava

<sup>4</sup>Katedra hydrogeológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina 842 15 Bratislava; rflakova@fns.uniba.sk

## AGEOS Chemical composition and microbiological profile of karst water in the Krásnohorská Cave (Silická plateau, Slovak karst)

**Abstract:** Detailed chemical and microbiological research was realised in the Krásnohorská Cave and its underground hydrological system (2009 – 2011). Predominant part of the cave is formed in Gutenstein dolomite and dolomite limestones, rear parts of the cave are located in chemically pure Steinalm limestone of the Silicic Unit. Chemical composition, quality and microbiological properties of karst water in the cave system were overall evaluated on the basis of 55 chemical and 41 microbiological analyses and results of continual measurement of electric conductivity and water temperature. The chemical composition of water is relatively stable during year. Carbonates and calcium are dominant ions in water and is formed water with carbonate mineralization. Values of the total dissolved solids (TDS) are from 488 to 1,097 mg·L<sup>-1</sup>. Cave water is primary Ca-HCO<sub>3</sub> and Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> type, but locally Ca-SO<sub>4</sub> type is found as well. Results showed differences between some parts of cave system and confirmed occurrence of higher mineralized water caused by higher concentration of sulphate (max. 322.6 mg·L<sup>-1</sup>). This type of water is rare in the cave system of the Silická Plateau. Generally and prevailingly water is in equilibrium with calcite and aragonite, in equilibrium or undersaturation with dolomite and in undersaturation with gypsum.

**Key words:** Silická Plateau, Krásnohorská Cave, karst water, chemical composition, microbiological profile

### 1. ÚVOD

Krásnohorská jaskyňa je typickým príkladom výverovej fluvio-krasovej jaskyne s aktívnym vodným tokom. Pozoruhodnosťou jaskyne je 32,6 m vysoký Kvapel rožňavských jaskyniarov, ale aj penovcové kaskády pod prameňom Buzgó rozprestierajúce sa na ploche takmer jedného hektára. Všetky tieto javy spolu s celkovým charakterom podzemných priestorov robia z jaskyne vhodný výskumný objekt. Aj napriek uvedeným skutočnostiam sa výskum chemického zloženie vôd a ich mikrobiologických vlastností realizoval doteraz v jaskyni len okrajovo, s výnimkou výskumu Š. Rodu a jeho spolupracovníkov (Roda et al., 1986<sup>3</sup>), ktorý sa venoval rastu jaskynnej sintrovej výzdoby.

Príspevok hodnotí výsledky výskumu realizovaného v jaskyni v rokoch 2009 až 2011 na základe spolupráce Katedry hydrogeológie Prírodovedeckej fakulty Univerzity Komenského v Bratislave (ďalej „PriF UK“) a Správy slovenských jaskýň – Štátnej ochrany prírody SR (ďalej „SSJ“). Výskum sa realizoval v rámci Plánu hlavných úloh SSJ pre dané roky a grantových projektov MŠ SR VEGA č. 1/0899/12 „Formovanie krasových vôd Silickej planiny so zameraním na hydrogeologický systém Krásnohorskej jaskyne“ a VEGA č. 1/0117/09 „Mikrobiálne patogény vo vodách. Izolácia, identifikácia a charakteristika definovaných problémových species v akvatických biotopoch Slovenska“.

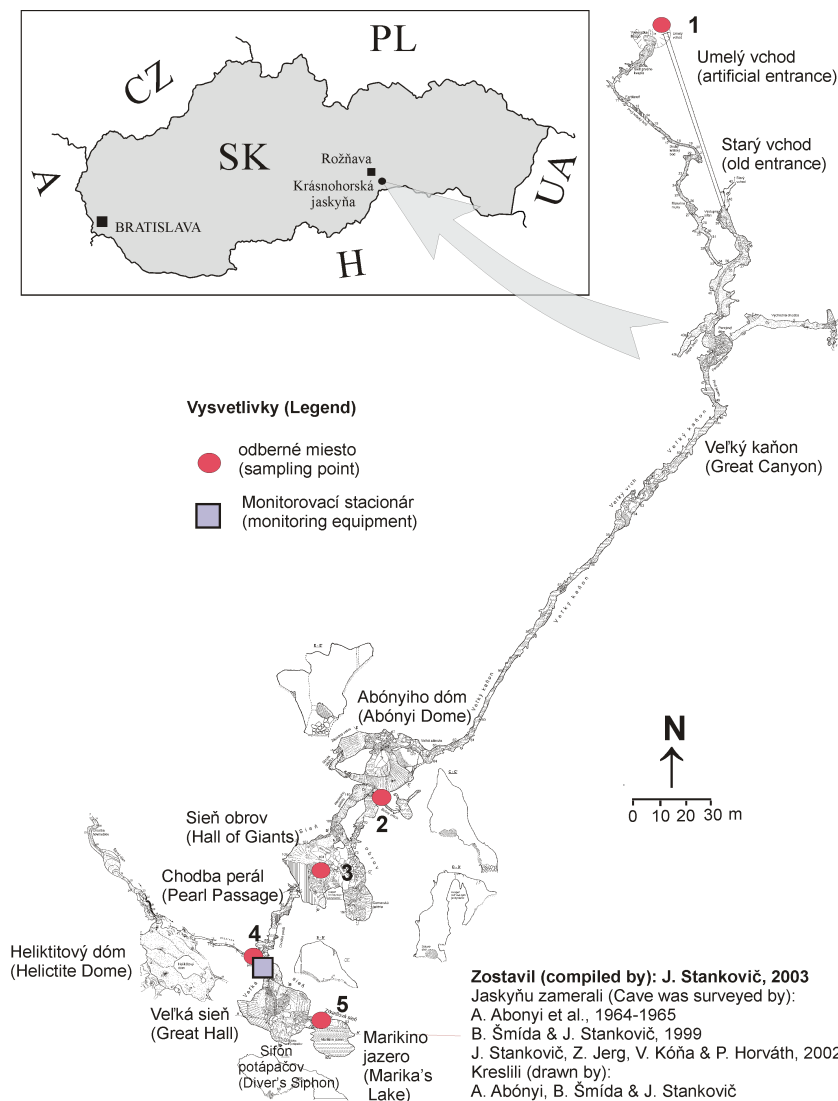
### 2. ZÁKLADNÁ CHARAKTERISTIKA KRÁSNOHORSKEJ JASKYNE A JEJ OKOLIA

Národná prírodná pamiatka Krásnohorská jaskyňa sa nachádza v Slovenskom krase, na severnom úpätí Silickej planiny, v katastri obce Krásnohorská Dlhá Lúka. V zmysle geomorfologického členenia Západných Karpát patrí územie Silickej planiny k celku Slovenský kras, k oblasti Slovenské rudohorie (Mazúr et al., 1986). Podľa Atlasu krajiny Slovenskej republiky je jej územie súčasťou teplej a mierne teplej oblasti (Lapin et al., 2002).

Jaskyňa bola objavená v roku 1964 rožňavskými jaskyniarmi znížením vody v prameni Buzgó a následným rozšírením úzkej vstupnej chodby. S prieskumom prameňa Buzgó v snahe objaviť jaskynné priestory začali jaskyniari zoskupení okolo V. Rozložníka už v roku 1954. Po dvoch rokoch sa tieto práce zastavili a pokračovali až v roku 1963 (Roda, 1964; Stankovič & Horváth, 2004). V roku 1981 bol do jaskyne vyrazený tunel s dĺžkou 120 m, ktorý sa v súčasnosti využíva na pohodlnejší vstup do jaskyne.

Krásnohorská jaskyňa je dlhá 1 556 m, od roku 2004 je v dĺžke 450 m turisticky sprístupnená pre verejnosť (Obr. 1). V roku 1995 bola v rámci jaskýň Slovenského a Aggtelejského krasu zaradená do Zoznamu svetového kultúrneho a prírodného dedičstva UNESCO.

Krásnohorská jaskyňa je budovaná druhohornými strednotrasovými gutensteinskými vápencami a dolomitmi silického



Obr. 1. Mapa odberových miest v jaskyni (1 – prameň Buzgó, 2 – prítok v Abónyiho dóme, 3 – Kvapel'rožňavských jaskyniarov, 4 – Lavostraný prítok pred Veľkou sieňou, 5 – Marikino jazero).

Fig. 1. Map of the sampling points in the cave (1 – the Buzgó Spring, 2 – inflow in the Abonyi's Dome, 3 – the Dripstone of Rožňava Cavers, 4 – inflow in front of the Great Hall, 5 – the Marika's Lake).

príkrovu s prevahou dolomitov nad vápencami. Takáto stavba je typická pre jaskyňu od jej vchodu až po Sieň obrov. Veľký kaňon tvoria gutensteinské dolomity, ktoré pokračujú aj v ďalších častiach jaskyne. V zadných častiach jaskyne (Chodba perál, Veľká sieň, Zrkadlová sieň a časti za sifónom) sa objavujú chemicky čisté steinalmské vápence, ktoré ležia aj v nadloží gutensteinských karbonátov. Ich prítomnosť sa v jaskyni spája s výskytom bohatej sintrovej výzdoby. V jaskyni sa prejavuje vertikálne zlomové pásmo smeru SV–JZ (Stankovič et al., 2005).

Jaskynným priestorom dominuje puklinová chodba Veľký kaňon. V zadných častiach jaskyne sa nachádzajú mohutné dómy vysoké viac ako 40 m, ktoré sa vytvorili na priečných tektonických poruchách (napr. Veľká sieň a Sieň obrov). Zvyšky staršej vrchnej úrovne jaskyne ležia vo výške 35–40 m od eróznej bázy a sú reprezentované priestormi napr. Študentskej izby a Herényiho galérie (Gaál, 2008).

Podľa hydrogeologickej rajonizácie Slovenska (Šuba et al., 1984) patrí okolie Krásnohorskej jaskyne k hydrogeologickému rájonu MQ 129 „Mezozoikum centrálnej a východnej časti Slovenského krasu“ a subrajónu SA 50 „Čiastkový rájon planín

Silickej, Horného vrchu, Zádielskej, Jasovskej a Dolného vrchu“. Podľa rozdelenia Slovenského krasu na štyri samostatné hydrogeologické štruktúry (Mello et al., 1997) je predmetné územie súčasťou silicko-turnianskej hydrogeologickej štruktúry. V zmysle detailnejšieho členenia štruktúr patrí územie k hydrogeologickej štruktúre Horného vrchu (Orvan, 2006). Štruktúru odvodňuje niekoľko prameňov. Jedným z nich je krasový prameň Buzgó vytekajúci z Krásnohorskej jaskyne. Prameň predstavuje odtok krasových vôd na úrovni miestnej eróznej bázy. Odtok je viazaný na poklesnutú kryhu steinalmských vápencov uprostred svahov budovaných spodnotriasovými sinkými vrstvami pozostávajúcimi z bridlic a slienitých vápencov (Obr. 2).

Pod prameňom Buzgó sa nachádza hydrogeologický vrt RHV-4, ktorým je zabezpečená pitná voda pre obec Krásnohorská Dlhá Lúka. V blízkom okolí jaskyne sa nachádza ešte ďalších 5 vrtov, ktoré boli realizované v rámci predbežného hydrogeologického prieskumu Horného vrchu (Orvan, 1987). Z hydrodynamických skúšok na týchto vrtoch boli stanovené koeficienty filtrácie v rozmedzí rádovo  $1 \cdot 10^{-5}$  až  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

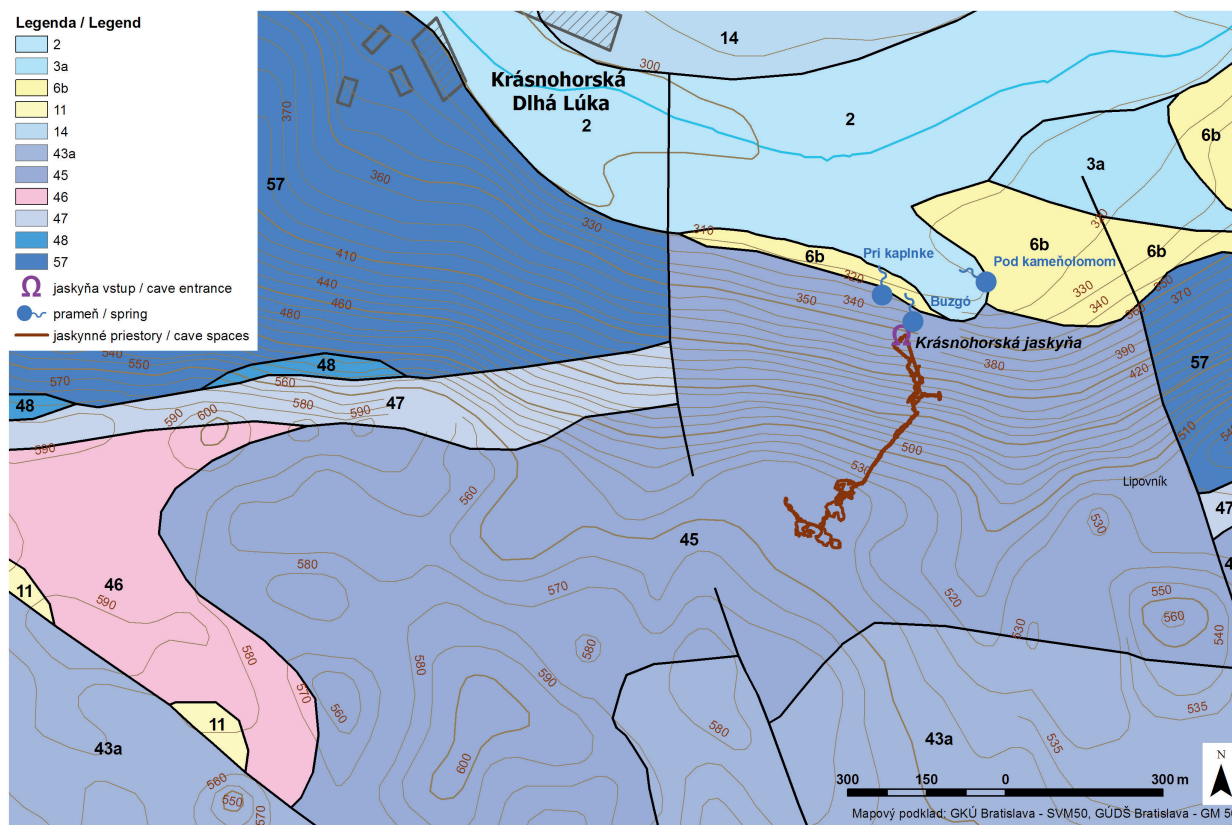
Podľa vymedzenia útvarov podzemných vôd je územie súčasťou útvaru podzemných vôd v predkvartérnych horninách SK200480KF – Útvaru s dominantnými krasovo-puklinovými podzemnými vodami Slovenského krasu oblasti povodí Hrona a Hornádu (Kuníková et al., 2005; Kullman et al., 2006). V kolektoroch útvaru prevažuje krasovo-puklinová priepustnosť s koeficientom filtrácie väčším ako  $11 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  a priemernou hodnotou merného odtoku podzemných vôd  $3,6 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  (Malík et al., 2005).

## 2.1. Hydrologická a hydrogeologická charakteristika Krásnohorskej jaskyne

Krásnohorskou jaskyňou preteká stály podzemný tok, ktorého vody vystupujú na povrch v krasovom prameni Buzgó. Prameň leží vo výške 316 m n.m. Vody z prameňa odtekajú do potoka Čremošné. Priamo v jaskyni sa na toku nachádza niekoľko prietokových jazier (napr. Prvé jazero, Druhé jazero a Marikino jazero) a sifónov (napr. Sifón potápačov a Sifón Trenčanov).

Hlavný tok jaskyne má tri viditeľné prítoky. Prvým z nich je pravostranný prítok na dne Abonyiho dómu, ktorý priteká priamo do Druhého jazera. Pôvod vôd tohto prítoku nie je známy. Druhý bočný prítok sa nachádza na začiatku Chodby perál. Prítok je podstatne menší a má občasný charakter. V jeho prípade sa predpokladá komunikácia s prvým dvojjáztvom (Červený a Šusterský závrť) na planine (Stankovič et al., 2005). Tretí prítok je pred vstupom do Veľkej siene. Jeho výdatnosť sa za normálneho stavu pohybuje v rozpätí  $1\text{--}4 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ . Prítok, respektíve celá jeho bočná vetva bola jaskyniarimi podrobnejšie skúmaná hlavne v období rokov 1981 až 1986 v snahe zistiť jej zatial neznáme pokračovanie (Šmída & Stankovič, 1999). Ani v tomto prípade nie je presne známy pôvod pritekajúcich vôd. Existujú dve teórie: vody tvoria odbočku hlavného toku, ktorý obchádza sifón v Zrkadlovej sieni, alebo ide o samostatnú vetvu jaskyne za predpokladu formovania vôd na západ od jaskyne na styku so spodnotriasovými sinskými vrstvami.

Hlavný jaskynný tok je v podzemí dostupný až po Zrkadlovú sieň, kde sa nachádza Marikino jazero vyplňajúce takmer celý



Obr. 2. Geologické pomery okolia Krásnohorskej jaskyne (podľa Mello et al., 1997<sup>b</sup>). Vysvetlivky: Kvartér: 2 – fluválne sedimenty (holocén); 3 – proluviálne sedimenty (holocén); 6b – deluviálne sedimenty hlinito-kamenité a kamenité (pleistocén–holocén); 11 – deluviálno-eolické sedimenty (pleistocén); 14 – proluviálne sedimenty (pleistocén); mezozoikum silického príkrovu: 43a – wettersteinské vápence rífové (ladin–kordevol); 45 – steinalmské vápence (pelson–ilýr); 46 – gutensteinské dolomity (egej–bityn); 47 – gutensteinské vápence (egej–bityn); 48 – dolomity, rauvaky, brekcie, pestré vápence (olenk); 57 – slienité vápence a bridlice sinských vrstiev (indu).

Fig. 2. Geological settings of the Krásnohorská Cave surroundings (according to Mello et al., 1997<sup>b</sup>). Legend: Quaternary: 2 – fluvial sediments (Holocene); 3 – proluvial sediments (Holocene); 6b – deluvial sediments loamy-stony and stony (Pleistocene–Holocene); 11 – deluvial-eolian sediments (Pleistocene); 14 – proluvial sediments (Pleistocene); Mesozoic of Silica nappe: 43a – Wetterstein limestone Riff (Middle to Upper Triassic: Ladinian–Cordevolian); 45 – Steinalm limestone (Pelsonian–Illyrian), 46 – Gutenstein dolomite (Aegenian–Bithynian); 47 – Gutenstein limestone (Aegenian – Bithynian); 48 – dolomites, rauhwackes, breccias, variegated limestones (Olenekian); 57 – marlstones, limestones and shales of Szin beds (Induan).

Tab. 1. Priemerné mesačné výdatnosti sledovaných prameňov ( $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$ ).Tab. 1. Average monthly yield of monitoring springs ( $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	Priemer Average
<b>Prameň Pod kameňolomom/the Pod kameňolom Spring (1968-1991)</b>												
6,17	8,56	11,02	15,46	15,63	11,72	8,72	5,43	4,96	6,41	6,09	6,81	8,71
<b>Prameň Buzgó/the Buzgó Spring (1983-2009)</b>												
30,53	29,44	69,91	85,78	68,62	54,91	41,19	32,48	22,06	23,41	29,43	32,78	51,31

pôdorys siene. Do ďalších častí jaskyne, v ktorých vodný tok pokračuje, sa dá dostať len za použitia speleopotápačskej výstroje. Potápanie v tejto časti jaskyne je pomerne zložité. Prvé potápačské pokusy z Marikinho jazera pochádzajú z roku 1966. Odvtedy sa v sífóne potápalo viacero potápačov. Po prvýkrát bol sífón Marikinho jazera prekonaný v máji 1982 J. Kucharovičom. Dĺžka sífónu je udávaná na 120 m (Stankovič et al., 2005). Z. Hochmuth udáva dĺžku sífónu na 115 m a hĺbku na 28 m (Hochmuth, 2000). Na druhej strane sífónu sa v priestoroch Jazerného domu nachádza jazero. Proti toku pokračuje jaskyňa Zrúteným dómom a po ďalšom sífóne Suťovým dómom, ktorý je poslednou známou časťou jaskyne (Hochmuth, 2000). Dĺžka vodného toku od vyvieracky po Marikino jazero je okolo 520 m.

V roku 2009 boli na celej dĺžke vodného toku zrealizované termometrické a rezistivimetrické merania dokumentujúce hydraulické vlastnosti horninového prostredia (Malík et al., 2011). Na základe výsledkov meraní bol vodný tok rozdelený na dve časti. Prvú časť tvorí krasový kanál od vstupu po Abonyiho dóm, ktorý je od okolitého prostredia hydraulicky izolovaný. Druhá časť od Abonyiho dómu po Marikino jazero je hydraulicky odlišná, vodný tok tu drénuje horninové prostredie a okrem viditeľných prítokov tu boli indikované aj ďalšie prestupy vôd do podzemného toku.

Okrem podzemných tokov sa v jaskyni pomerne často vyskytujú aj priesakové vody. Najvýraznejšie priesaky sú viazané na jaskynné komíny a stropy dómov. Priesaky z komínov podľa pozorovaní miestnych jaskyniarov reagujú pomerne rýchlo na zrážky. O niečo pomalšia je reakcia priesakov zo stropov dómov, medzi ktoré patrí aj priesak v Sieni obrov formujúci známy Kvapeľ rožňavských jaskyniarov.

Problematike infiltračnej oblasti jaskyne a jej vlastného odvodňovania bola už v minulosti venovaná pozornosť jaskyniarov a ďalších odborníkov. Pri odvodnení jaskyne dochádza k niekoľkonásobnej bifurkácii. Hlavný odtok krasových vôd z podzemného systému je sústredený do prameňa Buzgó, ktorý odvodňuje časť hydrogeologickej štruktúry Horného vrchu. Výdatnosť prameňa Buzgó je od roku 1958 dlhodobo sledovaná Slovenským hydrometeorologickým ústavom (ďalej „SHMÚ“) pod katalógovým číslom 1862. V roku 1983 týždenný interval pozorovaní teploty a výdatnosti prameňa vystriedali presnejšie denné merania. Vodozbernú oblasť jaskyne odvodňujú ďalšie dva stále pramene (Obr. 2) – východne ležiaci prameň Pod ka-

meňolomom (prameň zaradený v pozorovacej sieti SHMÚ v rokoch 1968 až 1992 pod katalógovým číslom 1861 s týždenným intervalom pozorovaní) a západne ležiaci prameň Pri kaplnke (prameň zaradený v pozorovacej sieti SHMÚ v rokoch 1957 až 1965 pod katalógovým číslom 1863 s nespisovným názvom Pod kapličkou, s týždenným intervalom pozorovaní). Okrem nich sú to aj občasné pramene, ktoré sú aktívne len počas vyššieho zvodnenia horninového prostredia.

Podľa údajov SHMÚ sa výdatnosť prameňa Pod kameňolomom počas jeho pozorovaní pohybovala od  $0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  do  $88 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , s priemernou hodnotou  $8,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  a modusom  $5,22 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Podľa priemerných mesačných výdatností sú najnižšie výdatnosti prameňa v mesiaci september, najvyššie počas jarných mesiacov (apríl, máj) (Tab. 1).

Podľa Stankoviča et al. (2005) dosahuje výdatnosť prameňa Pri kaplnke  $0,1\text{--}6,5 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  (údaje z SHMÚ neboli k dispozícii). V práci je zároveň uvedený predpoklad, že medzi prameňom Pod kameňolomom a prameňom Buzgó dochádza k bifurkácii vodného toku hlbšie v masíve planiny v doteraz neznámom úseku Krásnohorskej jaskyne. Podľa výsledkov dlhodobých pozorovaní výdatností prameňa Buzgó vykazuje prameň vysokú variabilitu odtoku. Maximálna dokumentovaná výdatnosť prameňa za obdobie 1983–2009 bola  $1\,356 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ , minimálna výdatnosť za rovnaké obdobie bola  $0 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  a priemerná hodnota predstavovala  $43,3 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ . Režim výdatnosti prameňa Buzgó je analogický režimu prameňa Pod kameňolomom (Tab. 1). Najvyššie výdatnosti prameňa sú spojené s topením snehu (apríl, máj), aj keď v niektorých prípadoch extrémne výdatnosti nastávajú v čase letných mesiacov počas intenzívnych zrážok. Naopak najnižšie výdatnosti prameňa sa vyskytujú v mesiacoch september až január.

Reakciu prameňa Buzgó, a teda aj jaskynného toku na zrážky vo veľkej miere ovplyvňuje celkové lokálne nasýtenie epikrasu a nenasýtenej zóny. V prípade ich nízkeho nasýtenia aj pri vyšších zrážkových úhrnoch nedochádza k rýchlemu zvyšovaniu prítokov. Naopak pri nasýtení masívu sa prítoky a výdatnosť prameňa zvyšujú veľmi rýchlo s rizikom zatopenia jaskyne.

Na základe analýzy výtokových čiar prameňa Buzgó (Malík et al., 2011) boli v odtokovom režime prameňa identifikované 3 subrežimy odtoku. Dva subrežimy s počiatočnými výdatnosťami  $Q_{01} 40 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $Q_{02} 200 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$  charakterizujú pokojnejší laminárny odtok odvodňujúci sieť otvorených drobných puklín a väčších neskrasovatených a skrasovatených puklín. Tretí

najvýraznejší subrežim s počiatočnou výdatnosťou  $Q_{03}$  700 l·s<sup>-1</sup> je turbulentný. V rámci neho vody odvodňujú veľkú otvorenú krasovú poruchu so značným priestorovým dosahom.

Pre určenie vodozbernej oblasti jaskyne boli na lokalite v minulosti vykonané viaceré stopovacie skúšky. Farbiaca skúška z 12.3.1967 za použitia technického fluoresceínu rozpusteného vo vode potvrdila súvis prameňa Buzgó s ponomom z oblasti Rakata. Stopovač sa v prameni Buzgó objavil po 25 hodinách (priama vzdialenosť 3 300 m). S oneskorením 6–10 hodín sa stopovacia látka objavila aj v prameni Pod kameňolomom (Roda, 1967). Ďalšia stopovacia skúška bola realizovaná v ponore na dne závrty v oblasti studne Žedem, odkiaľ sa stopovač objavil po 25 hodinách v prameni Buzgó (priama vzdialenosť 2 250 m). Nie je známe, či sa stopovač objavil aj v ďalších prameňoch v blízkosti Krásnohorskej jaskyne (Roda et al., 1986<sup>b</sup>). Z lokality je známa aj neúspešná stopovacia skúška v studni Žedem (Stankovič et al., 2005), ktorú vykonal J. Ščuka, a ktorej neúspech sa spája s nevhodnou dobou realizácie a nedostatočným množstvom vody použitej pri aplikácii stopovača. Realizované stopovacie skúšky čiastočne objasnili charakter vodozbernej oblasti Krásnohorskej jaskyne. Na druhej strane pre jej úplné spresnenie by bolo potrebné v budúcnosti doterajšie informácie doplniť o výsledky ďalších doteraz nezrealizovaných stopovacích skúšok.

## 2.2. Kvapel rožňavských jaskyniarov

Kvapel rožňavských jaskyniarov sa nachádza v Sieni obrov, ktorá leží pod prvým dvojzávrutom na povrchu planiny, vďaka ktorému má kvapel stály prítok vody (Stankovič et al., 2005).

Kvapel je vysoký 32,6 m a jeho hmotnosť sa odhaduje na 2 000 ton. Ide o najväčší stalagmit na Slovensku. V Guinnessovej knihe rekordov je dokonca zapísaný ako najväčší kvapel na svete. Podľa datovania narástol tento kvapel za posledných približne 13 000 rokov, t.j. v súčasnom interglaciálnom období (Stankovič et al., 2005).

Voda na kvapel rožňavských jaskyniarov nepriteká sústredným prítokom. Ide skôr o rozptýlený intenzívny skvap. Kvapel vznikol pravdepodobne splynutím troch stalagmitov. Stankovič et al. (2005) udáva, že s rýchlym rastom kvapla sa spája mechanizmus presycovania roztoku v kvapkách padajúcich z veľkej výšky. Počas pádu vzniká na bočných stenách kvapky silný podtlak, ktorý spôsobuje zrýchlenie difúzie CO<sub>2</sub> z roztoku a následné vyzrážanie prebytočného CaCO<sub>3</sub>. S rastom do výšky postupne ustával mechanizmus presýtenia padajúcich kvapiek, voda začala stekať po povrchu, čím sa zintenzívnilo jeho hrubnutie a kvapel sa začal vyvíjať ako sintrový nátek. Existencia kvapla sa spája s viacerými priaznivými podmienkami jeho vzniku, ako je dostatočne vysoká sieň, dostatočné množstvo pritekajúcich vôd, nasýtenosť roztoku, vhodný podklad a pod. (Stankovič et al., 2005).

Rýchlosti rastu kvaplov v Krásnohorskej jaskyni, ale aj v ďalších jaskyniach Slovenského krasu, sa venoval Š. Roda so spolupracovníkmi, ktorí na základe vytvorenia tzv. robot-kvaplov, stanovenia množstva skvapovej vody, priemerného obsahu rozpusteného vápenca vo vode a prírastku sintrovej hmoty prepočítali priemerné hodnoty rýchlosti rastu stalaktitov. Podľa týchto prepočtov 1 g hmoty stalaktitu narastie v Krásnohorskej jaskyni za približne 17 rokov (Roda et al., 1986<sup>a</sup>).

## 3. METODIKA

Chemické zloženie a mikrobiologické vlastnosti vôd Krásnohorskej jaskyne boli hodnotené predovšetkým na základe vlastných analýz získaných v rámci monitoringu realizovaného na lokalite v období rokov 2009–2011. Monitorovacie miesta, na ktorých boli odbery vôd realizované, boli vybrané na základe dostupných literárnych podkladov o jaskyni, odborného usmernenia J. Stankoviča, ktorý v súčasnosti prevádzkuje Krásnohorsku jaskyňu, a vlastnej rekognoskácie terénu. Kvôli prehľadnosti boli tieto miesta znázornené do mapových podkladov jaskyne (Obr. 2).

Pri každom odbere vody boli vykonané terénne merania základných fyzikálno-chemických parametrov, a to teploty vody, konduktivity (EC), pH, oxidačno-redukčného potenciálu ( $E_H$ ), obsahu rozpusteného kyslíka, kyslíkového nasýtenia a zákalu. Teplota vody a konduktivita boli stanovené prenosným prístrojom firmy WTW Multi 350i (respektíve LF 323) s elektródou TetraCon<sup>R</sup> 325, pH prenosným prístrojom WTW Multi 350i s elektródou SenTix<sup>R</sup> 41.  $E_H$  bol stanovený prenosným prístrojom WTW pH meter 340i s elektródou SenTix<sup>R</sup> ORP, pričom stanovené hodnoty boli prepočítané na štandardnú vodíkovú elektródu (Pitter, 2009). Rozpustený kyslík a kyslíkové nasýtenie boli stanovené prenosným prístrojom WTW Oxi meter 340i/SET s elektródou DurOx<sup>R</sup> 325-3, zákal prenosným fotometrom pHotoFlex<sup>®</sup> Turb430. Súčasťou každého odberu bolo aj titračné stanovenie ukazovateľov ZNK<sub>8,3</sub> a KNK<sub>4,5</sub> s následným prepočtom na koncentráciu voľného CO<sub>2</sub> a HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> iónu.

Chemické analýzy boli uskutočnené v hydrogeochemickom laboratóriu Katedry hydrogeológie PriF UK v Bratislave v rozsahu: CHSK<sub>Mn</sub>, BSK<sub>5</sub>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> a HPO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Analýzy boli uskutočnené štandardnými metodikami (Horáková et al., 2003), spektrofotometrické stanovenia boli vykonané na prístroji PERKIN ELMER UV/VIS Lambda 11. Koncentrácie Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Fe a Mn boli vo vodách stanovené v akreditovanom analytickom laboratóriu spoločnosti BELNO-VAMANN International s.r.o. v Nových Zámkoch, respektíve v akreditovanom skúšobnom laboratóriu LL s.r.o. Liptovský Mikuláš. Koncentrácie Ca<sup>2+</sup> a Mg<sup>2+</sup> boli analyzované titračne, koncentrácie Fe a Mn spektrofotometricky na spektrofotometri VIS Hach Lange 2800. Vzorky vody vôd z mája 2009 boli analyzované v Geoanalytickom laboratóriu ŠGÚDŠ v Spišskej Novej Vsi v rozsahu: Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Fe, Mn, Si, Al<sup>3+</sup>, As, Cd, Co, Cr, Cu, Sb, Ni, Pb, Zn a TOC. Sb a As boli analyzované metódou AAS technikou generácie hydridov, ostatné prvky metódou AES-ICP na prístroji VISTA-MPX fy Varian. Vzorky vody odoberané na stanovenie stopových prvkov boli pri odbere konzervované koncentrovanou HNO<sub>3</sub> (0,5 ml/100 ml).

Chemické analýzy vôd boli komplexne vyhodnotené (výpočet látkových koncentrácií, aktivít a pod.), graficky a štatisticky spracované. Pri klasifikácii chemického zloženia vôd bola použitá klasifikácia založená na princípe prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek nad 20 c.z % a Gazdova genetická klasifikácia chemického zloženia vôd (Gazda, 1974). Pre zobrazenie jednotlivých chemických typov jaskynného systému bol použitý Piperov diagram.

Pre jednotlivé chemické analýzy vôd boli vypočítané indexy nerovnovážnosti ( $I$ ) pre hlavné karbonáty na základe rozdielu

logaritmov vypočítaných iónových aktivitných produktov (*IAP*) a rovnovážnych konštánt (*K*) (Fláková et al., 2010), na základe ktorých bol posúdený stav nasýtenia vôd voči týmto minerálom. Za rovnovážny stav bola považovaná hodnota  $I = 0 \pm 5 \% \log K$  (Deutsch et al., 1982). Chemické analýzy vôd boli spracované aj špeciálnym modelovaním v programe PHREEQC-2 (Parkhurst & Appelo, 1999). Hodnota  $E_H$  bola nahradená hodnotou *pe*, pričom pre 25 °C platí vzťah  $E_H = 0,059 \cdot pe$  (Appelo & Postma, 2005). Tieto výpočty poskytli presnejšie hodnoty *I*, *IAP* a *K*.

Pre štatistickú analýzu vzťahov premenných chemického zloženia vôd bol použitý program STATGRAPHICS Centurion XV. Chemické analýzy vôd boli použité pri zostrojení korelačných matíc a na aplikáciu zhlukovej analýzy za použitia Wardovej metódy zhlukovania a štvorca euklidovej vzdialenosti, respektíve euklidovu vzdialenosť. Pri korelačnej analýze bola zvolená hladina významnosti  $\alpha$  (*P*-value) 0,05. Za štatisticky významnú bola považovaná korelácia pri hodnote korelačného koeficienta väčšieho ako 0,3, resp. menšieho ako -0,3. Pri korelačnej analýze bola použitá lineárna Pearsonova korelácia alebo Spearmanova korelácia v závislosti od toho, či premenné spĺňali alebo nespĺňali požiadavky normálneho rozdelenia početnosti. Korelačné matice boli vypočítané pre účely vzájomného porovnania odberných miest pri využití všetkých kompletných chemických analýz, ale aj pre posúdenie tesnosti vzťahov medzi jednotlivými parametrami chemických analýz ( $t_{\text{vody}}$ , pH, EC, kyslíkové nasýtenie,  $E_H$ ,  $CHSK_{Mn}$ , voľný  $CO_2$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ , Fe, Mn,  $NH_4^+$ , Cl,  $NO_3^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $HPO_4^{2-}$ , celková mineralizácia,  $I_{\text{kalcit}}$ ,  $I_{\text{dolomit}}$ ). V druhom prípade boli korelačné matice vypočítané pre všetky vzorkovacie miesta, kde bola spravená viac ako jedna chemická analýza vody. Vzájomné vzťahy medzi parametrami boli posudzované v rámci každého odberného miesta samostatne, pričom jedna korelačná matica bola zostavená sumárne pre všetky podzemné toky v jaskyni.

Vlastné chemické analýzy boli doplnené o dostupné staršie chemické analýzy, ktoré boli v závislosti od ich rozsahu spracované rovnako ako ostatné chemické analýzy (Motyka et al., 2005).

V roku 2009 bolo v jaskyni na jej hlavnom toku v rámci integrovaného monitoringu jaskýň skúšobne nainštalované stacionárne monitorovacie zariadenie kontinuálne monitorujúce teplotu vzduchu, teplotu vody a hodnoty jej EC. Zariadenie fir. Microstep pozostáva z meracích sond (PT 100, TetraCon<sup>R</sup>325) a vlastného datalogera, v ktorom sa v hodinových intervaloch ukladajú merané dáta. Tie boli z datalogera sťahované v pravidelných intervaloch pomocou externého dátového média HP iPAQ, následne transportované do databázy a spracované.

Pre celkové zhodnotenie režimu prameňa Buzgó a prameňa Pod kameňolomom boli spracované denné výdatnosti týchto prameňov poskytnuté SHMÚ (denné výdatnosti prameňa Buzgó za obdobie 11/1982 až 10/2009 a týždenné výdatnosti prameňa Pod kameňolomom za obdobie 11/1967 až 10/1992).

V súlade s predchádzajúcimi prácami (Haviarová et al., 2010, 2011<sup>a</sup>, 2011<sup>b</sup>) mikrobiologické analýzy vychádzali zo súboru legislatívne definovaných ukazovateľov pre povrchové vody v rozsahu: kultivovateľné mikroorganizmy pri 22 °C (KM22), koliformné baktérie (KB), termotolerantné koliformné baktérie (TKB) a črevné enterokoky (EK), doplnené o nepovinný ukazovateľ kultivovateľné mikroorganizmy pri 36 °C (KM36). Pre

mikrobiologickú analýzu boli vzorky vody odoberané a spracované štandardným spôsobom (referenčná metóda ISO 9308-1 podľa práce Häusler, 1995). Keďže mikrobiologické ukazovatele boli stanovené analytickými metódami pre povrchové vody, bolo ich možné vyhodnotiť podľa Nariadenia vlády Slovenskej republiky č. 269/2010 Z. z. (ďalej „nariadenie č. 269/2010“). Výnimkou bol ukazovateľ KM36, ktorý uvedené nariadenie v súčasnosti nezaväzuje používať a môže sa pre mikrobiologickú analýzu aplikovať ako neklasifikovaný údaj, prispievajúci k exaktnejšiemu zhodnoteniu mikrobiálneho profilu vôd.

## 4. VÝSLEDKY

V rámci hodnotenia chemického zloženia krasových vôd Krásnohorskej jaskyne boli samostatne posúdené vody horizontálnej a vody vertikálnej cirkulácie. Tieto výsledky boli doplnené o hodnotenie chemického zloženia vôd prameňov ležiacich v bezprostrednej blízkosti jaskyne.

### 4.1. Chemické zloženie jaskynných vôd horizontálnej cirkulácie

Vody horizontálnej cirkulácie boli v jaskyni odoberané na troch miestach. Prvým miestom bolo Marikino jazero v Zrkadlovej sieni, t.j. najvzdialenejšie dostupné miesto v jaskyni s vodným tokom. Druhým bol ľavostranný prítok hlavného toku pred Veľkou sieňou. Tretím odberným miestom bol pravostranný prítok hlavného toku v Abonyiho dóme. Do hodnotenia tejto skupiny vôd bola zaradená aj voda odoberaná z prameňa Buzgó, ktorá reprezentuje podzemný tok na výstupe z jaskyne (Obr. 2).

Vzorkovanie vôd bolo vykonané v období rokov 2009–2011, a to v marci, máji a októbri 2009, v apríli, júni a októbri 2010, a v máji a septembri 2011. Aprílový odber vody v roku 2010 bol vykonaný len z prameňa Buzgó, pretože celá jaskyňa bola v čase odberu zatopená.

Z výsledkov podrobného spracovania chemických analýz vôd vyplýva, že chemické zloženie krasových vôd nie je uniformné. Celková mineralizácia (*M*) vôd hlavného jaskynného toku narastá v smere od Marikinho jazera až po samotný prameň Buzgó. Dôvodom je existencia bočných prítokov rozdielneho chemického zloženia a vyššej mineralizácie, ktoré sa miešajú s vodami hlavného toku, a tým ovplyvňujú jeho primárne chemické zloženie. Kým priemerná hodnota celkovej mineralizácie vôd z Marikinho jazera je 526 mg·l<sup>-1</sup>, v prípade prameňa Buzgó je to už 555 mg·l<sup>-1</sup>. Priemerná mineralizácia bočného prítoku v Abonyiho dóme je pritom 560 mg·l<sup>-1</sup>, a prítoku pred Veľkou sieňou 682 mg·l<sup>-1</sup>.

Vody Marikinho jazera boli neutrálne s priemernou hodnotou pH 7,1.  $E_H$  vôd kolíše od 462 do 557 mV, priemerná teplota bola 9,4 °C. Obsah voľného  $CO_2$  bol 8,7 až 28,7 mg·l<sup>-1</sup>. Priemerná hodnota kyslíkového nasýtenia bola 83,3 %. Dominantnými iónmi vo vode sú hydrogenuhličitan a vápnik (Tab. 2).

Maximálna koncentrácia síranov vo vode bola len 25,5 mg·l<sup>-1</sup>, nízke boli aj koncentrácie horčíka s maximom 10,9 mg·l<sup>-1</sup>. Podľa Gazdovej klasifikácie boli vody z Marikinho jazera zo všetkých odberov základného výrazného Ca-HCO<sub>3</sub> typu s najvyšším

Tab. 2. Štatistické vyhodnotenie vybraných ukazovateľov chemického zloženia vôd v Krásnohorskej jaskyni.

Tab. 2. Statistic evaluation of selected parameters of water chemical composition in the Krásnohorská Cave.

	$t_{\text{vody}}$ $t_{\text{water}}$	pH	EC	CHSK <sub>Mn</sub> COD <sub>Mn</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>
	(°C)		(mS·m <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )
<b>Marikino jazero/the Marika's Lake</b>														
<b>Min.</b>	9,1	7,1	56,6	0,12	82	6,46	0,00	0,93	0,10	2,59	4,78	21,4	360	8,70
<b>Max.</b>	9,9	7,2	60,0	0,56	139	10,9	0,20	1,55	1,22	3,98	7,47	25,5	376	28,7
<b>Medián Median</b>	9,3	7,1	58,7	0,28	124	6,85	0,11	1,03	0,48	3,11	5,71	23,0	363	20,8
<b>Priemer Average</b>	9,4	7,1	58,4	0,31	119	7,62	0,11	1,12	0,53	3,22	6,02	23,4	365	20,1
<b>Abonyiho dóm – pravostranný prítok/inflow in the Abonyi Dome</b>														
<b>Min.</b>	9,1	7,0	60,1	0,08	64	1,30	0,00	0,91	0,10	2,69	5,11	21,4	351	10,4
<b>Max.</b>	10,1	7,4	63,7	0,35	152	26,7	2,38	1,42	0,50	3,98	8,21	30,0	400	30,8
<b>Medián Median</b>	9,2	7,2	61,0	0,28	138	3,16	0,16	1,10	0,44	3,31	6,51	24,3	391	21,4
<b>Priemer Average</b>	9,3	7,2	61,9	0,25	129	6,42	0,46	1,13	0,39	3,27	6,66	24,7	387	22,0
<b>Lavostranný prítok pred Veľkou sieňou/inflow in front of the Great Hall</b>														
<b>Min.</b>	9,0	7,3	57,9	0,04	64	17,7	0,00	1,08	0,16	3,46	4,46	55,6	325	3,20
<b>Max.</b>	9,8	7,9	96,7	0,63	399	32,7	0,30	1,50	0,72	4,21	5,74	322,6	337	21,9
<b>Medián Median</b>	9,2	7,6	68,4	0,26	122	21,5	0,11	1,14	0,57	3,63	5,07	121,0	336	7,3
<b>Priemer Average</b>	9,3	7,6	73,7	0,29	159	23,41	0,11	1,23	0,55	3,75	5,10	151,4	333	9,2
<b>Prameň Buzgó/the Buzgó Spring</b>														
<b>Min.</b>	9,1	7,3	56,7	0,04	96	6,69	0,00	0,97	0,12	2,77	4,96	28,8	351	1,10
<b>Max.</b>	9,4	7,9	65,4	0,80	154	18,2	0,45	1,54	0,93	3,81	7,45	89,7	370	18,6
<b>Medián Median</b>	9,3	7,4	60,9	0,39	128	8,55	0,09	1,07	0,55	3,34	5,83	35,0	362	7,0
<b>Priemer Average</b>	9,3	7,5	60,5	0,41	128	9,74	0,14	1,13	0,54	3,32	6,05	45,3	361	7,9
<b>Priesak – kvapel' rožnavských jaskyniarov/leak from the Dripstone of Rožnava Cavers</b>														
<b>Min.</b>	9,1	7,3	58,5	0,04	90	1,44	0,00	0,90	0,27	3,29	4,30	25,9	360	5,50

<b>Max.</b>	9,3	7,8	61,8	1,09	143	38,8	0,17	1,40	0,55	5,55	6,68	33,3	373	15,3
<b>Medián Median</b>	9,2	7,4	60,0	0,24	134	1,71	0,10	1,12	0,49	3,46	5,53	30,5	368	9,90
<b>Priemer Average</b>	9,2	7,5	60,1	0,50	128	7,87	0,08	1,13	0,46	3,88	5,63	29,8	367	10,4

Vysvetlivky: EC – konduktivita, CHSK<sub>Mn</sub> – chemická spotreba kyslíka, CO<sub>2</sub> – voľný oxid uhličitý

Legends: EC – conductivity, COD<sub>Mn</sub> – Chemical oxygen demand, CO<sub>2</sub> – Free carbon dioxide

Tab. 3. Vypočítané charakterizačné koeficienty a Palmer-Gazdove charakteristiky v jaskynných vodách.

Tab. 3. Characterization indexes and Palmer-Gazda characteristics in the cave water.

	Charakterizačné koeficienty Characterization indexes					Palmer-Gazdove charakteristiky Palmer-Gazda characteristics			
	M	rMg/rCa	Na/K	rSO <sub>4</sub> /M	r(Na+K)/ r(Ca+Mg)	S <sub>1</sub> (NO <sub>3</sub> )	S <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )	A <sub>2</sub>	p <sub>CO2</sub>
	(mg·l <sup>-1</sup> )	(c-z)	(c-z)	(c-z)	(c-z)	(c-z %)	(c-z %)	(c-z %)	(MPa)
	(mg·L <sup>-1</sup> )	(meq·L <sup>-1</sup> )	(meq·L <sup>-1</sup> )	(meq·L <sup>-1</sup> )	(meq·L <sup>-1</sup> )	(meq %)	(meq %)	(meq %)	
<b>Marikino jazero/the Marika's Lake</b>									
<b>Min.</b>	488	0,09	1,44	0,03	0,010	0,80	6,78	88,9	1,74·10 <sup>-3</sup>
<b>Max.</b>	548	0,22	22,11	0,04	0,010	1,35	7,86	90,6	2,08·10 <sup>-2</sup>
<b>Medián Median</b>	529	0,09	3,67	0,04	0,010	0,94	7,32	89,9	2,15·10 <sup>-3</sup>
<b>Priemer Average</b>	526	0,11	6,12	0,04	0,010	1,01	7,32	89,8	4,73·10 <sup>-3</sup>
<b>Abonyiho dóm – pravostranný prítok/inflow in the Abonyi Dome</b>									
<b>Min.</b>	522	0,02	3,51	0,03	0,010	0,63	0,00	88,6	1,2810 <sup>-3</sup>
<b>Max.</b>	586	0,69	22,1	0,05	0,020	1,34	7,83	90,9	2,57·10 <sup>-2</sup>
<b>Medián Median</b>	571	0,03	4,72	0,04	0,020	0,88	6,84	89,5	2,06·10 <sup>-3</sup>
<b>Priemer Average</b>	560	0,13	6,84	0,04	0,020	0,96	6,01	89,8	5,35·10 <sup>-3</sup>
<b>Lavostranný prítok pred Veľkou sieňou/inflow in front of the Great Hall</b>									
<b>Min.</b>	520	0,11	2,98	0,09	0,003	0,38	17,0	44,4	2,92·10 <sup>-4</sup>
<b>Max.</b>	1097	0,84	14,8	0,25	0,010	1,26	54,1	80,1	1,31·10 <sup>-3</sup>
<b>Medián Median</b>	602	0,26	3,59	0,16	0,010	0,86	30,7	64,8	6,88·10 <sup>-4</sup>



Priemer Average	682	0,32	4,99	0,16	0,009	0,84	33,2	63,0	$7,89 \cdot 10^{-4}$
<b>Prameň Buzgó/the Buzgó Spring</b>									
Min.	516	0,09	1,85	0,04	0,010	0,79	9,16	74,2	$3,97 \cdot 10^{-4}$
Max.	611	0,31	18,4	0,12	0,020	1,15	23,3	87,8	$9,65 \cdot 10^{-3}$
Medián Median	556	0,11	3,34	0,05	0,020	0,98	10,6	86,7	$1,21 \cdot 10^{-3}$
Priemer Average	555	0,13	5,135	0,06	0,017	0,98	13,09	84,1	$2,11 \cdot 10^{-3}$
<b>Priesak – Kvapel' rožňavských jaskyniarov/leak from the Dripstone of Rožňava Cavers</b>									
Min.	535	0,02	3,12	0,04	0,010	0,71	7,90	87,0	$4,68 \cdot 10^{-4}$
Max.	569	0,71	8,82	0,05	0,020	1,13	9,97	89,1	$1,29 \cdot 10^{-3}$
Medián Median	542	0,02	3,74	0,05	0,020	0,90	9,24	87,8	$1,10 \cdot 10^{-3}$
Priemer Average	545	0,14	4,51	0,05	0,018	0,91	9,08	88,0	$9,55 \cdot 10^{-3}$

Vysvetlivky: M – celková mineralizácia, c – koncentrácia v  $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ , z – nábojové číslo,  $r\text{SO}_4/\text{M}$  – M je súčet c-z koncentrácií katiónov a aniónov,  $p_{\text{CO}_2}$  – parciálny tlak  $\text{CO}_2$

Legends: M – Total Dissolved Solids, c – Molarity, z – charge number,  $r\text{SO}_4/\text{M}$  – M is sum of cations and anions in  $\text{meq} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $p_{\text{CO}_2}$  – Partial pressure of  $\text{CO}_2$

zastúpení  $\text{A}_2$  zložky s priemernou hodnotou 89,8 c-z %. Podľa klasifikácie prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek väčšom ako 20 c-z % boli vody všetkých odberov  $\text{Ca-HCO}_3$  typu. Nízka koncentrácia horčíka vo vode sa prejavila nižšou hodnotou charakterizačného koeficientu  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$  (priemerná hodnota 0,11). Priemerná hodnota  $r\text{SO}_4/\text{M}$  bola 0,04 a priemerná hodnota  $r(\text{Na}+\text{K})/r(\text{Ca}+\text{Mg})$  bola 0,01 (Tab. 3).

Podľa vypočítaných hodnôt indexov nerovnovážnosti pre hlavné karbonátové minerály a sadrovec, a podľa výsledkov špeciálneho modelovania boli vody v rovnováhe s kalcitom a aragonitom. Zároveň boli tieto vody nenasýtené voči dolomitu a sadrovcu. Nasýtenie vôd voči kalcitu, aragonitu, dolomitu a sadrovcu bolo pomerne vyrovnané s minimálnymi odchýlkami od priemerných hodnôt.

Vody bočného prítoku na začiatku Veľkej siene mali odlišné chemické zloženie ako vody hlavného toku vytekajúce z Marikinho jazera. Vyššie boli koncentrácie síranov ( $55,6\text{--}322,6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) a koncentrácie horčíka ( $17,7\text{--}32,7 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ). S tým zrejme súvisí vyššia mineralizácia vôd bočného prítoku, ktorej maximálna hodnota bola  $1\,097 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ . Ostatné zložky boli vo vode prítomné v koncentráciách porovnateľných s vodami hlavného toku v mieste nad ich prítokom (Tab. 2). Pri vodách bočného prítoku boli v porovnaní s vodami z Marikinho jazera namerané aj vyššie hodnoty pH (priemerná hodnota 7,6) a vyššie kyslíkové nasýtenie (priemerná hodnota 92,7 %). Na druhej strane priemerná teplota vody bola nižšia ( $9,3 \text{ }^\circ\text{C}$ ), rovnako aj

obsah voľného  $\text{CO}_2$ . Vody v závislosti od meniaceho sa chemického zloženia predstavovali niekoľko genetických typov vôd: základný výrazný  $\text{Ca-HCO}_3$  typ, základný nevýrazný  $\text{Ca-HCO}_3$  typ, základný výrazný  $\text{Ca-Mg-HCO}_3$  typ a základný nevýrazný  $\text{Ca-SO}_4$  typ. Pomerne pestré boli aj výsledky klasifikácie na základe prevládajúcich iónov. Pri uplatnení hranice 20 c-z % boli vody  $\text{Ca-Mg-HCO}_3\text{-SO}_4$ ,  $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$ ,  $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$  alebo  $\text{Ca-Mg-HCO}_3$  typu. Pri hranici 25 c-z % to boli typy  $\text{Ca-Mg-HCO}_3$ ,  $\text{Ca-HCO}_3$ ,  $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$  a  $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ . Pomer  $r\text{Mg}/r\text{Ca}$  bol v porovnaní s Marikiným jazerom viac posunutý v prospech horčíka (priemerná hodnota 0,32). Zvýšené koncentrácie síranov sa odrazili aj na vyššej hodnote koeficienta  $r\text{SO}_4/\text{M}$  s priemernou hodnotou 0,16 (Tab. 3). Voda bola presýtená voči kalcitu, prípadne bola v rovnováhe s týmto minerálom v čase jej vyšších prítokov. Voči dolomitu bola voda v rovnováhe a voči aragonitu pretrvával rovnovážny stav.

Druhým sledovaným prítokom hlavného toku bol pravostranný bočný prítok v Abonyiho dóme. Ten mal svojim chemickým zložením relatívne blízko k vodám Marikinho jazera (Tab. 2 a 3). Vody boli slabo alkalické s priemernou teplotou  $9,3 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kyslíkové nasýtenie kolísalo v rozpätí 79–92 %. Mineralizácia bola oproti vodám z Marikinho jazera vyššia ( $522\text{--}586 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ), čo súvisí s vyššími koncentraciami vápnika (priemerná koncentrácia  $129 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) a hydrogenuhličitanov (priemerná koncentrácia  $387 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) vo vode. Koncentrácie horčíka boli vo vodách bočného prítoku nepatrne nižšie, za vyš-

Tab. 4. Chemické zloženie vôd starších chemických analýz priesakových vôd z Krásnohorskej jaskyne (Motyka et al., 2005).

Tab. 4. Chemical composition of older chemical analyses of seepage water in the Krásnohorská Cave (Motyka et al., 2005).

	pH	M	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	rMg/rCa	rNa/rK	rSO <sub>4</sub> /M
		(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(c·z) (meq·L <sup>-1</sup> )	(c·z) (meq·L <sup>-1</sup> )	(c·z) (meq·L <sup>-1</sup> )
Prvé jazero	8,6	439,3	112	1,09	0,38	0,25	3,57	5,86	43,2	272	0,02	2,58	0,08
Abonyiho dóm	8,2	493,0	125	1,35	0,50	0,62	3,72	5,17	44,2	312	0,02	1,37	0,07
Chodba perál	8,30	520,7	132	2,22	0,49	0,25	5,21	20,20	33,1	327	0,03	3,33	0,05

Vysvetlivky: M – celková mineralizácia, c – koncentrácia v mmol·l<sup>-1</sup>, z – nábojové číslo, rSO<sub>4</sub>/M – M je súčet c-z koncentrácií katiónov a aniónov

Legends: M – Total Dissolved Solids, c – Molarity, z – charge number, rSO<sub>4</sub>/M – M is sum of cations and anions in meq·L<sup>-1</sup>

šieho stavu (vzorka z 1.6.2010) sa naopak ich koncentrácia zvyšovala. Koncentrácie síranov boli vo vode pomerne konštantné, ich koncentrácia bola 21,4–30 mg·l<sup>-1</sup>. Pomer rMg/rCa dosahoval hodnoty od 0,02 do 0,69 (priemer 0,13). Priemerná hodnota koeficienta rSO<sub>4</sub>/M bola rovnaká ako v prípade Marikinho jazera (0,04). Pre vody bol typický základný výrazný Ca-HCO<sub>3</sub> genetický typ, ktorý mal tendenciu pri vyšších prietokoch zmeny na základný výrazný Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> typ. Rovnaký trend bol aj v prípade klasifikácie vôd podľa prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek väčšom ako 20 c-z %. Voda zo všetkých vzoriek bola v rovnováhe s kalcitom a aragonitom. Voči dolomitu prevládal stav nenasýtenia.

Posledným hodnoteným vzorkovacím miestom tejto skupiny vôd bola voda prameňa Buzgó. Voda vytekajúca z jaskyne bola podľa hodnôt pH slabó alkalická, s priemernou teplotou vody 9,3 °C. E<sub>H</sub> vôd dosahoval 374–514 mV. Priemerná hodnota kyslíkového nasýtenia bola 97,4 %. Obsah voľného CO<sub>2</sub> vo vode kolísal od 1,1 do 18,6 mg·l<sup>-1</sup>. Podľa Gazdovej klasifikácie boli vody výhradne základného výrazného Ca-HCO<sub>3</sub> typu s majoritným zastúpením A<sub>2</sub> zložky s priemernou hodnotou 84,1 c-z %. Občasne vyššie koncentrácie síranov vo vode sa pri klasifikácii chemického zloženia vôd prejavili len pri jednej vzorke z 27.10.2009 v rámci klasifikácie prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek väčšom ako 20 c-z %. V tomto prípade boli vody podľa uvedeného hodnotenia Ca-HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub> typu. V ostatných prípadoch dominoval Ca-HCO<sub>3</sub> typ. Najvyšší podiel na celkovej mineralizácii vôd mali katióny vápnika, hydrogenuhličitanové a síranové anióny (Tab. 2). Priemerné hodnoty základných charakterizačných koeficientov boli veľmi podobné koeficientom vypočítaných pre vody z Marikinho jazera (Tab. 3). Na druhej strane v porovnaní s týmito vodami bolo nasýtenie vôd prameňa voči kalcitu a aragonitu vyššie. Voči dolomitu aj vo vode na tomto mieste pretrvával stav nenasýtenia.

#### 4.2. Chemické zloženie jaskynných vôd vertikálnej cirkulácie

Vzorky vody vertikálnej cirkulácie boli odoberané z jaskyne len z jedného miesta, ktorým bol Kvapľa rožňavských jaskyniarov

v Sieni obrov. Vzorky vody boli odoberané priamo z hornej časti kvapľa súčasne s ďalšími odbermi v jaskyni.

Podľa celkovej mineralizácie bolo chemické zloženie priesakových vôd pomerne stabilné, aj napriek meniacej sa intenzite priesaku. Celková mineralizácia vôd dosahovala 533–569 mg·l<sup>-1</sup>. Vody boli slabó alkalické s priemernou teplotou 9,2 °C. E<sub>H</sub> vôd kolísalo v rozpätí 445–532 mV, priemerná hodnota kyslíkového nasýtenia bola 86,8 %. Dominantnými iónmi vo vode boli hydrogenuhličitanové anióny a katióny vápnika (Tab. 2). Z aniónov dosahovali vyššie koncentrácie aj sírany, ktorých maximálna koncentrácia bola 33,3 mg·l<sup>-1</sup>. Vyrovnané chemické zloženie sa prejavilo aj v rámci základnej klasifikácie chemického zloženia vôd. Podľa Gazdovej klasifikácie boli vody základného výrazného Ca-HCO<sub>3</sub> typu, len v rámci júňového odberu 2010 v čase vyššej intenzity priesaku a vysokého vodného stavu boli vody základného výrazného Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> typu s hodnotou koeficientu rMg/rCa 0,71. Podobne tomu bolo aj v prípade klasifikácie prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek väčšom ako 20 c-z %. Pri uplatnení oboch hraničných kritérií c-z % boli vody Ca-HCO<sub>3</sub> typu, ktorý sa v prípade júňového odberu v roku 2010 zmenil na Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> typ. Kvalita priesakových vôd bola po chemickej stránke v stanovených ukazovateľoch veľmi dobrá. Z výpočtov indexov nerovnovážnosti vyplýva, že voda bola v rovnováhe s kalcitom, respektíve bola voči tomuto minerálu presýtená. Rovnovážny stav vody bol charakteristický pre aragonit. Voči dolomitu bola voda prevažne nenasýtená.

Pre komplexnejšie zhodnotenie vôd vertikálnej cirkulácie sme do celkového hodnotenia zahrnuli aj tri staršie chemické analýzy priesakových vôd z jaskyne. Tieto analýzy boli vykonané z jednorazových odberov v novembri 1998 (Motyka et al., 2005) na troch rozdielnych miestach v jaskyni; v priestore Prvého jazera, Abonyiho dóme a Chodbe perál. Všetky tri vzorky mali chemické zloženie podobné chemickému zloženiu priesakových vôd v mieste Kvapľa rožňavských jaskyniarov (Tab. 4).

Odobraté vzorky vody boli podľa Gazdovej klasifikácie základného výrazného Ca-HCO<sub>3</sub> typu a podľa klasifikácie prevládajúcich iónov s kritériom ekvivalentného podielu zložiek väčšom ako 20 c-z % Ca-HCO<sub>3</sub> typu. Menšie rozdiely v zložení medzi tromi vzorkami boli spôsobené pravdepodobne ich polohou v rozdielnych častiach jaskyne, ktoré charakterizuje rozdiel-

Tab. 5. Štatistické vyhodnotenie vybraných ukazovateľov chemického zloženia vôd prameňov v okolí Krásnohorskej jaskyne.  
 Tab. 5. Statistic evaluation of selected parameters of water chemical composition of springs in the vicinity of the Krásnohorská Cave.

	$t_{\text{vody}}$ $t_{\text{water}}$	pH	EC	CHSK <sub>Mn</sub> COD <sub>Mn</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>
	(°C)		(mS·m <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )	(mg·l <sup>-1</sup> )
<b>Prameň Pri kaplnke/the Pri kaplnke Spring</b>														
<b>Min.</b>	8,7	7,3	54,4	0,12	88	6,66	0,02	0,95	0,13	2,77	4,52	29,2	312	2,20
<b>Max.</b>	9,8	7,6	61,7	1,05	142	23,00	0,42	1,57	0,96	3,98	6,29	78,6	351	15,3
<b>Medián</b> <b>Median</b>	9,2	7,5	58,5	0,40	123	8,68	0,10	1,17	0,50	3,19	5,38	37,7	347	8,1
<b>Priemer</b> <b>Average</b>	9,2	7,4	58,3	0,52	121	10,56	0,14	1,20	0,50	3,25	5,40	44,9	342	8,5
<b>Prameň Pod kameňolomom/the Pod kameňolomom Spring</b>														
<b>Min.</b>	8,5	7,1	49,9	0,08	88	4,04	0,00	0,80	0,10	3,11	4,02	24,7	304	8,80
<b>Max.</b>	9,1	7,4	59,2	1,00	216	24,20	0,45	1,90	0,52	3,58	8,27	33,7	354	17,6
<b>Medián</b> <b>Median</b>	8,9	7,3	56,0	0,39	124	4,94	0,08	1,08	0,36	3,46	6,94	27,4	351	12,0
<b>Priemer</b> <b>Average</b>	8,9	7,3	56,1	0,43	131	7,39	0,12	1,18	0,32	3,36	6,75	28,4	345	12,6

Vysvetlivky: EC – konduktivita, CHSK<sub>Mn</sub> – chemická spotreba kyslíka, CO<sub>2</sub> – voľný oxid uhličitý  
 Legends: EC – conductivity, COD<sub>Mn</sub> – Chemical oxygen demand, CO<sub>2</sub> – Free carbon dioxide

na hrúbka nadložia, mierne geologické odlišnosti a pravdepodobne aj rozdielna intenzita priesaku. Kvalita starších aj novších vzoriek vôd bola porovnateľná, jedine v prípade Chodby perál boli zistené vyššie koncentrácie dusičnanov (20,2 mg·l<sup>-1</sup>). V porovnaní s odberným miestom na kvapli boli staršie vzorky vody menej mineralizované, čo súvisí hlavne s nižšími koncentraciami hydrogenuhličitanov vo vode. Vzorky vody mali naopak vyššie hodnoty pH, boli slabo alkalické. Z hľadiska nasýtenia boli krasové vody presýtené voči kalcitu, aragonitu aj dolomitu.

#### 4.3. Chemické zloženie krasových vôd z ďalších prameňov v okolí jaskyne

Indície stopovacích skúšok o prepojení jaskynného systému s ďalšími prameňmi v okolí jaskyne boli dôvodom ich zaradenia medzi vzorkovacie miesta. Z prameňa Pod kameňolomom bolo postupne odobraných 8 vzoriek (marec, máj október 2009; apríl, jún, október 2010; apríl, september 2011), rovnako aj z prameňa Pri kaplnke. Z občasného prameňa bola vzhľadom na jeho obmedzenú aktivitu odobratá len jedna vzorka vody v júni 2010.

Vody prameňov boli rovnako ako u prameňa Buzgó slabo alkalické, základného výrazného Ca-HCO<sub>3</sub> typu s najvyšším zastúpením A<sub>2</sub> zložky s priemernou hodnotou 87,6 c-z % v prípade prameňa Pod kameňolomom, v prípade prameňa Pri kaplnke s priemernou hodnotou 83,5 c-z % a v prípade Občasného pra-

meňa s hodnotou 86,5 c-z %. Dominantnými iónmi vo vode boli hydrogenuhličitanové anióny a kationy vápnika (Tab. 5).

Namerané hodnoty EC vo vode prameňov boli v porovnaní s prameňom Buzgó nižšie. Najnižšie boli vo vode prameňa Pod kameňolomom (priemerná hodnota 56,1 mS·m<sup>-1</sup>), o niečo vyššie vo vode prameňa Pri kaplnke (priemerná hodnota 58,3 mS·m<sup>-1</sup>). Voda Občasného prameňa mala EC porovnateľné s vodou prameňa Buzgó. Rovnaké vzťahy platili aj pri síranových iónoch, čo sa prejavilo aj v hodnote koeficienta rSO<sub>4</sub>/M. Jeho priemerná hodnota bola v rámci sledovaných prameňov najnižšia pri prameni Pod kameňolomom (0,04) (Tab. 6).

Nasýtenie vody voči kalcitu a aragonitu bolo nižšie ako pri vode z prameňa Buzgó. Vzorky vody z týchto prameňov boli v rovnováhe s kalcitom a aragonitom, voda prameňa Pod kameňolomom bola väčšinou nedosýtená voči dolomitu, vody prameňa Pri kaplnke a Občasného prameňa boli s dolomitom v rovnováhe.

#### 4.4. Mikrobiologický profil krasových vôd

Mikrobiologická kvalita vôd Krásnohorskej jaskyne bola hodnotená v období rokov 2009–2011, kedy bolo realizovaných celkovo osem odberov vzoriek vôd na štyroch odberových miestach: Marikino jazierko, pravostranný prítok v Abonyiho dome, ľavostranný prítok pred Veľkou sieňou, vyústenie hlav-

Tab. 6. Vypočítané charakterizačné koeficienty a Palmer-Gazdove charakteristiky v jaskynných vodách.

Tab. 6. Characterization indexes and Palmer-Gazda characteristics in the cave water.

	Charakterizačné koeficienty Characterization indexes					Palmer-Gazdove charakteristiky Palmer-Gazda characteristics			
	M	rMg/rCa	rNa/rK	rSO <sub>4</sub> /M	r(Na+K)/r(Ca+Mg)	S <sub>1</sub> (NO <sub>3</sub> )	S <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> )	A <sub>2</sub>	P <sub>CO2</sub>
	(mg·L <sup>-1</sup> )	(c·z)	(c·z)	(c·z)	(c·z)	(c·z %)	(c·z %)	(c·z %)	(MPa)
(mg·L <sup>-1</sup> )	(meq·L <sup>-1</sup> )	(meq·L <sup>-1</sup> )	(meq·L <sup>-1</sup> )	(meq·L <sup>-1</sup> )	(meq %)	(meq %)	(meq %)		
<b>Prameň Pri kaplnke/the Pri kaplnke Spring</b>									
<b>Min.</b>	502	0,09	2,00	0,05	0,01	0,87	9,3	73,6	6,96·10 <sup>-4</sup>
<b>Max.</b>	554	0,43	17,0	0,12	0,01	1,18	23,6	88,0	1,44·10 <sup>-3</sup>
<b>Medián Median</b>	531	0,12	3,84	0,06	0,01	1,09	11,8	85,4	8,97·10 <sup>-4</sup>
<b>Priemer Average</b>	529	0,16	5,55	0,07	0,01	1,04	13,8	83,5	1,01·10 <sup>-3</sup>
<b>Prameň Pod kameňolomom/the Pod kameňolomom Spring</b>									
<b>Min.</b>	456	0,03	3,49	0,03	0,01	0,51	7,9	85,9	1,06·10 <sup>-3</sup>
<b>Max.</b>	613	0,45	23,8	0,05	0,01	1,27	10,7	89,2	2,16·10 <sup>-3</sup>
<b>Medián Median</b>	523	0,07	5,71	0,05	0,01	0,99	9,1	87,8	1,27·10 <sup>-3</sup>
<b>Priemer Average</b>	525	0,11	8,06	0,04	0,01	0,95	9,2	87,6	1,47·10 <sup>-3</sup>
<b>Občasný prameň/Occasional spring</b>									
	520	0,51	5,79	0,05	0,01	1,42	9,9	86,5	1,90·10 <sup>-3</sup>
<b>Potok pod kaplnkou/creek bellow the chapel</b>									
	526	0,13	2,83	0,06	0,01	0,92	11,7	85,5	4,36·10 <sup>-4</sup>
	529	0,14	24,68	0,09	0,05	1,52	16,13	78,9	3,14·10 <sup>-4</sup>
<b>Rakaťa</b>									
	526	0,04	6,64	0,05	0,02	2,17	9,8	84,1	1,90·10 <sup>-3</sup>

Vysvetlivky: M – celková mineralizácia, c – koncentrácia v mmol·l<sup>-1</sup>, z – nábojové číslo, SO<sub>4</sub>/M – M je súčet c-z koncentrácií katiónov a aniónov, p<sub>CO2</sub> – parciálny tlak CO<sub>2</sub>

Legends: M – Total Dissolved Solids, c – Molarity, z – charge number, SO<sub>4</sub>/M – M is sum of cations and anions in meq·L<sup>-1</sup>, p<sub>CO2</sub> – Partial pressure of CO<sub>2</sub>

ného toku na povrch do prameňa Buzgó, asi 30 m pred prameňom na konci štólne spájajúcej hlavný vchod do jaskyne s jaskynnými priestormi. V rokoch 2010 a 2011 bola analyzovaná aj priesaková voda nad Kvapľom rožňavských jaskyniarov, celkovo štyri odbery. Uvedené odberové miesta doplnil jednorazový odber na lokalite Rakaťa (24.6.2009). Išlo o vzorku vody zo studne pod rovnakým názvom (GPS súradnice: 48,591183°S;

20,567741°V), v blízkosti lesníckej chaty. Uvedené odberné miesto sa nachádza asi 2,5 km juhozápadne od Krásnohorskej jaskyne. Celkovo bolo odobraných 41 vzoriek vôd na mikrobiologickú analýzu.

V analyzovanej heterotrofnej, kultivovateľnej zložke mikroorganizmov boli hodnoty legislatívnych ukazovateľov na všetkých horizontálnych odberových miestach hlboko pod limitom.

Tab. 7. Mikrobiologické ukazovatele jaskynných vôd v Krásnohorskej jaskyni.

Tab. 7. Microbiological parameters of cave water in the Krásnohorská cave.

(KTJ·ml <sup>-1</sup> ) (CFU)	NV 269/2010	25. 3. 2009	19. 5. 2009	24. 6. 2009	27. 10. 2009	1. 6. 2010	26. 10. 2010	12. 5. 2011	29. 9. 2011
<b>Marikino jazero/the Marika's Lake</b>									
KM22	5000	36	111	3	164	3	> 300	23	8
KM36	-	1	10	0	90	260	> 300	0	1
KB	100	0	0	0	19	35	42	0	0
TKB	20	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	10	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Abonyiho dóm – pravostranný prítok/ inflow in the Abonyi Dome</b>									
KM22	5000	0	> 300	14	11	15	> 300	8	14
KM36	-	1	> 300	1	1	8	29	4	2
KB	100	0	0	0	0	1	13	0	0
TKB	20	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	10	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Lavostranný prítok pred Veľkou sieňou/inflow in front of the Great Hall</b>									
KM22	5000	8	223	15	18	2	> 300	6	19
KM36	-	2	85	17	0	1	59	2	5
KB	100	0	0	0	0	2	50	0	1
TKB	20	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	10	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Prameň Buzgó/the Buzgó Spring</b>									
KM22	5000	27	> 300	5	139	17	> 300	45	18
KM36	-	0	91	1	48	14	215	2	3
KB	100	0	3	0	10	3	50	0	2
TKB	20	0	0	0	0	0	0	0	0
EK	10	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Priesak – Kvapel' rožňavských jaskyniarov/leak from the Dripstone of Rožňava Cavers</b>									
KM22	5000	ND	ND	ND	ND	1	> 300	4	2

KM36	-	ND	ND	ND	ND	0	215	1	1
KB	100	ND	ND	ND	ND	0	50	0	0
TKB	20	ND	ND	ND	ND	0	0	0	0
EK	10	ND	ND	ND	ND	0	0	0	0

Vysvetlivky: KM22 – kultivovateľné mikroorganizmy pri 22 °C, KM36 – kultivovateľné mikroorganizmy pri 36 °C, KB – koliformné baktérie, TKB – termotolerantné koliformné baktérie, EK – enterokoky, KTJ – kolónie tvoriaca jednotka, ND – nedeterminované, NV 269/2010 – limity podľa Nariadenia vlády SR č. 269/2010 Z. z.

Legends: KM22 – Microorganisms cultivable at 22 °C, KM36 – Microorganisms cultivable at 36 °C, KB – Coliforms, TKB – Faecal coliforms, EK – Enterococci, CFU – colony forming unit, ND – not-determined, NV 269/2010 – limits according to Government Ordinance of Slovak Republic No. 269/2010.

Rádovo sa pohybovali u KM22, KM36, KB v intenciách  $10^0$  až  $10^1$ , vo výnimočných prípadoch (19.5.2009; 26.10.2010) u psychrofilných a mezofilných mikroorganizmov medzi  $10^2$  až  $10^3$ . Indikátory fekálnej kontaminácie počas celého sledovaného obdobia vykazovali nulovú hodnotu (Tab. 7). Počas odberu 15.4.2010 bolo možné odobrať vzorku len z miesta toku Buzgó, ostatné odberové miesta boli pre vysoký stav vody, spojený s intenzívnou zrážkovou činnosťou, neprístupné.

V priesakovej vode nad Kvapľom rožňavských jaskyniarov boli zaznamenané vyššie, ale podlimitné hodnoty KM22, KM36 a KB v októbri 2010, v lete 2010 a v roku 2011 boli hodnoty týchto ukazovateľov prakticky nulové. Rovnako nulové hodnoty boli zaznamenané aj u indikátorov fekálnej kontaminácie (TKB, EK) (Tab. 7).

Hodnoty mikrobiálnych indikátorov na lokalite Rakata boli nasledovné: KM22 >  $10^3$  KTJ·ml<sup>-1</sup>, KM36 >  $10^3$  KTJ·ml<sup>-1</sup>, KB >  $10^3$  KTJ·ml<sup>-1</sup>, TKB = 0 KTJ·ml<sup>-1</sup>, EK = 86 KTJ·ml<sup>-1</sup>.

## 5. DISKUSIA

Krasové vody Krásnohorskej jaskyne patria k vodám s petrogenou karbonátogénnou mineralizáciou. Vody sú väčšinou neutrálne až slabo alkalické (pH v rozsahu 7,1 až 7,9). Celková mineralizácia vlastných jaskynných vôd sa pohybuje od 488 do 1 097 mg·l<sup>-1</sup>. Dominantným typom vôd je základný výrazný Ca-HCO<sub>3</sub> typ, ktorý je spojený s procesom rozpúšťania karbonátov ako hlavným procesom formujúcim chemické zloženie vôd v jaskynnom systéme. K ďalším genetickým typom vôd, s ktorými sa v jaskyni stretávame, patrí základný výrazný Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> typ, základný nevýrazný Ca-HCO<sub>3</sub> typ a základný nevýrazný Ca-SO<sub>4</sub> typ (Obr. 3). Uvedené genetické typy vôd sú typické pre celú Silickú planinu, napr. jaskyne Domica (Haviarová et al., 2010) a Milada (Haviarová et al., 2011<sup>a</sup>).

Hlavnými iónmi vo vode sú hydrogenuhličitanové anióny a katióny vápnika. V niektorých častiach systému (napr. bočný prítok pred Veľkou sieňou) majú vody horizontálnej cirkulácie vyššie zastúpenie síranov vystupujúcich pravdepodobne ako produkt rozpúšťania evaporitov – sadrovcov a anhydritov. Ich zdrojom môžu byť v blízkosti ležiace spodnotrasové sinské vrstvy (piesčité bridlice, slienité vápence, miestami s vložkami dolomitov a poloh organodetrických vápencov) alebo šošovky

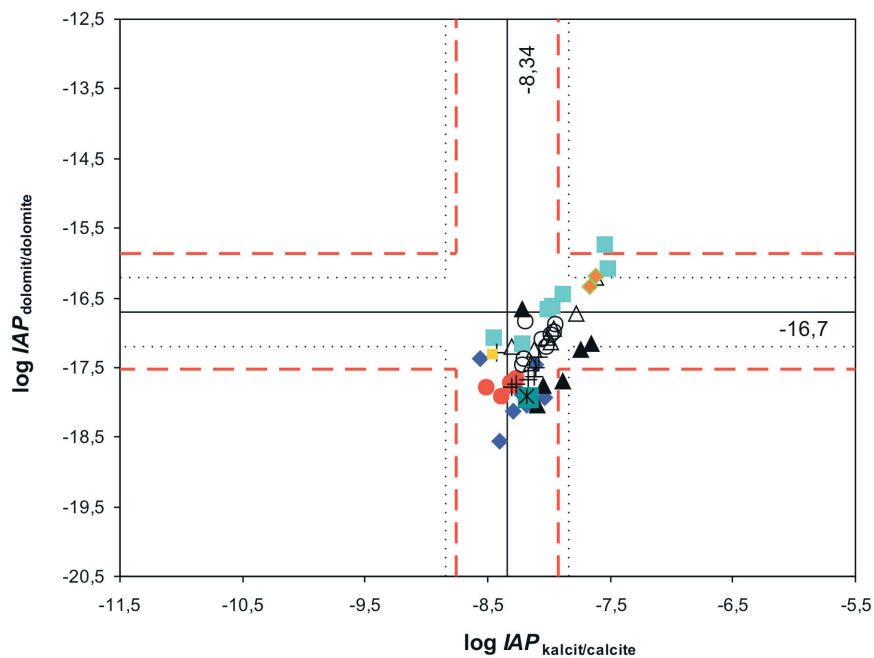
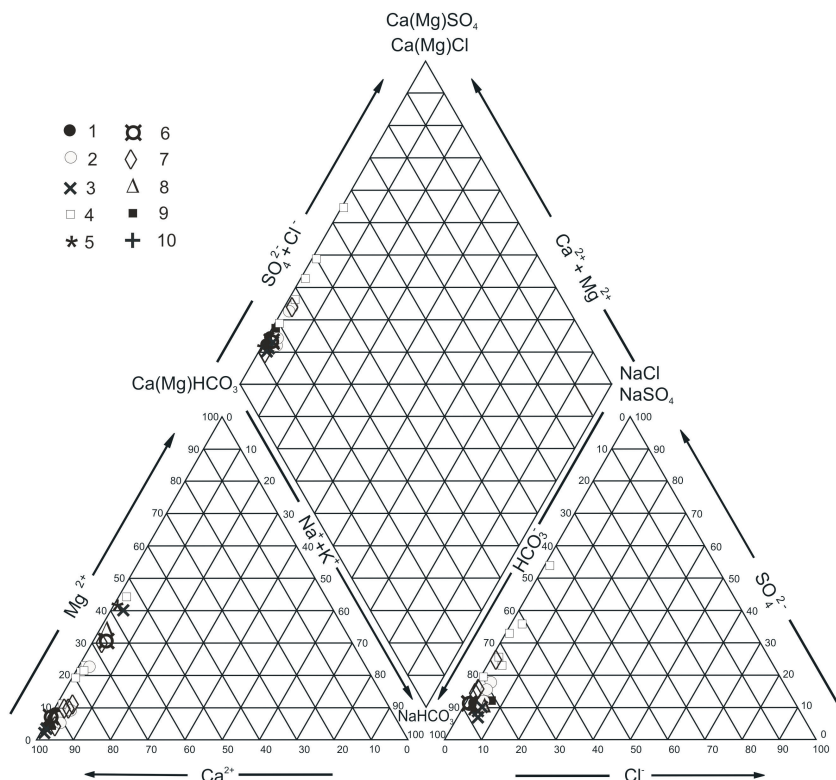
pestrých vápencov, dolomitov a rauvakov obsahujúcich polohy evaporitov, ktoré vystupujú na rozhraní verfénskeho súvrstvia a gutensteinských vápencov (Mello et al., 1997<sup>a</sup>, 1997<sup>b</sup>). V ostatných častiach systému pochádzajú sírany z atmosféry, z procesov oxidácie sulfidov, prípadne už spomínaného rozpúšťania síranov obsiahnutých ako prímies strednotriasových karbonátových hornín. Za vyšších stavov sa vo vodách systému zvyšuje koncentrácia horčíka vo vode, čo sa odráža na vyššej hodnote koeficienta rMg/rCa. Do systému pri vyššom zvodnení masívu dotekajú vody, ktoré sa vo väčšej miere formujú v prostredí dolomitických vápencov až dolomitov. Prítomnosť ílových minerálov je v karbonatických horninách nízka, priemerná hodnota koeficienta r(Na + K)/r(Mg + Ca) je nižšia ako 0,01, čo indikuje prúdenie vôd v karbonátoch. Z jaskynných vôd z hladiska chemického zloženia treba vyzdvihnúť už spomínaný bočný prítok pred Veľkou sieňou, ktorý sa vzhľadom k rozdielnej infiltračnej oblasti vyznačuje vyššou mineralizáciou vôd (priemerná hodnota 682 mg·l<sup>-1</sup>), vyšším podielom síranov, v porovnaní s ostatnými jaskynnými vodami aj vyššou koncentráciou horčíka, vyššími hodnotami pH a v neposlednej rade tiež vyšším stupňom nasýtenia vôd voči kalcitu. Z doterajších pozorovaní v jaskyniach Silickej planiny zatiaľ nebol dokumentovaný žiaden podzemný tok, v ktorom by mali sírany také vysoké koncentrácie a celková mineralizácia vôd by prekračovala 1 000 mg·l<sup>-1</sup> (Haviarová et al., 2010; 2011<sup>a</sup>; 2011<sup>b</sup>).

Výsledky špeciálneho modelovania jaskynných vôd poukázali na rozdielny stupeň ich nasýtenia voči hlavným karbonátovým minerálom v rozdielnych častiach systému, s ktorým súvisia rozdielne podmienky tvorby alebo deštrukcie sintrovej výzdoby (Obr. 4).

Zaujímavým je zistenie, že vody s vyššou koncentráciou síranov, t.j. vody bočného prítoku pred Veľkou sieňou a následne aj vody hlavného toku pod týmto prítokom majú vyššie nasýtenie voči kalcitu. Dôvodom môže byť proces samotného rozpúšťania sadrovca. Sadrovec podporuje rozpustnosť dolomitu. Počas rozpúšťania sadrovca narastá koncentrácia Ca<sup>2+</sup> iónov, ktorá vedie k vyzrážaniu kalcitu. Pokles koncentrácie CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> vplyvom vyzrážania kalcitu vyvoláva rozpúšťanie dolomitu a nárast koncentrácie Mg<sup>2+</sup> vo vode (Appelo & Postma, 2005). Rovnako pri miešaní vôd s vyššou koncentráciou síranov s vodami s karbonátogénnou mineralizáciou môže dochádzať k narušeniu karbonátovej rovnováhy a následným procesom inkongruent-

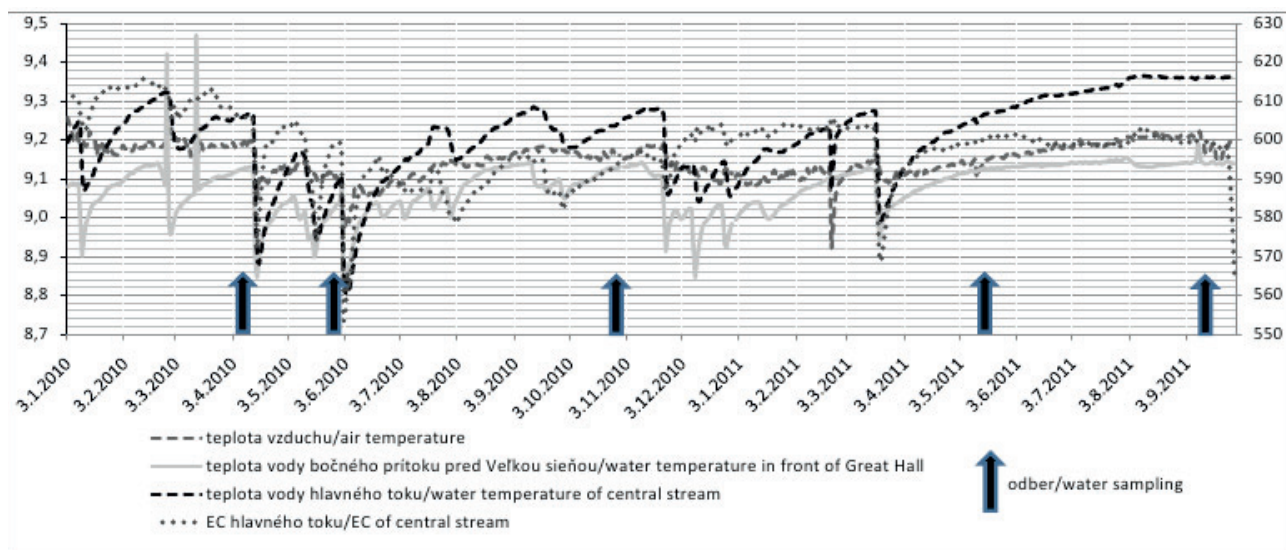
Obr. 3. Piperov graf vôd jaskynného systému (1 – Marikino jazero, 2 – prameň Buzgó, 3 – Kvapel rožňavských jaskyniarov, 4 – ľavostranný prítok pred Veľkou sieňou, 5 – prítok v Abónyiho dóme, 6 – prameň Pod kameňolomom, 7 – prameň Pri kaplnke, 8 – občasný prameň, 9 – Rakaťa, 10 – potok pod kaplnkou).

Fig. 3. Piper's diagram of water of cave system (1 – the Marika's Lake, 2 – the Buzgó Spring, 3 – the Dripstone of Rožňava Cavers, 4 – inflow in front of the Great Hall, 5 – inflow in the Abonyi Dome, 6 – the Pod kameňolomom Spring, 7 – the Pri kaplnke Spring, 8 – occasional spring, 9 – Rakaťa, 10 – creek below the chapel).



Obr. 4. Graf nasýtenia sledovaných vôd vzhľadom na kalcit a dolomit.  
Fig. 4. Diagram of water saturation with respect to calcite and dolomite.

- Marikino jazero (the Marika's Lake)
- ◆ prítok v Abónyiho dóme (inflow in the Abonyi Dome)
- ▲ Kvapel rožňavských jaskyniarov (the Dripstone of Rožňava Cavers)
- △ Prameň Buzgó (the Buzgó Spring)
- prítok pred Veľkou sieňou (inflow in front of the Great Hall)
- + Prameň Pod kameňolomom (the Pod kameňolomom Spring)
- Prameň Pri kaplnke (the Pri kaplnke Spring)
- ⊗ Rakaťa
- ◇ Potok pod kaplnkou (Creek below the chapel)
- ⊕ Občasná vyvieracia (Occasional spring)



Obr. 5. Priebeh kontinuálne sledovaných parametrov v Krásnohorskej jaskyni za obdobie 1.1.2010–30.9.2011, priemerné denné hodnoty (s vyznačením odberov vzoriek).

Fig. 5. The course of continual monitoring parameters in the Krásnohorská Cave during time period 1.1.2010–30.9.2011, average daily values (with marking of water sampling).

ného rozpúšťania karbonátov (Hyánková & Melioris, 1992). Vody jaskynného toku vystupujúce na povrch cez vyvieracu Buzgó sú dostatočne nasýtené. Po ich výstupe na povrch dochádza k uvoľneniu  $\text{CO}_2$ , vody získavajú schopnosť vyzrážania  $\text{CaCO}_3$ . Vody povrchového toku pred jaskyňou znižujú podiel voľného  $\text{CO}_2$  až na nulu za súčasného zvyšovania indexu nerovnovážnosti voči kalcitu. Vyššie nasýtenie voči kalcitu majú aj priesakové vody v jaskyni, ktoré sú schopné tvorby sintrovej výzdoby. V ich prípade je zvýšené nasýtenie pri súčasných podmienkach spôsobené hlavne dlhšou interakciou presakujúcich vôd s karbonátovým prostredím.

Odbery vzoriek vody v Krásnohorskej jaskyni boli vykonané za rozdielnych hydrologických situácií, počas nižších, priemerných, aj vyšších vodných stavov. V čase výskumu bola jaskyňa niekoľkokrát zatopená, čo znemožnilo vzorkovanie vody priamo v jej priestoroch. Takýto stav bol napr. 15.4.2010, kedy bolo možné vzorky vody odobrať len z krasových prameňov. Niekoľkonásobné povodne extrémnych rozsahov (napr. počas zatopenia jaskyne začiatkom júna v roku 2010 dosahoval prietok v jaskyni viac ako  $5\,000\text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ ) spôsobili poškodenie merného objektu SHMÚ na prameni Buzgó. Z uvedeného dôvodu chýbajú dáta o režimových zmenách prameňa, a teda aj podzemného toku v čase riešenia úlohy. K dispozícii boli aspoň vlastné kontinuálne merania EC a teploty vody hlavného toku, a teploty vzduchu v jaskyni. Podľa nich sa EC hlavného toku pred Veľkou sieňou (pred ľavostranným bočným prítokom) pohybovala v období 1.1.2010–30.9.2011 od  $55,3$  do  $61,6\text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$  s priemernou hodnotou  $59,8\text{ mS}\cdot\text{m}^{-1}$ , teplota vody kolísala v rozpätí  $8,8$  až  $9,4\text{ }^\circ\text{C}$  (priemerná hodnota  $9,2\text{ }^\circ\text{C}$ ) pri teplote vzduchu pohybujúcej sa v intervale  $8,9$  až  $9,3\text{ }^\circ\text{C}$  (priemerná hodnota  $9,1\text{ }^\circ\text{C}$ ). Teplota bočného prítoku sa za rovnaké časové obdobie pohybovala v rozpätí  $8,8$  až  $9,5\text{ }^\circ\text{C}$  (priemerná hodnota  $9,1\text{ }^\circ\text{C}$ ) (Obr. 5).

Podľa štatistického a grafického zobrazenia nameraných veličín, ktoré boli spracované do priemerných denných hodnôt je možné konštatovať, že rozkyv hodnôt EC a teploty vody je počas roka pomerne malý. Voda v rámci svojho obehu má za normálnych podmienok dostatočne dlhý čas na to, aby sa jej teplota postupne vyrovnala s teplotou vzduchu v podzemí. Teplota vody hlavného toku je pritom nepatrne vyššia ako je teplota vzduchu v mieste merania. Naopak teplota vody bočného prítoku je nižšia ako teplota vody hlavného toku, čo naznačuje kratšiu dĺžku obehových ciest v systéme.

Korelačná matica Spearmanovej korelácie hodnotiaca vzájomné vzťahy medzi kontinuálne meranými parametrami určila všetky získané korelačné koeficienty ako štatisticky významné. Najvyššia korelácia bola pritom medzi teplotou vody hlavného toku a bočného prítoku ( $R_{xy} = 0,9$ ) a teplotou vody hlavného toku a teplotou vzduchu ( $R_{xy} = 0,76$ ).

Korelačná matica Spearmanovej korelácie posudzujúca vzťahy medzi jednotlivými odbernými miestami (zhotovená zo 6 chemických analýz z každej lokality) potvrdila štatisticky významnú kladnú koreláciu medzi všetkými odbernými miestami v jaskyni a prameňmi Pod kameňolomom a Pri kaplnke (Tab. 8). Najvyššie vzťahy boli určené medzi prameňom Buzgó a prameňom Pri kaplnke ( $R_{xy} = 0,985$ ), Marikínym jazerom a prítokom v Abónyiho dóme ( $R_{xy} = 0,983$ ), Marikínym jazerom a prameňom Pod kameňolomom ( $R_{xy} = 0,985$ ), prítokom v Abónyiho dóme a prameňom Pod kameňolomom ( $R_{xy} = 0,988$ ), prítokom v Abónyiho dóme a priesakom pri Kvapli rožňavských jaskyniarov ( $R_{xy} = 0,987$ ), prameňom Buzgó a bočným prítokom pred Veľkou sieňou ( $R_{xy} = 0,983$ ), prameňom Pri kaplnke a bočným prítokom pred Veľkou sieňou ( $R_{xy} = 0,981$ ), kvapľom rožňavských jaskyniarov a prameňom Pod kameňolomom ( $R_{xy} = 0,984$ ). Najnižší korelačný koeficient bol medzi kvapľom a bočným prítokom pred Veľkou sieňou ( $R_{xy} = 0,956$ ).



Tab. 8. Korelačná matica Spearmanovej korelácie

Tab. 8. Correlation matrix of Spearman correlation

Marikino jazero the Marika's Lake	-						
Abonyiho dóm – pravostranný prítok inflow in the Abonyi Dome	0,983	-					
Lavostraný prítok pred Veľkou sieňou inflow in front of the Great Hall	0,9778	0,9582	-				
Kvapel rožňavských jaskyniarov the Dripstone of Rožňava Cavers	0,9741	0,9871	0,9564	-			
Prameň Buzgó the Buzgó Spring	0,9798	0,9645	0,9829	0,9677	-		
Prameň Pri kaplnke the Pri kaplnke Spring	0,9764	0,9583	0,9812	0,9596	0,985	-	
Prameň Pod kameňolomom the Pod kameňolomom Spring	0,9848	0,988	0,9683	0,9840	0,9736	0,9729	-

Aj podľa týchto výsledkov môžeme predpokladať, že vody prameňa Pod kameňolomom sú formované v rovnakom prostredí ako vody Marikino jazera. Vetva prítoku v Abonyiho dome je autochtónna, podľa pomeru rMg/rCa je formovaná v prostredí vápencov, za vyšších stavov s vplyvom dolomitických vápencov, respektíve dolomitickej zložky. Nejde teda o žiadnu skrytú odbočku hlavného toku v časti pod Veľkou sieňou. Prípustná ostáva možnosť, že ide o skoršiu odbočku hlavného toku ešte pred touto časťou jaskyne. V prípade prameňa Pri kaplnke na základe zistenej korelácie je možné predpokladať formovanie jeho vôd v rovnakom horninovom prostredí ako v prípade vôd bočného prítoku pred Veľkou sieňou. Podľa korelácie nie je možné vylúčiť ani možnosť, že ide o vedľajšiu vetvu hlavného toku po jeho zmiešaní s vodami spomínaného bočného prítoku.

Korelačná analýza chemického zloženia vôd pre jednotlivé odberné miesta nepriniesla príliš veľkú zhodu vo vzájomnej korelácií jednotlivých zložiek a ako štatisticky významné vystupovali len málokteré korelácie (Tab. 9). Pri súčasnom zaradení všetkých chemických analýz do hodnotenia boli dôvodom pravdepodobne hlavne zmeny chemického zloženia v čase a pomerne nízke koncentrácie vedľajších prvkov vo vode. Vyššie korelačné závislosti boli zistené pri korelačnej matici vytvorenej zo 43 chemických analýz pre celý systém Krásnohorskej jaskyne vrátane prameňa Pri kaplnke a Pod kameňolomom. Zo štatisticky významných korelácií v tejto korelačnej matici môžeme poukázať na kladnú koreláciu medzi vápnikom a hydrogenuhličitanmi, horčíkom a síranmi, chloridmi a síranmi, celkovou mineralizáciou a vápnikom a hydrogenuhličitanmi. V prípade korelačných matíc pre samostatné vzorkovacie miesta vystupuje pre odberové miesto „bočný prítok pred Veľkou sieňou“ ako štatisticky významná aj korelácia medzi celkovou mineralizáciou a síranmi a korelácia medzi vápnikom a síranmi. Hydrogenuhličitanové rovnováhy sa v korelačných maticiach

prejavili v negatívnej korelácií pH a obsahu voľného CO<sub>2</sub>, aj keď nie vždy išlo o korelácie s dosiahnutou hladinou významnosti  $\alpha=0,05$ . Najužšie korelačné vzťahy boli na miestach s najvyšším stupňom nasýtenia vôd voči kalcitu (bočný prítok pred Veľkou sieňou, prameň Buzgó, kvapel). Všeobecne platí, že pri spotrebe CO<sub>2</sub> v procese rozpúšťania karbonátov sa zvyšuje pH vody. Aj preto mali vody z uvedených miest v porovnaní s ostatnými odbernými miestami v jaskyni vyššie hodnoty pH a nižšie obsahy voľného CO<sub>2</sub>. Súčasne v rámci korelačných matíc týchto odberných miest platil štatisticky významný kladný korelačný vzťah medzi  $I_{\text{kalcit}}$  a pH. Kladný korelačný vzťah (štatisticky nevýznamný) medzi týmito premennými bol zistený aj vo vodách z ďalších miest, ktorý väčšinou sprevádzala kladná korelácia medzi  $I_{\text{dolomit}}$  a pH. Index nerovnováznosti kalcitu často sprevádzala aj kladná korelácia s teplotou. Miesta s najvyšším stupňom nasýtenia vôd voči kalcitu charakterizovala aj záporná korelácia medzi obsahom voľného CO<sub>2</sub> a  $I_{\text{kalcit}}$ .

Dokumentované zmeny v chemickom zložení vôd jaskynného systému počas roka neboli také veľké, ako sa pôvodne očakávalo. Dendrogram zhlukovej analýzy vytvorený zo všetkých chemických analýz naznačuje, že chemické zloženie vôd v systéme sa mení väčšinou súčasne na všetkých vzorkovacích miestach v závislosti od zvodnenia jaskynného systému (Obr. 6).

Jednotlivé klastre dendrogramu väčšinou korešpondujú s realizovanými odbermi, ktoré navzájom viac alebo menej korelujú. Užší vzťah klastrov bol medzi odbermi v čase nižších prietokov, rovnako vyššia zhoda bola medzi obidvomi májovými odbermi. Samostatným klastrom bol júnový odber, ktorý charakterizoval chemické zloženie vôd zo začiatku povodňovej vlny v jaskyni. Z dendrogramu vyplývajú aj niektoré užšie vzťahy medzi odbernými miestami potvrdené korelačnou maticou.

Súčasťou podrobného zhodnotenia chemického zloženia vôd jaskynného systému bolo aj posúdenie ich celkovej kvality. Pre

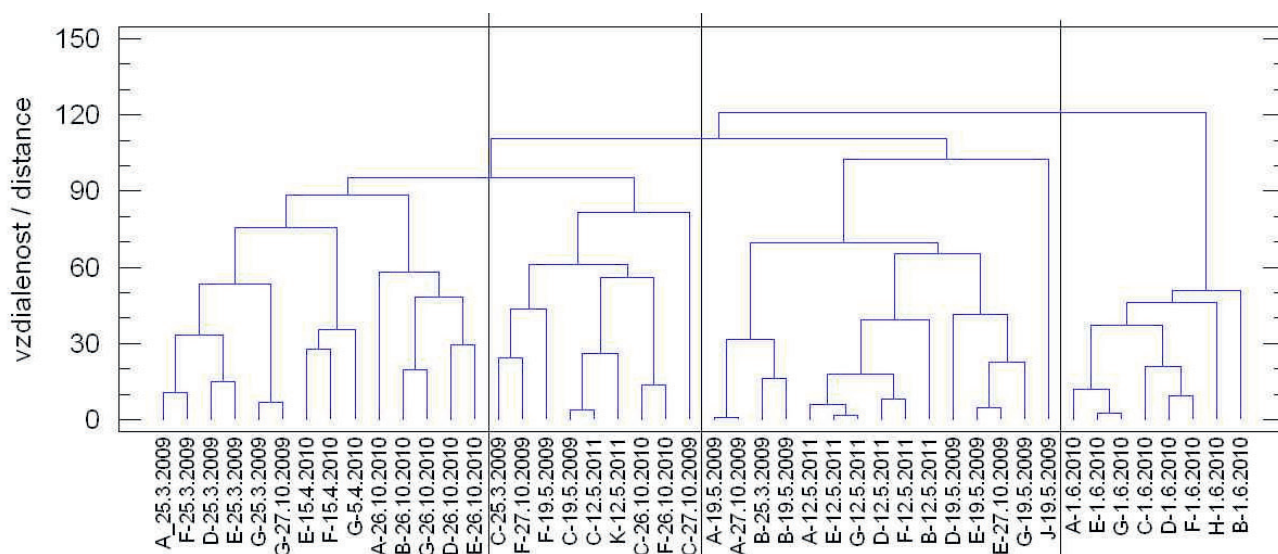
Tab. 9. Korelačná analýza chemického zloženia vôd

Tab. 9. Correlation analysis of chemical composition of water

	$t_{\text{vody}}$	$t_{\text{water}}$																	
	pH	0,13	-																
$O_2$	0,02	-0,06	-																
$E_H$	0,08	-0,43	0,22	-															
$CHSK_{Min}$	-0,04	0,01	0,11	-0,17	-														
$COD_{Min}$	-0,09	-0,01	-0,17	0,32	-0,50	-													
$CO_2$	-0,16	0,14	-0,10	-0,06	0,03	-0,08	-												
$Na^+$	0,18	0,11	0,18	-0,06	-0,07	-0,03	0,04	-											
$K^+$	-0,26	-0,34	0,23	0,15	0,08	0,17	-0,12	0,37	-										
$NH_4^+$	-0,11	0,22	-0,24	0,04	-0,35	0,03	0,30	0,45	0,22	-									
$Mg^{2+}$	0,36	-0,03	0,26	0,24	0,15	-0,05	0,17	-0,01	-0,41	-0,46	-								
$Ca^{2+}$	-0,10	-0,17	0,16	0,06	0,42	-0,07	-0,33	-0,14	0,24	-0,08	-0,38	-							
$Fe$	-0,10	0,20	-0,20	-0,05	0,11	0,04	0,13	-0,38	-0,01	0,13	-0,27	0,20	-						
$Mn$	-0,16	0,25	-0,09	-0,05	-0,48	0,16	-0,01	0,16	0,02	0,30	-0,12	-0,15	-0,10	-					
$Cl^-$	0,23	-0,08	0,17	0,04	0,05	0,03	-0,20	-0,48	-0,54	-0,64	0,46	-0,14	0,02	-0,23	-				
$NO_3^-$	0,04	0,74	0,02	-0,20	-0,09	-0,44	0,21	0,31	-0,08	0,58	-0,11	-0,06	0,16	0,33	-0,28	-			
$SO_4^{2-}$	-0,06	-0,08	-0,09	0,09	-0,56	0,26	-0,30	0,23	0,20	0,38	-0,43	0,08	-0,09	0,19	-0,18	0,12	-		
$HPO_4^{2-}$	0,34	-0,34	0,06	0,10	-0,24	0,35	-0,07	-0,18	-0,19	-0,35	0,32	-0,21	-0,13	-0,07	0,37	-0,53	0,05	-	
$HCO_3^-$	0,34	0,23	0,22	0,17	0,00	-0,14	0,23	0,09	-0,46	-0,05	0,73	-0,39	-0,24	0,13	0,28	0,25	-0,32	0,26	-
$M$	-0,01	-0,92	0,12	0,38	0,03	0,51	-0,10	-0,19	0,32	-0,23	0,03	0,14	-0,16	-0,31	0,14	-0,73	0,03	0,45	-0,18
$P_{CO_2}$	0,35	0,77	0,14	-0,31	0,14	-0,56	0,08	0,15	-0,49	-0,11	0,44	-0,27	-0,06	0,16	0,22	0,56	-0,24	-0,10	0,52
$I_{kalcit}$	0,17	0,71	-0,08	-0,22	-0,23	-0,36	0,24	0,40	-0,11	0,71	-0,21	-0,18	0,12	0,35	-0,30	0,85	0,20	-0,38	0,19
$I_{dolomite}$																			

Vysvetlivky:  $O_2$  – rozpustený kyslík,  $CHSK_{Min}$  – chemická spotreba kyslíka,  $CO_2$  – voľný oxid uhličitý,  $M$  – celková mineralizácia,  $P_{CO_2}$  – parciálny tlak  $CO_2$ ,  $I$  – index nerovnovážnosti

Legends:  $O_2$  – dissolved oxygen,  $COD_{Min}$  – Chemical oxygen demand,  $CO_2$  – Free carbon dioxide,  $M$  – Total Dissolved Solids,  $P_{CO_2}$  – Partial pressure of  $CO_2$ ,  $I$  – saturation index



Obr. 6. Dendrogram zostavený z chemických analýz vôd (2009–2011) z jednotlivých odberných miest jaskynného systému (A – Marikino jazero, D – Kvapel rožňavských jaskyniarov, E – prameň Buzgó, G – prameň Pod kameňolomom, F – prameň Pri kaplnke, B – prítok v Abónyiho dome, C – prítok pred Veľkou sieňou, H – občasný prameň, K – potok pred jaskyňou, J – Rakaťa)

Fig. 6. Dendrogram compiled from water chemical analyses (2009–2011) from sampling points of cave system (A – the Marika's Lake, D – the Dripstone of Rožňava Cavers, E – the Buzgó Spring, G – the Pod kameňolomom Spring, F – the Pri kaplnke Spring, B – inflow in the Abonyi Dome, C – inflow in front of the Great Hall, H – occasional spring, K – creek below the chapel, J – Rakaťa)

porovnanie kvality jaskynných vôd s vodami z ich infiltračnej oblasti bola počas májového vzorkovania v roku 2009 odobratá jedna vzorka vody zo studne z lokality Rakaťa (Tab. 6). Táto voda bola svojim chemickým zložením blízka chemickému zloženiu vody z jaskyne z odberného miesta Marikino jazero. Pri takmer rovnakej hodnote EC mala voda zo studne o niečo vyššie koncentrácie indikátorov antropogénneho znečistenia  $\text{Na}^+$  ( $2,93 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ),  $\text{Cl}^-$  ( $7,7 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ),  $\text{NO}_3^-$  ( $7,7 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ) a  $\text{SO}_4^{2-}$  ( $30,5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ ). Avšak vzhľadom k dlhodobému využívaniu lokality na pasienkárské účely koncentrácie uvedených ukazovateľov neboli vysoké. Aj keď na základe jednej chemickej analýzy nie je možné posudzovať celú infiltračnú oblasť jaskyne, aspoň čiastočne je možné predpokladať, že jej prípadné znečistenie je menšie ako sa pôvodne očakávalo. Tento predpoklad napokon potvrdili aj výsledky kvality jaskynných vôd, na ktorých sa v pozitívnom zmysle podpísala legislatívna ochrana vôd predmetného územia (ochranné pásmo jaskyne, ochranné pásmo II. stupňa vodárenských zdrojov RHV–4 a 6).

Analýza akvatickej mikrobioty Krásnohorskej jaskyne nadväzuje na chronologickú sériu už skôr publikovaných prác (Haviarová et al., 2010; 2011<sup>a</sup>) týkajúcich sa výskumu krasových vôd Silickej planiny. Zároveň je prvou komplexnejšou štúdiou hodnotiacou mikrobiologický profil podzemných vôd Krásnohorskej jaskyne.

Aplikované mikrobiologické ukazovatele hodnotia v súlade s legislatívnymi ustanoveniami celkový hygienický stav vody. Zároveň však aj jej oživenie najmenšou, teda mikrobiotickou zložkou v jej kultivovateľnom spektre. Získané údaje charakterizujú len kvantitatívnu štruktúru kultivovateľnej, heterotrofnej zložky celkového mikrobiálneho spektra prítomného v sledovaných vodách. Analýza nekultivovateľných zložiek si vyžaduje

odlišné metodické postupy a doteraz nebola aplikovaná. Použitie mikrobiologické ukazovatele dokážu zaznamenať aj nežiaducu mikroflóru, ktorá je zvyčajne výsledkom fekálnej, či už aktuálnej alebo perzistujúcej kontaminácie. Jej zložkou bývajú často patogénne mikroorganizmy, ktoré bývajú zdrojom rôznych infekčných ochorení.

Z výsledkov mikrobiologických analýz vyplýva, že celkové oživenie týchto vôd v horizontálnom profile heterotrofnou, kultivovateľnou mikroflórou je veľmi nízke a nie sú výraznejšie rozdiely medzi jednotlivými odberovými miestami, vrátane vertikálneho priesaku nad Kvapľom rožňavských jaskyniarov. Relatívne vyššie hodnoty KTJ boli zaznamenané pri dvoch odberoch (19.5.2009 a 26.10.2010) a pravdepodobne súvisia s intenzívnejšou zrážkovou činnosťou. Zaujímavé je, že začiatkom júna 2010 prišlo po prudkých dažďoch k zaplaveniu jaskyne, pričom odber sa podarilo uskutočniť tesne pred nastúpením tejto hydrologickej udalosti. S výnimkou vyššie uvedených dvoch odberov sú pozoruhodné celkovo nízke hodnoty psychrofilných mikroorganizmov, teda organizmov adaptovaných na nízke teploty a nutričný deficit. Absencia indikátorov fekálnej kontaminácie v sledovanom období svedčí o neprítomnosti zdrojov tohto typu znečistenia v prislúchajúcej oblasti, a tak o dobrej hygienickej kondícii vôd Krásnohorskej jaskyne. Mikrobiálna kvalita týchto vôd by zniesla aj prísnejšie legislatívne kritéria platiace pre pitnú vodu.

Odberové miesto Rakaťa vykazovalo výrazne vyššie indikčné hodnoty, než boli zistené na všetkých odberových miestach vo vodnom systéme Krásnohorskej jaskyne a boli v ňom zaznamenané aj indikátory fekálnej kontaminácie. Jeho vody komunikujú s jaskynnými vodami podzemného toku Buzgó, čo bolo potvrdené stopovacou farbiacou skúškou (Roda, 1967).

Prameň zrejme neovplyvňuje jeho mikrobiálne oživenie ani kontamináciu. Vody z Rakate môžu prechádzať filtračnou zónou eliminujúcou mikroorganizmy.

## 6. ZÁVER

Vody Krásnohorskej jaskyne sú typické vody s karbonátogénnou mineralizáciou, základného výrazného Ca-HCO<sub>3</sub> (Ca-Mg-HCO<sub>3</sub>) typu, resp. základného nevýrazného Ca-HCO<sub>3</sub> alebo Ca-SO<sub>4</sub> typu. Celková mineralizácia vlastných jaskynných vôd sa pohybuje od 488 do 1 097 mg·l<sup>-1</sup>, čo zodpovedá genetickému typu vody pri zistených parciálnych tlakoch CO<sub>2</sub> (1,88·10<sup>-4</sup> až 2,57·10<sup>-2</sup> MPa) zrejme biogénneho pôvodu. Študovaný jaskynný systém môžeme zaradiť k otvoreným krasovým systémom s neustálym dopĺňovaním CO<sub>2</sub> (Freeze & Cherry, 1979).

Hlavnými iónmi vo vode sú hydrogenuhličitanové anióny a kationy vápnika. V niektorých častiach systému (napr. bočný prítok pred Veľkou sieňou) majú vody horizontálnej cirkulácie vyššie zastúpenie síranov, zdrojom sú pravdepodobne sadrovce a anhydrity zo sinských vrstiev verfénskeho súvrstvia (Mello et al., 1997<sup>a</sup>). Za vyšších stavov sa vo vodách systému zvyšuje koncentrácia horčíka. Do systému pri vyššom zvodnení masívu dotekajú vody, ktoré sa vo väčšej miere formujú v prostredí dolomitických vápencov až dolomitov. Bočný prítok pred Veľkou sieňou sa vzhľadom k rozdielnej infiltračnej oblasti vyznačuje vyššou mineralizáciou vôd, vyššou koncentráciou síranov a horčíka, taktiež vyšším stupňom nasýtenia vôd voči kalcitu.

Jaskynné vody (priesakové vody a vody podzemných tokov) majú relatívne dobrú kvalitu. Ani pri vysokých stavoch nedochádza k jej výraznejšiemu zhoršeniu. Zo stopových prvkov sa vo vyšších koncentráciách vo vodách vyskytuje len Fe a Mn. Na základe pomerne malého rozpätia hodnôt EC z výsledkov kontinuálnych meraní hlavného toku je možné predpokladať, že komunikácia jaskynného toku s povrchom je pozvoľná a dostatočne dlhá na to, aby sa vody z povrchu stačili dostatočne mineralizovať. Výnimkou sú extrémne hydrologické situácie, ktoré sú spojené predovšetkým so zhoršením senzorických vlastností vôd. Ani v týchto prípadoch hodnoty EC neklesajú pod 55 mS·m<sup>-1</sup>. Vrátenie EC k priemerným hodnotám podľa výsledkov meraní môže trvať aj niekoľko dní. Rovnako dlho môže pretrvávajúce znečistenie v hlavných komunikačných cestách. Tento fakt v spojení s nízkou samočistiacou schopnosťou typickou pre krasovo-puklinové vody, efektom prejavu „znečistenia v druhej vlne“ (Hyánek et al., 1991) a pomerne veľkou infiltračnou oblasťou systému radí jaskyňu k vysoko zraniteľným lokalitám.

Vody v Krásnohorskej jaskyni majú rozdielny stupeň nasýtenia voči hlavným karbonátovým minerálom v rozdielnych častiach systému. Vody s vyššou koncentráciou síranov majú vyššie nasýtenie voči kalcitu. Dôvodom môže byť efekt tzv. spoločného iónu (Appelo & Postma, 2005). Vody jaskynného toku vystupujúce na povrch cez prameň Buzgó sú dostatočne nasýtené. Po ich výstupe na povrch dochádza k uvoľneniu CO<sub>2</sub>, vody získavajú schopnosť vyzrážania CaCO<sub>3</sub>. Pred vyvieracťou Buzgó prebieha recentná tvorba penovcov.

Celkové chemické zloženie krasových vôd jaskynného systému bolo zhodnotené na základe 35 vlastných chemických analýz

jaskynných vôd a 20 chemických analýz povrchových vôd spojených s jaskynným systémom (pramene, povrchový tok, studňa Rakata) doplnených o 3 staršie chemické analýzy z jaskyne.

Podrobné vzorkovanie v jaskyni preukázalo, ako sa môže chemické zloženie podzemného toku modifikovať vplyvom aktivity jeho bočných prítokov a ako sa bočné prítoky môžu svojím chemickým zložením líšiť, a to hlavne v prípadoch, kedy sa jaskynný systém nachádza v nehomogénnom prostredí, prípadne v blízkosti alebo na kontakte viacerých geologických komplexov. Jaskynný systém nám v tomto prípade umožňuje bližšie objasniť formovanie chemického zloženia vôd v horninovom masíve, ktoré by nebolo také jednoznačné v prípade zjednodušeného vzorkovania len krasového prameňa. V neposlednom rade výsledky zo vzorkovania vôd v jaskyni majú význam aj zo speleologického hľadiska. Na základe rozdielov alebo naopak spoločných fyzikálno-chemických vlastností vôd jednotlivých častí systému sa dá predpokladať ich vzájomná hydrologická komunikácia a teda aj prípadné speleologické prepojenie. V prípade pomerne homogénneho chemického zloženia aplikovaním korelačnej analýzy môžeme jednoduchšie poukázať na príbuznosť jednotlivých častí systému, o čo sme sa pokúsili aj pri komplexnom hodnotení chemického zloženia vôd podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne.

Sledovanie hlavných mikrobiologických parametrov v akvatickom ekosystéme Krásnohorskej jaskyne ukázalo základnú štruktúru heterotrofnej, kultivovateľnej mikrobiálnej bioty. S výnimkou mimoriadnych hydrologických udalostí, ktorými sú predovšetkým výrazná zrážková činnosť, prispievajúca k prechodne zvýšenému mikrobiálnemu znečisteniu, sú vody krásnohorskeho jaskynného ekosystému veľmi kvalitné, xenosaprôbne, niekedy až katarôbne.

**PodĎakovanie:** Publikácia vznikla s podporou projektu

VEGA č. 1/0899/12, ktorý financovalo Ministerstvo školstva, vedy výskumu a športu Slovenskej republiky a z výsledkov realizácie úloh II.1/2007, V.9/2008 a V.14/2009 plánu hlavných úloh Správy slovenských jaskýň na roky 2009 až 2011. Autori článku chcú touto cestou poďakovať Zoltánovi Jergovi a Jaroslavovi Stankovičovi zo Speleoklubu Minotaurus v Rožňave za ústretovosť pri realizácii výskumu, pomoc pri odbere vzoriek v jaskyni a v teréne počas jeho rekognoskácie. Autori ďakujú aj Marte Šramelovej z Katedry hydrogeológie PriF UK v Bratislave za pomoc pri terénnych prácach a za vykonané laboratórne práce.

## Literatúra

- Appelo C.A.J. & Postma D., 2005: Geochemistry, groundwater and pollution, 2<sup>nd</sup> edition. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, 649 p.
- Deutsch W.J., Jenne E.A. & Krupka A.M., 1982: Solubility equilibria in basalt aquifers; the Columbia Plateau, Eastern Washington, USA. *Chemical Geology*, 36, 1-2, 15-34.
- Flaková R., Ženišová Z. & Seman M., 2010. Chemická analýza vody v hydrogeológii. Slovenská asociácia hydrogeológov, Bratislava, 166 p.
- Freeze R.A. & Cherry J.A., 1979: Groundwater. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 604 p.
- Gaál L., 2008: Geodynamika a vývoj jaskýň Slovenského krasu. Speleologia Slovaca 1, Štátna ochrana prírody Slovenskej republiky – Správa slovenských jaskýň, Liptovský Mikuláš, 166 p.

- Gazda S., 1974: Chemizmus podzemných vôd Západných Karpát a jeho genetická klasifikácia. In: Leško B. (Ed.): Materiály z III. celoslovenskej geologickej konferencie, II. časť. Slovenský geologický úrad, Bratislava, 43-50.
- Haviarová D., Flaková R., Seman M. & Ženišová Z., 2010: Formovanie chemického zloženia vôd v jaskyni Domica. *Podzemná voda*, 13, 2, 153-161.
- Haviarová D., Flaková R., Ženišová Z. & Seman M., 2011<sup>a</sup>: Chemické zloženie a mikrobiologické vlastnosti krasových vôd jaskyne Milada a jej podzemného hydrologického systému (Silická planina, Slovenský kras). *Podzemná voda*, 17, 1, 34-51.
- Haviarová D., Seman M., Flaková R., Ženišová Z., 2011<sup>b</sup>: Chemické zloženie a mikrobiologické vlastnosti vôd vybraných jaskynných systémov Silickej planiny (Slovenský kras). In: Sborník mezinárodní vědecké konference Hydrogeochemia '11. Vysoká škola Báňská – Technická univerzita, Ostrava, 39-42.
- Häusler J., 1995: Mikrobiologické kultivační metody kontroly jakosti vody. Díl III. Stanovení mikrobiologických ukazatelů. Ministerstvo zemědělství ČR, Praha, 408 p.
- Hochmuth Z., 2000: Problémy speleologického prieskumu podzemných tokov na Slovensku. Slovenská speleologická spoločnosť, Prešov – Košice, 1-163.
- Horáková M., Janda V., Koller J., Kollerová L., Palatý J., Koubíková J., Pokorná D., Ptáková H., Schejbal P., Smrčková Š., Strnadová N., Sýkora V. & Ptáková H., 2003: Analytika vody. Vysoká škola chemicko-technologická, Praha, 335 p.
- Hýánek L., Rešetka D., Koller J. & Nesměrák I., 1991: Čistota vôd. Alfa, Bratislava, 262 p.
- Hýánková K. & Melioris L., 1992: Vybrané kapitoly z hydrogeochemie. Univerzita Komenského v Bratislave, Bratislava, 108 p.
- Lapin M., Faško P., Melo M., Šťastný P. & Tomlain J., 2002: Klimatické regióny. In: Miklós L., Kramárik J., Klinda J., Lauko V., Zaľko M., Hrnčiarová T., Mládek J. & Finka M. (Eds.): Atlas krajiny Slovenskej republiky, 2002. 1. vyd., Ministerstvo životného prostredia SR, Bratislava, Slovenská agentúra životného prostredia, Banská Bystrica, 344 p.
- Kullman E., Hornáčková Patschová A., Malík P., Bodiš D. & Holubec M., 2006: Vymedzenie útvarov podzemných vôd, ich klasifikácia a vyhodnotenie dopadov ľudskej činnosti na ich stav. In: Kollár A. (Ed.): Rámcová smernica o vode – stav implementácie v podmienkach SR. Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, Bratislava, 33-40.
- Kuníková E., Hucko P., Adámková J., Makovinská J., Borušovič Š., Chriateľ R., Kullman E. & Vodný J., 2005: Správa Slovenskej republiky o stave implementácie Rámcovej smernice o vode spracovaná pre Európsku komisiu v súlade s článkom 5, prílohy II a prílohy III a článkom 6, prílohy IV RSV. Ministerstvo životného prostredia Slovenskej republiky, Bratislava, 207 p.
- Malík P., Švasta J. & Černák R., 2005: Charakterizácia útvarov podzemných vôd kvartérnych a predkvartérnych hornín z hľadiska tvorby, odvodňovania a smeru prúdenia podzemných vôd. Slovenská asociácia hydrogeológov, Bratislava, 121 p.
- Malík P., Gregor M., Švasta J. & Haviarová D., 2011: Interpretácia meraní teploty a mernej elektrickej vodivosti v profile podzemného toku Krásnohorskej jaskyne. *Slovenský kras*, 49, 1, 41-55.
- Mazúr E., Lukniš M., Balatka B., Loučková J. & Sládek J., 1986: Geomorfologické členenie SSR a ČSSR. Slovenská kartografia, n.p., Bratislava.
- Mello J., Elečko M., Pristaš J., Reichwalder P., Snopko L., Vass D., Vozárová A., Gaál L., Hanzel V., Hók J., Kováč P., Slavkay M. & Steiner A., 1997a: Vysvetlivky ku geologickej mape Slovenského krasu 1:50 000. Geologická služba Slovenskej republiky, Bratislava, 255 p.
- Mello J., Elečko M., Pristaš J., Reichwalder P., Snopko L., Vass D. & Vozárová A., 1997<sup>b</sup>: Geologická mapa Slovenského krasu 1:50 000. Geologická služba Slovenskej republiky, Bratislava.
- Motyka J., Gradzinski M., Bella P. & Holúbek P., 2005: Chemistry of water from selected caves in Slovakia – a reconnaissance study. *Environmental Geology*, 48, 6, 682-692.
- Nariadenie vlády Slovenskej republiky č. 269/2010 Z. z. z 25. mája 2010, ktorým sa ustanovujú požiadavky na dosiahnutie dobrého stavu vôd.
- Orvan J., 1987: Rožňava – Horný vrch, predbežný hydrogeologický prieskum. Manuskript, archív ŠGÚDŠ, Bratislava, 69 p.
- Orvan J., 2006: Ekologické hodnotenie využívania podzemných vôd hydrogeologickej štruktúry juhozápadnej časti Horného vrchu (Slovenský kras). *Slovenský kras*, 44, 161-168.
- Parkhurst D.L. & Appelo C.A.J., 1999: PHREEQC-2, A Hydrogeochemical Computer Program. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 99-4259, 312 p.
- Pitter P., 2009: Hydrogeochemie. Vydavateľstvi VŠCHT, Praha, 579 p.
- Roda Š., 1964: Jaskyňa Buzgó. *Krásy Slovenska*, 41, 10, 382-386.
- Roda Š., 1967: Výskum občasného toku „Studňa Rákota“ na Silickej planine farbením fluoresceínom. In: Zborník Východoslovenského múzea v Košiciach, séria A, Geologické vedy VIII A – 1967. Východoslovenské vydavateľstvo, Košice, 69-71.
- Roda Š., Rajman L., Erdős M. & Szabová T., 1986<sup>a</sup>: Vznik a vývoj sintrových foriem v piatich jaskyniach Slovenského krasu. Manuskript, archív SSJ (Liptovský Mikuláš), 230 p.
- Roda Š., Roda Š. ml. & Ščuka J., 1986<sup>b</sup>: Aplikácia fraktálnej analýzy na interpretáciu stopovacích skúšok. *Slovenský kras*, 24, 61-75.
- Stankovič J., Cílek V., Bruthans J., Gaál L., Kovács Á., Rozložník M., Schmelzová R., Zeman O., Kováč L., Mock A., Luptáčik P., Hudec I., Nováková A., Košel V. & Fenda P., 2005: Krásnohorská jaskyňa Buzgó. Speleoklub MINOTAURUS, Rožňava, 150 p.
- Stankovič J. & Horváth P., 2004: Jaskyne Slovenského krasu v živote Viliama Rozložníka. Speleoklub MINOTAURUS, Rožňava, 193 p.
- Šmída B. & Stankovič J., 1999: Bočný prítok v Krásnohorskej jaskyni. *Spravodaj SSJ*, 30, 4, 12-17.
- Šuba J., Bujalka P., Cibulka L., Frankovič J., Hanzel V., Kullman E., Porubský A., Popsišil P., Škvarka L., Šubová A., Tkáčik P. & Zakovič, M., 1984: Hydrogeologická rajonizácia Slovenska. SHMÚ, Bratislava, 310 p.

**Summary:** The Krásnohorská Cave is situated on the Silická Plateau in the Slovak Karst. It is 1,556 m long fluviokarst cave with underground stream. Spring where this underground stream flows out to the surface is named Buzgó. The underground stream has three small inflows in the known part of the cave. Predominant part of the cave is formed in Gutenstein dolomites and dolomite limestones, rear parts of the cave are located in chemically pure Steinalm limestones of the Silicic Unit. The cave is known by the Driptide of Rožňava Cavers, the one of the biggest flowstone forms in the world with the height of 32.6 m.

Sampling during hydrogeochemical research was realized in the main cave stream and its tributaries (3 sampling places – Marika's Lake, inflow in the Abonyi's Dome, and inflow in front of the Great Hall), in the Buzgó spring (Fig. 2) and three other springs near cave (the Pri kaplnke Spring, the Pod kameňolomom Spring, and occasional spring), in surface stream in front of the cave entrance and in dripping water from the Driptide of Rožňava Cavers.

The cave waters are typical waters with atmospheric genesis, with carbonate mineralization. The waters are poorly alkaline and alkaline type with pH ranging between 7.0 and 7.9. The water temperature during sampling ranged from 9.0 to 10.1°C. Results from continual monitoring temperature of main cave stream show the range of temperature

between 8.8 and 9.4 °C with average value of 9.2 °C (Fig. 5). The general process, which forms chemical composition of water, is dissolution of carbonates. Cave water is primary Ca-HCO<sub>3</sub> and Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> type, the water from inflow in front of the Great Hall is seldom Ca-HCO<sub>3</sub> type (Fig. 3). The chemical composition of water is relatively stable during year. Carbonates and calcium are dominant ions in water. Values of the total dissolved solids (TDS) are from 488 to 1,097 mg·L<sup>-1</sup>. Higher TDS have waters from inflow in front of the Great Hall, which have higher concentration of sulphates, too (55.6–322.6 mg·L<sup>-1</sup>) (Tab. 2). The source of sulphates can be the Lower Triassic Szin member or "rauhwacke layer" that are found between the Lower Triassic Szin member and middle Triassic Gutenstein limestone (Fig. 1).

The sources of sulphates in water in other parts of cave are mainly atmospheric and processes of sulphide oxidation or sulphate dissolution can occur in small amount in carbonates. Saturation indices calculated for calcite, aragonite, dolomite, and gypsum were different in varied parts of cave system (Fig. 4). Generally and prevailingly water is in equilibrium with calcite and aragonite, in equilibrium or undersaturation with dolomite and in undersaturation with gypsum. Waters from inflow in front of the Great Hall are higher saturated with respect to calcite. It can be result of dissolution of sulphates connected with escalation of calcium in water or result of consecutive genesis of incongruent dissolution of carbonates. Dripping waters have also higher saturation with respect to calcite. The quality of cave waters is good; the concentrations of COD<sub>Mn</sub>, ammonium, natrium, potassium, and nitrates are low during majority of year.

The results of correlation analysis of chemical analyses point to primarily positive correlation between calcite and carbonates, magnesium and sulphates, chlorides and sulphates, TDS and calcium and carbonates. The negative correlation between pH and free carbon dioxide was confirmed as well.

Total recovery of water in the horizontal profile by heterotrophic, cultivable microbiota is very low and they are not significant differences between the sampling sites. Low values were also observed in psychrophilic microorganisms that are adapted to low temperatures and nutritional deficiency. Water of indicated ecosystem is very good, xenosaprobic up katharobic.