

Prieskum ochrannej funkcie zóny aerácie nad Krásnohorskou jaskyňou (Silická planina) pomocou stopovacích skúšok

PETER MALÍK¹, JAROMÍR ŠVASTA¹, BRANISLAV MÁŠA², FRANTIŠEK BOTTLIK¹, NATÁLIA BAHNOVÁ¹ a ALEXANDRA VASILENKOVÁ¹

¹ Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, oddelenie hydrogeológie a geotermálnej energie, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava 11

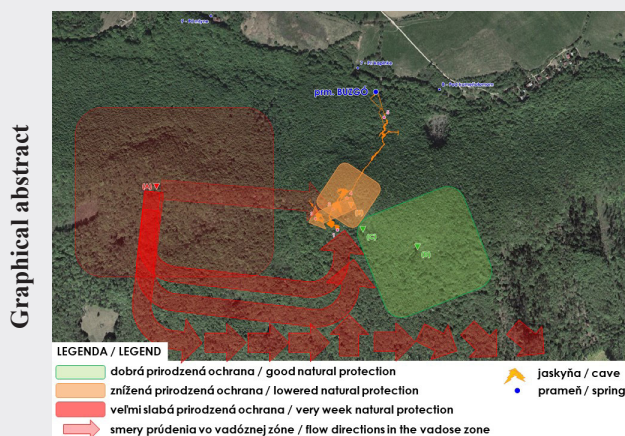
² HES-Comgeo, spol. s r. o., Kostiviarska cesta 4, 974 01 Banská Bystrica;

Survey of protective function of the aeration zone above the Krásnohorská jaskyňa Cave (Silická planina Plateau) using tracing tests

Abstract: Four tracer experiments were performed on the surface of the Silická planina karstic Plateau in the period of October 2016 – April 2017. The aim was to verify the natural protection function of the 185 – 250 m thick unsaturated zone above the underground hydrologic system of the Krásnohorská jaskyňa Cave. The cave is situated on the northern rim of the Silická planina Plateau along the underground stream that appears on the land surface as the Buzgó karstic spring. No perennial swallow hole/ponor exists here to feed the underground, the tracers were injected into the dug pits artificially excavated on the bottoms of four major sinkholes in the area. Dye tracers of sodium naphthionate, fluorescein and sulphorhodamine B were injected into the sinkholes marked as (A), (B) and (C) on the 26th October 2016. Later, on 14th November 2016 bacteriophages H40/1 suspension was injected to the last (D) sinkhole. Six submergible flow-through field fluorimeters GGUN-FL30 were used for tracer detection at 5 points of the Krásnohorská jaskyňa Cave underground hydrologic system (Marikino jazero Lake, two smaller tributaries – left under the Veľká sieň Hall and right in the Abonyiho dóm Dome and Buzgó spring outlet) and at the Eveteš spring, exploited as drinking water source. Capsules filled with activated carbon were installed at 5 smaller springs in the area. Signals recorded at sorption material were weak and ambiguous, but fluorimeters' data showed reliable results. While sulphorhodamine and bacteriophages from the (C) and (D) sinkholes were not detected in the whole period of observations, naphthionate injected at (A) site appeared in several consecutive peaks of various strength at every monitoring point within the cave, but also in the 4.8 km distanced spring of Eveteš. Fluorescein from the (B) sinkhole appeared in quite a low concentration only at two side tributaries (both left and right) of the main underground stream. Recorded travel times were from 3.3 to 36.3 days, flow velocities recorded by GGUN-FL30 fluorimeters were ranging between 1.9 and 1443.2 m/day (0.002 – 1.670 cm/second), recorded maximal concentrations at individual monitoring sites were within the range of 0.24 – 121.71 ppb. Based on these results, area to west and southwest from the cave system is supposed to have relatively good natural protective function, while the area eastwards represent a naturally weakly protected place. If possibly hit by potential pollution, its quick spreading and appearance at quite distanced places can be expected.

Key words: sinkholes, vulnerability, trace experiments, fluorescein, naphthionate, sulphorhodamine, bacteriophages H40/1, Silická planina Plateau, Krásnohorská jaskyňa Cave (Slovakia)

Kľúčové slová: závrty, zraniteľnosť, stopovacie skúšky, fluoresceín, naftionát, sulforodamín, bakteriofágy H40/1, Silická planina, Krásnohorská jaskyňa



Highlights

- dye tracers verified the natural protection function of the 185 – 250 m thick unsaturated zone above the Krásnohorská jaskyňa Cave system
- four tracers injected into manually excavated dug holes in the sinkholes' bottoms
- bacteriophages H40/1 were also used, but without success
- environmentally sensitive area delineated west from the cave system, relatively good natural protective function is on the east

Úvod

Ochrana zdrojov podzemnej vody v krasovom prostredí predstavuje kľúčový problém zachovania významného množstva pitnej vody sústredeného v takomto type kolektorov. Vápence a dolomity, na ktoré sa táto voda viaže, dokážu sústrediť do malých výverových oblastí ekonomicky významnú výdatnosť, ktorá v súčasnosti predstavuje takmer 54 % celkovej spotreby vody na Slovensku (Malík et al., 2018). Kvalita vody v krasovom prostredí vo veľkej miere závisí od spôsobu prepojenia podzemného hydrologického systému s povrchom (Zwahlen – ed., 2004), jeho správne ohraničenie zas determinuje bilanciu množstva vody obiehajúcej v podzemí. V rokoch 2012 až 2018 pracovníci Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra v rámci projektu LIFE+ KRASCAVE realizovali množstvo výskumných aktivít v oblasti Krásnohorskej jaskyne. Medzi inými sa v roku 2016 realizovali stopovacie skúšky. Ich cieľom bolo overiť prirodzenú ochrannú funkciu, ktorú podzemnému hydrologickému systému poskytuje horninové nadložie nad jaskyňou. Hrúbka tohto nadložia – vadóznej zóny nad jaskyňou – je medzi dnami závrto v oblasti a úrovňou podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne 185 až 240 m. Stopovacie skúšky realizované v októbri a novembri 2016 a trvajúce až do jarných mesiacov 2017 boli zamerané na testovanie citlivosti vody Krásnohorskej jaskyne na potenciálnu kontamináciu prítomnú na bezprostredne blízkom povrchu Silickej planiny. Metodika ich realizácie bola odlišná, než je obvyklé pri speleologických alebo vodohospodárskych prieskumoch v krasových oblastiach. V prípade našich stopovacích skúšok bola predmetom testovania rýchlosť prepojenia s podzemím dna závrto, resp. krasových jám, ktoré signalizujú prirodzený úbytok horninovej hmoty smerom do podzemia, a tým aj blízkosť komunikačných ciest, prostredníctvom ktorých je tento odnos hmoty sprostredkúvaný. Cieľom prác bolo overenie priestorovej distribúcie vzájomných prepojení a rýchlosti postupu prúdenia podzemnej vody do podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne, prípadne do podzemnej vody v jej okolí z bezprostredného nadložia tvoreného povrchom severnej časti Silickej planiny.

Charakteristika skúmaného územia

Krásnohorská jaskyňa a jej podzemný hydrologický systém predstavujú unikátny súbor fenoménov vytváraných podzemnou vodou. Jeho jedinečnosť spočíva najmä v mimoriadnej kumulácii sintrových foriem previazaných na činnosť vody, ktorá pri svojom sústredenom výstupe z podzemia vytvára mohutný krasový prameň Buzgó. Jaskyňa je tak prirodzene predmetom mnohých odborných štúdií, do ktorých zapadá aj naša práca. Terminálnym prejavom podzemného hydrologického sys-

tému Krásnohorskej jaskyne je krasový prameň Buzgó, v ktorom spomínaná voda v katastri obce Krásnohorská Dlhá Lúka vystupuje na povrch. Prirodzený výstup krasovej podzemnej vody v prameni Buzgó bol známy už od nepamäti, no jaskynný systém Krásnohorskej jaskyne, ktorý sa za ním nachádza, bol objavený až po namáhavom speleologickom prieskume v rokoch 1954 až 1964 (Stankovič a Cílek – red., 2005). Krásnohorská jaskyňa, ktorú v lete 1964 objavili rožňavskí jaskyniari (Roda, 1964; Skřivánek, 1965; Roda, 1966; Stankovič a Horváth, 2004), má v súčasnosti známu dĺžku 1 550 m, pričom aktívny vodný tok v podzemí sleduje približne jednu tretinu tejto dĺžky. Jaskyňa v sebe ukrýva mohutný stalagnat vysoký 32,6 m a Kvapeľ rožňavských jaskyniarov vážiaci približne 2 000 t, ktorý bol v čase svojho objavu považovaný za najväčší sintrový útvar na svete (Roda, 1966). Podľa Gaála (in Stankovič a Cílek – red., 2005) je severná časť Krásnohorskej jaskyne vytvorená v strednotriasových gutensteinských dolomitoch a dolomitových vápencoch, jej zadné (najjužnejšie) časti sú situované už v mladších, steinalmských vápencoch tektonickej jednotky silicika (Mello et al., 1997). Hlavnou osou podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne je vodný tok objavujúci sa v Suťovom dome, prechádzajúci Marikiným jazerom a Sifónom potápačov, pričom na svojej zhruba 400 m dlhej ďalšej ceste priberá len dva významnejšie prítoky – ľavostranný v priestoroch pod Veľkou sieňou (od Heliktitévého domu) a pravostranný v Abonyiho dome. Výdatnosť oboch prítokov je približne rovnaká a ani jedna z nich zvyčajne nepresahuje $2,0 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$, takže ich podiel na celkovom prítokovom množstve podzemného vodného toku pretekajúceho jaskyňou je menej ako 10 % (Bajtoš et al., 2017). Je zaujímavé, že prítok vody, recentne dotujúcej tvorbu Kvapľa rožňavských jaskyniarov, je veľmi malý, len okolo $0,02$ až $0,04 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Možno ho pozorovať ako ľavostranný prítok v Chodbe perál asi 35 m pod vyššie sa nachádzajúcim prítokom pod Veľkou sieňou (od Heliktitévého domu). V tejto práci je označený ako miesto presakovania zo Siene obrov, v suchých obdobiach úplne zaniká. Ani detailné rezistivimetrické a termometrické merania podzemného vodného toku v jaskyni (Malík et al., 2011) neoverili existenciu iných viditeľných či skrytých prítokov do hlavného podzemného toku v jaskyni až po úroveň Sifónu potápačov, resp. Marikinho jazera. Za Marikiným jazerom pokračuje tok v podzemí sifónom Marikinho jazera dlhým 120 m a hlbokým 28 m, potom ešte 250 m v sérii troch domov, kde za ďalším sifónom dlhým 15 m priteká voda spod závalu do jazera v poslednom známom Suťovom dome (Stankovič a Cílek – red., 2005). Výver vody na povrch v krasovom prameni Buzgó je sprostredkúvaný Výstupným sifónom dlhým približne 40 m. Výstup krasovej podzemnej vody je tu podmienený existenciou poklesnutého bloku strednotriasových karbonátov so šírkou



približne 800 m, kde sa táto voda dostáva do priameho kontaktu s aluviálnymi náplavmi toku Čremošnej.

Hydrogeologický vrt RHV-4, ktorý bol v minulosti (Orvan a Vrábl'ová, 1986) v rámci rozsiahleho vyhľadávacieho hydrogeologického prieskumu v oblasti Silickej planiny realizovaný v blízkosti vstupu do Krásnohorskej jaskyne, overil, že málo priepustné podložie spodnotriasových sinských vrstiev je tu poklesnuté ešte asi 80 m pod úrovňou toku Čremošnej. V uvedenom 800 m koridore vystupuje krasová podzemná voda ešte v ďalších dvoch menších prameňoch Pod kameňolomom a Pri kaplnke (Malík et al., 2014a, b). Smerom na východ aj na západ od nich sú potom severné svahy Silickej planiny budované spodnotriasovými sinskými vrstvami (Mello et al., 1996). Samotný krasový prameň Buzgó má za celé doteraz pozorované obdobie priemernú výdatnosť 55,1 l . s⁻¹. Je jedným z najdlhšie pozorovaných prameňov na území Slovenska. Pozorovania Slovenského hydrometeorologického ústavu (SHMÚ) tu s dvomi menšími prestávkami v rokoch 1966 – 1967 a 2010 prebiehajú od roku 1958. Najvyššia výdatnosť, 1 355,8 l . s⁻¹, tu bola zaznamenaná 10. augusta 2002, minimálna výdatnosť, 5,3 l . s⁻¹, bola registrovaná počas viacerých dní vo februári 1987. Teplota vody prameňa je relatívne stála, okolo 9,3 °C, namerané hodnoty za uvedené obdobie pozorovania sa však pohybovali od 5,3 do 12,2 °C.

Mimoriadna prítlačivosť jedinečných prírodných fenoménov nachádzajúcich sa v oblasti severných svahov Silickej planiny, a najmä v podzemí Krásnohorskej jaskyne, už desaťročia podnecuje mnohé výskumné aktivity v tejto oblasti. Okrem uvedených už skôr publikovaných prác (ich dobrý prehľad poskytuje sumarizujúca publikácia Stankovič a Cílek – red., 2005) to bolo vypracovanie podrobnej geologickej mapy tejto oblasti v mierke 1 : 5 000 (Kronome a Boorová, 2016). Jej autori spresnili hranice jednotlivých litostratigrafických členov v príslušnej oblasti Silickej planiny (Mello et al., 1996), pričom však pomocou získaných výbrusov rozlíšili aj stratigraficky mladšie horizonty v rozsahu až po mladší trias (karn – norik, azda až réť). Pukliny sv.-jz. smeru, viditeľné aj v Krásnohorskej jaskyni, však odvodzujú z gravitačných svahových pohybov (rozsadlín). Ich smer je následne daný najmä morfológicky určeným smerom gravitačne nestabilného okraja planiny. Podľa týchto autorov aj samotné založenie Krásnohorskej jaskyne je na takejto gravitačnej svahovej skalnej rozsadline. Chemické a izotopové zloženie vody v systéme Krásnohorskej jaskyne skúmala v rámci svojej dizertačnej práce Gavuliaková (2016), výsledky boli publikované aj v práci Gavuliaková et al. (2015). V širšej perspektíve bolo izotopové a chemické zloženie vody jaskyne v kontexte celej Silickej planiny opísané v práci Fláková et al. (2018). Geochemický model tvorby chemického zloženia vody v časti podzemného

hydrologického systému zostavili Bajtoš et al. (2017). Kováčová et al. (2017) publikovali výsledky meraní obsahu CO₂ a niektorých mikroklimatických parametrov v dĺžkovom profile Krásnohorskej jaskyne počas letného režimu prúdenia vzduchu. V nedávnom období v tejto oblasti prebiehal rozsiahly inžinierskogeologický a hydrogeologický prieskum pre cestný tunel projektovaný popod priesmyk Soroška, realizovaný pracovníkmi spoločnosti DPP Žilina (Grenčíková et al., 2018; Szabó et al., 2018).

Z pohľadu výsledkov prác uvedených v tejto práci sú najrelevantnejšie výsledky stopovacích skúšok realizovaných v tejto oblasti v minulosti. V rámci nich boli overené prepojenia podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne s občasne sa ponárajúcou vodou v oblasti studne Rakaťa (Roda, 1967; Erdős, 1995) a studne Žedem (Roda et al., 1986). Z pohľadu autochtónnosti/alochtonity vôd však tieto vody pochádzajú len z najbližšieho povrchu Silickej planiny a možno teda konštatovať, že jaskyňa je v podstate dotovaná autochtónnymi vodami, infiltrujúcimi do hĺbky Silickej planiny najmä po jarnom topení snehu alebo po výdatných zrážkach. Je však zjavné, že rýchlosť prepojenia jej podzemného hydrologického systému s povrchom je veľmi rozdielna, rovnako, ako sú na povrchu Silickej planiny nerovnomerne distribuované oblasti, z ktorých môže byť potenciálny kontaminant mimoriadne rýchlo prenesený do vody Krásnohorskej jaskyne. Preto v rámci možností, ktoré nám poskytoval projekt LIFE+ KRASCAVE podporovaný Európskou komisiou, zameraný na ochranu podzemného ekosystému Krásnohorskej jaskyne, sme sa pokúsili realizovať v danej oblasti viacero stopovacích skúšok. Pri ich realizácii sme sa snažili využiť jednak bakteriofágy H40/1 osvedčené v minulosti (Haviarová, 2008, 2014, 2016; Haviarová a Pristaš, 2008, 2010, 2013, 2018; Haviarová et al., 2009a, b), jednak farbivé stopovacie látky aplikované v nízkej koncentrácii, detegovateľné citlivými prietokovými fluorimetrami inštalovanými priamo na miestach potenciálnych prepojení.

Metodika realizovaných prác

Spôsob realizácie stopovacích skúšok úlohy vyplýval z cieľa prác, ktorým bolo overenie priestorovej distribúcie vzájomných prepojení a rýchlosti postupu prúdenia podzemnej vody z bezprostredného nadložia tvoreného povrchom severnej časti Silickej planiny do podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne, prípadne do podzemnej vody v jej okolí. V rámci toho sa realizovali technické, monitorovacie, analytické a vyhodnocovacie práce. Situovanie celého skúmaného územia v rámci jeho širšieho nadregionálneho zaradenia, ako aj miest aplikácie stopovačov je na obrázku 1. Selekcia relevantných záverov na povrchu Silickej planiny prebehla v koordinácii s dodávateľom technickej časti prác spoločnosťou HES –

COMGEO, spol. s r. o. (obrázok 2, tabuľka 1). Stopovacím skúškam predchádzal povoľovací proces, ktorý zahŕňal vyjadrenia Východoslovenskej vodárenskej spoločnosti pôsobiacej v regióne, Slovenského vodohospodárskeho podniku, Regionálneho úradu verejného zdravotníctva so sídlom v Rožňave a odboru starostlivosti o životné prostredie Okresného úradu Rožňava, resp. oddelenia ochrany prírody a vybraných zložiek životného prostredia kraja odboru starostlivosti o životné prostredie Okresného úradu v sídle (Košického) kraja.

Technické práce sa začali najprv terénnymi úpravami na dne závrty – išlo o vytvorenie injektážneho priestoru s rozmermi zhruba 1,0 x 1,0 m do hĺbky 1,0 m. Následne sa do dna takto vyhlúbenej jamy vyhlúbilo niekoľko infil-

tračných sond, v rámci možností ručným vrtákom (obr. 3). Nasledovala príprava stopovacích roztokov v dostatočnom objeme (rozpustenie stopovačov v pracovnom objeme zhruba 200 l; obr. 4), resp. rýchla príprava fágovej suspenzie po jej transporte v chladenom priestore (obr. 5). Na zatlačanie stopovacej látky do prostredia bolo potrebné zabezpečiť dostatočné množstvo vody v objeme asi 2 až 5 m³ do každého testovaného závrty (obr. 6 a 7). Voda použitá na zatlačanie pochádzala z prameňa Buzgó (Krásnohorská Dlhá Lúka). Dôležitým a zároveň náročným prvkom technických prác bola preprava zatlačacej vody na miesto aplikácie (dná závrty na povrchu Silickej planiny).

Monitorovacie práce sa vykonávali na 11 stanovištiach a spočívali v meraniach pomocou poľných prietokových fluorimetrov – kontinuálnych meračov prítomnosti stopovačov v prostredí – s časovým krokom 15 minút a sorpčného zachytávania stopovačov do indikačných kapsúl indikujúcich prítomnosť stopovačov na monitorovacom mieste. Boli použité prietokové fluorimetre GGUN-FL30 švajčiarskej výroby (Pierre-André Schnegg, Neuchâtel, Switzerland; obr. 8). Tento fluorimeter je možné použiť na kontinuálne merania počas stopovacích testov s použitím fluoresceínových farbív, ako je uranín, rodamín, sulforodamín, tinopál, naftionát a pod., pričom je možné použiť súčasne až tri vhodne vybrané (navzájom sa neprekrývajúce vlnovou dĺžkou) indikátory. Kontinuálne, resp. v nastavenom časovom intervale snímaná voda preteká optickou bunkou fluorimetra, ktorou je sklenená trubica s valcovým prierezom. Optický systém pozostáva zo štyroch svetelných zdrojov a troch fotografických detektorov, ktoré sú namontované na štyroch kolmých osiach v dvoch úrovniach. Každá z osí je vybavená budiacimi a detekčnými filtermi a objektívmi. Budiace svetlá sa zapínajú a vypínajú postupne, merajú sa tri nezávislé reakcie a zakalenie vody (turbidita). V každom meracom cykle sa zaznamenáva aj vyrovnávacie napätie z predzosilňovačov (tmavý signál). Fluorimetrická sonda je napojená na analógovo-digitálny prevodník slúžiaci na konvertovanie fluorimetrických signálov na unipolárne 24-bitové údaje (rozlíšenie údajov je 1 : 16 000 000). Najväčší merateľný signál má veľkosť 2 500 mV a intenzita najmenšieho signálu je preto 0,000 156 25 mV. Práve v tomto vysokom rozlíšení signálu tkvie výhoda použitia poľného prietokového fluorimetra, keď je možné v teréne aplikovať podstatne menšie množstvo stopovacích látok pri zachovaní schopnosti ich zaznamenania. Zaznamenané údaje sa zasielajú do záznamníka cez kábel, štandardne dlhý 15 m (môže byť aj dlhší), so 4 vodičmi. Box dátového záznamníka (obr. 8b) obsahuje jednu alebo dve chránené olovené batérie a potrebné obvody na zaznamenávanie údajov. V rámci uvedených prác bolo využitých 6 poľných prietokových fluorimetrov (obr. 9) pri nastavení časového záznamu na 15-minútový interval snímacej frekvencie (tab. 2).



Obr. 2. Miesta aplikácie stopovacích látok – dná závrty na povrchu Silickej planiny nad Krásnohorskou jaskyňou: závrty (A) západne od priemetu polohy Marikino jazera (a) a závrty (C) východne od Marikino jazera (b).

Fig. 2. Sites of tracers injection – sinkhole bottoms on the Silická planina Plateau surface above the Krásnohorská jaskyňa Cave: sinkhole (A) west from the Marikino jazero Lake vertical projection on the surface (a) and sinkhole (C) east from the Marikino jazero Lake (b).

Ďalšie miesta potenciálneho objavenia stopovačov boli vybavené indikačnými kapsulami (obr. 10, tab. 2). Indikačné absorpčné kapsuly slúžili len na indikáciu prítomnosti stopovačov. Kapsuly vyhotovené z plastu neohrozujúceho zdravie a náplne sorpčného materiálu vhodného na kontakt s potravinami sa v pravidelných intervaloch kontrolovali a náplne sa vymieňali. Ako sorpčný materiál bolo použité granulované aktívne uhlie NORIT® typu PK 3-5 s plochou efektívneho povrchu 875 m²/gram. Po odobratí sa náplne rozrušovali ultrazvukom, lúhovali v etanolovom kúpeli a výluh sa následne semikvantitatívne analyzoval na prítomnosť farbív pomocou luminiscenčného spektrofotometra Perkin Elmer. Interval kontroly bol vytvorený na základe predpokladaných disperzných vlastností horninového prostredia a bol stanovený na dňové intervaly v prvých dňoch od aplikácie a následne na týždňové až dvojtyždňové intervaly v priebehu piatich mesiacov.

V rámci starostlivosti o monitorovaciu sieť (spolu 11 stanovišť, pozri tab. 2) prebiehala pravidelná údržba prístrojovej techniky, výmena náplní indikačných kapsúl, údržba a čistenie miest uloženia meracích prístrojov a kapsúl. Následné analytické a vyhodnocovacie práce spočívali v analýzach sorpčných náplní indikačných kapsúl na prítomnosť sledovaných stopovačov, spracovaní zaznamenaných údajov z kontinuálnych meračov a terénnych meraní a napokon v záverečnom spracovaní výsledkov tabuľkovou a grafickou formou.

Pri výbere stopovacích látok boli zohľadnené technologické možnosti realizátora, charakteristiky horninového

prostredia, a najmä vlastnosti jednotlivých stopovačov s ohľadom na ochranu zdravia obyvateľstva a životného prostredia. Ako stopovacie látky sa použili farbivá fluoresceín (zelený, UN1170, čiastočne rozpustený denaturovaným 96 % etanolom K10L), sulforodamín B (farbivo červenej farby) a naftionát sodný (bezfarebný). Štvrtou použitou stopovacou látkou (miesto aplikácie D v tab. 1) bola fágová suspenzia bakteriofágov H40/1 (Pronk et al., 2006a, b; Gillmann, 2007; Kallies et al., 2017; Pristaš, 2017), takže naraz boli v krátkom čase aplikované až 4 stopovače. Na túto stopovaciu skúšku sa použilo 8 litrov fágovej suspenzie bakteriofágov H40/1 s početnosťou fágov 2×10^8 na mililiter kubický suspenzie, pripravenej doc. RNDr. Petrom Pristašom, CSc., vedúcim oddelenia genetiky mikroorganizmov v Ústave fyziológie hospodárskych zvierat SAV (ÚFHZ SAV) v Košiciach. Hostiteľským kmeňom tohto bakteriofága je pôvodom morská baktéria *Pseudoalteromonas gracilis*. Bakteriofág H40/1 i baktéria *Pseudoalteromonas gracilis* použité pri stopovacom experimente boli darom od Dr. Zopfiho z Université de Neuchâtel (Švajčiarsko). Baktérie *Pseudoalteromonas gracilis* sa kultivovali v médiu SWB (*Sea Water Broth*) v zložení *Bacto Tryptone Peptone* (Becton Dickinson, 211 699) 5 g/l, *yeast extract* (Merck, 211 699) 1 g/l a morská soľ 24,75 g/l. Ako tuhé kultivačné médium sa používalo to isté médium s prídavkom 15 g agaru (*Becton Dickinson*) na liter média. Po pridaní všetkých zložiek sa pH média upravilo na 7,1 až 7,2, médium sa naplnilo do vhodných nádob a 20 minút sterilizovalo pri teplote 121 °C. Baktérie *Pseudoalteromonas gracilis* v glycerínovej konzerve, dlhodobo uschováanej pri teplote -70 °C, sa vysiali na povrch platne s médiom SWA (*Sea Water Agar*) a inkubovali sa počas 24 hodín pri izbovej teplote. Individuálne kolónie sa sterilne odpichli a inokulovali sa do 20 mililitrov média SWA. Narastené kultúry sa udržiavali pri teplote 4 °C. Príprava fágovej suspenzie prebiehala tak, že sa 4 l média SWB inokulovali 4 ml nočnej kultúry *Pseudoalteromonas gracilis* a 4 ml fágovej suspenzie bakteriofágov H40/1. Takto pripravená zmes sa 24 hodín inkubovala pri izbovej teplote za výdatnej aerácie. Výsledná početnosť fágov v takto pripravenej suspenzii je zvyčajne 10^{10} fágových častíc v mililitri suspenzie. Táto suspenzia sa aplikovala 14. 11. 2016 v čase do 12 hodín od jej prevzatia na ÚFHZ SAV Košice a následne sa odoberali vzorky vody na 11 vybraných odberných miestach.



Obr. 3. Úprava miest aplikácie stopovacích látok na dnách závrto: a) hĺbenie jamy v závrte (D), b) navŕtavanie dna jamy zemným vrtákom v závrte (D).

Fig. 3. Preparation tracers application sites on the sinkhole bottoms: a) pit digging in the (D) sinkhole, b) drilling the bottom of the pit by simple earth drill in the (D) sinkhole.

Po aplikácii roztoku stopovacej látky sa predpokladala jeho významná disperzia a difúzia v podzemnej vode krasovo-puklinového zvodnenca, spojená s mnohonásobným zriedením. Pri uvedenom objeme použitých stopovačov a odhadovanom objeme akumulácie podzemnej vody rádo-vo v jednotkách tisícov kubických metrov sa predpoklada- la koncentrácia riedenia rádo-vo v stovkách mikrogramov, resp. fágových častíc. Miesta a čas aplikácie stopovacích látok sú prehľadne uvedené v tabuľke 1.

Detekcia stopovacích látok sa vykonávala na miestach prirodzeného odvodňovania triasových karbonátov Silickej planiny. Boli vybrané 4 prítoky vody vnútri Krásno-

horskej jaskyne – pravostranný prítok v Abonyiho dóme, ľavostranný prítok pod Veľkou sieňou (od Heliktitového dómu), miesto presakovania zo Siene obrov a výtok z Marikinho jazera pod Sifónom potápačov. Samostatne sme pozorovali celkový odtok vody z Krásnohorskej jaskyne ako krasový prameň Buzgó. V sieti pozorovaní boli aj 2 pramenné záchyty vzdialenejších vodárenských zdrojov (VZ): VZ Eveteš a VZ Mezeš v katastri obce Hrušov. Z vodárensky nezachytených pramenných výverov sa sledovali 4 pramene – prameň Pri kaplnke (Krásnohor- ská Dlhá Lúka), Pod kameňolomom (Krásnohorská Dlhá Lúka), prameň Pri mlyne (Krásnohorská Dlhá Lúka)

Tab. 1

Miesta aplikácie stopovačov, použitý typ a množstvo stopovača, dátum a čas jeho aplikácie na povrchu Silickej planiny.

Tab. 1

Sites of tracers injection, applied tracer type and its amount, date and time of its application on the surface of the Silická planina Plateau.

Označenie miesta aplikácie	Miesto aplikácie	Druh použitého stopovača	Množstvo použitého stopovača/objem zatlačacej vody	Dátum aplikácie a čas jej trvania
(A) závrť Z	závrť západne od Marikinho jazera; relatívna hĺbka 7 m, rozmery zhruba 60×50 m E 20,577 376°, N 48,614 533°	naftionát sodný	998,53 g/3 m ³ vody	26. 10. 2016 15.50 – 17.00
(B) závrť SV	závrť sv. od Marikinho jazera; relatívna hĺbka 15 m, rozmery zhruba 100×70 m E 20,586 298°, N 48,614 409°	fluoresceín	1 014,86 g/2 m ³ vody	26. 10. 2016 10.30 – 11.50
(C) závrť V	závrť východne od Marikinho jazera; relatívna hĺbka 15 m, rozmery zhruba 125×100 m E 20,586 799°, N 48,613 737°	sulforodamín B	1 010,36 g/3 m ³ vody	26. 10. 2016 12.14 – 14.00
(D) závrť FÁG	závrť vjv. od Marikinho jazera; relatívna hĺbka 22 m, rozmery zhruba 70×50 m E 20,589 2°, N 48,613 2°	fágová suspenzia bakteriofágov H40/1	8 000 ml/5 m ³ vody	14. 11. 2016 12.30 – 14.20



Obr. 4. Zapúšťanie stopovacej látky sulforodamín B na dne závrťu (C) (a), zatlačanie fluoresceínu na dne závrťu (B) dodatočným množstvom 2 m³ čistej vody (b).

Fig. 4. Injection of sulfurhodamin B dye tracer in the (C) sinkhole bottom (a), acceleration of the fluorescein dye in the (B) sinkhole bottom by adding additional 2 m³ of clean water (b).

a Hradná vyvieracia (Brzotín). Na týchto miestach boli inštalované poľné prietokové fluorimetre ako kontinuálne detekčné prístroje v počte 6 kusov a/alebo indikačné absorpčné kapsuly. Zároveň sa odoberali vzorky vody na prítomnosť bakteriofágov H04/1. Celkový prehľad použitej indikačnej metódy na každom monitorovanom mieste je špecifikovaný v tab. 2.

Vzorky vody na detekciu bakteriofágov H40/1 sa postupne odoberali a doručovali do ÚFHZ SAV v Košiciach, kde boli spracované do 24 hodín po doručení. Pri analýze výskytu bakteriofágov v odoberaných vzorkách sa na analýzu výskytu bakteriofágových častíc použil 1 ml vzorky. K vzorke sa pridalo 100 µl vzorky čerstvej kultúry *Pseudoalteromonas gracilis* ($OD_{600} = 0,2$) a zmes sa 15 minút inkubovala pri izbovej teplote. Po tomto čase sa rovnomerne naniesla na povrch kultivačnej platne s médiom SWA a prekryla sa 4 ml „soft“ SWA agaru (médiu SWB s prídavkom 6 g agaru na jeden liter média). Po stuhnutí média sa platne 24 hodín inkubovali pri izbovej teplote. Prítomnosť fágov sa prejavila ako jasne viditeľné zóny zjasnenia (plaky) na súvislej vrstve rastúcich baktérií. Počet fágových častíc sa stanovil vizuálne na základe počtu plakov, t. j. zón bez rastu indikátorovej kultúry *P. gracilis*.

Všetky experimenty sa opakovali minimálne dva razy. Pri každej analýze sa použil kmeň *P. gracilis* bez pridania bakteriofágov ako negatívna kontrola a ten istý kmeň s pridaním 10^3 fágových častíc H40/1 ako pozitívna kontrola (Pristaš, 2017).

Presné miesta inštalácie boli v rámci každej etapy stopovacích skúšok spresnené na základe miestnej obhliadky lokality a technicko-bezpečnostných možností inštalácie. Prehľadne sú uvedené v tab. 2 a na obr. 1.

Vlastný priebeh stopovacích skúšok sa realizoval v nasledujúcich postupných krokoch:

1. umiestnenie kontinuálnych meračov (detekčných prístrojov) a indikačných kapsúl na určené miesta pred aplikáciou, resp. minimálne do jednej hodiny od aplikácie stopovačov. Inštalácia sa realizovala s minimálnym zásahom do okolitého prostredia. Fluorimeter, resp. kapsula sa umiestnili na určené monitorovacie miesto a zabezpečili sa proti odpaveniu zafixovaním pomocou inertného materiálu prítomného v okolí (skaly, štrk);
2. vytvorenie injektážneho priestoru s rozmermi zhruba 1,0 x 1,0 m do hĺbky 1,0 m – terénne úpravy na dne závrtu, do dna takto vyhlúbenej jamy bolo vyhlúbnych

Tab. 2

Miesta inštalácie zariadení na indikovanie stopovacích látok aplikovaných do jednotlivých závrtov na povrchu Silickej planiny nad Krásnohorskou jaskyňou.

Tab. 2

Sites of tracer measuring devices installations for tracers applied to the sinkholes on the surface of the Silická planina Plateau above the Krásnohorská jaskyňa Cave.

Č.	Miesto detekcie	Použitý detektor	Č.	Miesto detekcie	Použitý detektor
1	výtok z Marikinho jazera (Krásnohorská jaskyňa)	prietokový fluorimeter	7	prameň Pri kaplnke (Krásnohorská Dlhá Lúka) N 48,618 482° E 20,586 127	indikačná kapsula
2	miesto presakovania zo Siene obrov (Krásnohorská jaskyňa)	prietokový fluorimeter	8	prameň Pod kameňolomom (Krásnohorská Dlhá Lúka) N 48,617 661° E 20,589 708°	indikačná kapsula
3	ľavostranný prítok pod Veľkou sieňou od Heliktitového domu (Krásnohorská jaskyňa)	prietokový fluorimeter	9	prameň Pri mlyne (Krásnohorská Dlhá Lúka) N 48,619 836° E 20,579 599°	indikačná kapsula
4	pravostranný prítok v Abonyiho dome (Krásnohorská jaskyňa)	prietokový fluorimeter	10	prameň Mezeš, VZ (Hrušov) N 48,595 371° E 20,607 126 1°	indikačná kapsula
5	prameň Buzgó, výstupný sifón (Krásnohorská Dlhá Lúka) N 48,618 043° E 20,587 435°	prietokový fluorimeter	11	prameň Hradná vyvieracia (Brzotín) N 48,607 541° E 20,486 957°	indikačná kapsula
6	prameň Eveteš, VZ (Hrušov) N 48,599 159° E 20,643 091°	prietokový fluorimeter			



Obr. 5. Suspenzia bakteriofágov H40/1 po preprave na lokalitu (a), aplikácia fágovej suspenzie do jamy vyhlbenej na dne závrtu (D) 14. 11. 2016 (b).

Fig. 5. Suspension of bacteriophages H40/1 after its transportation to the application site (a), application of the phage suspension in the dug pit in the (D) sinkhole bottom on the 14. 11. 2016 (b).



Obr. 6. Preprava čistej vody používanej na hydraulické zatlačenie stopovacej látky do horninového prostredia (a), hydraulické dotlačenie stopovacej látky (b).

Fig. 6. Transport of clean water used for hydraulic pushing of the tracer into the rock environment (a), hydraulic pushing of the tracer (b).

Obr. 7. Prívod čistej vody použitej na hydraulické zatlačenie stopovacej látky do horninového prostredia hadicou ku dnu závrtu (a), stopovač naftionát sodný v jame vyhlbenej na dne závrtu (A) (b).

Fig. 7. Clean water supply through the hose to the bottom of the sink-hole for hydraulic pushing of the tracer into the rock environment (a), sodium naphthionate tracer in the dug pit of the (A) sinkhole (b).



niekoľko infiltračných sond, v rámci možností ručným vrtákom;

3. dovoz zdravotne neškodnej (pitnej) vody v objeme 2 až 5 m³ pre každý stopovač na jeho hydraulické zatlačenie do horninového prostredia;
4. príprava zásobného roztoku stopovacej látky (objem zhruba 200 l);
5. inštalácia infiltračného potrubia na aplikáciu stopovača pod terénom;
6. „predinjektáž“ pomocnej vody (zhruba 0,5 m³) na zmáčanie suchých komunikačných ciest a tým zabránenie viazania farbivacej látky do prostredia pri vyrovnávaní vlhkosti prostredia (lepší prienik stopovača do prostredia);
7. aplikácia príslušného zásobného roztoku stopovača, zhruba 200 l, s podporou ďalšieho množstva pomocnej vody v objeme 1 m³;
8. injektáž zatlačacej vody (1,5 až 4,5 m³) na zlepšenie mobility stopovača v krasovo-puklinovom prostredí. Kvôli dôkladnému vypláchnutiu použitého zariadenia bola aplikácia zatlačacej vody zabezpečená prítokom cez zásobné nádrže a infiltračné potrubie;
9. pravidelný monitoring detekčných miest v dňových a týždňových intervaloch v závislosti od klimatických a hydrologických podmienok a priebežných výsledkov v období piatich mesiacov (do 11. 4. 2017); zber zaznamenaných údajov, odber kontrolných vzoriek vody a výmena náplní indikačných kapsúl;
10. demontáž kontinuálnych meračov (prietokových fluorimetrov) a indikačných kapsúl, uvedenie pozorovacích miest do pôvodného stavu;
11. analýzy sorpčných náplní indikačných kapsúl, analýza vzoriek vody na prítomnosť bakteriofágov H40/1, spracovanie zaznamenaných údajov z kontinuálnych meračov;
12. spracovanie výsledkov.

Výsledky a diskusia

Celoplošné kontinuálne sledovanie prítomnosti stopovacích látok vo vode sa začalo 25. 10. 2016 o 12.00 hod., prietokové fluorimetre pracovali s časovým krokom 15 minút. Toto monitorovanie sa skončilo 5. 4. 2017 po viac ako 23 týždňoch pozorovaní (162 dní po zapustení stopovačov). Následne boli záznamy z meracích prístrojov – prietokových fluorimetrov – dekódované a transformované. Výsledky pozorovaní prítomnosti stopovacích látok na indikačných miestach pomocou prietokových fluorimetrov sú uvedené v tab. 3.

Na všetkých šiestich indikačných miestach, kde boli inštalované prietokové fluorimetre (tab. 2 a 3), bol zaznamenaný signál stopovacej látky naftionát sodný, ktorá bola aplikovaná v závrte (A) západne od Marikinho jazera. Počas celého obdobia sledovania zároveň nebol zaznamenaný signál stopovacej látky sulforodamín B, aplikovanej v závrte (C) východne od Marikinho jazera. Signál pozitívnej reakcie (prítomnosti stopovacej látky vo vode) na fluoresceín, ktorý bol injektovaný do dna závrty (B) sv. od Marikinho jazera, bol zaznamenaný len vo veľmi slabej intenzite v oboch bočných prítokoch v Krásnohorskej jaskyni – ľavostrannom prítoku pod Veľkou sieňou od Heliktitévého domu aj pravostrannom prítoku v Abonyiho dóme, na iných miestach však nie.

Bakteriofágy H40/1, ktoré boli aplikované s časovým sklzom takmer troch týždňov od zapúšťania farbivacích stopovačov do závrty (D) vjv. od Marikinho jazera, neboli – podobne ako farbivo sulforodamín B – na žiadnom z monitorovaných miest v žiadnom zo série 16 až 25 odberov realizovaných na 11 monitorovacích miestach (tab. 4). Spolu sa teda vykonalo a následne analyzovalo 223 odberov, všetky bez preukázania prítomnosti bakteriofágov vo vzorke (Pristaš, 2017).

Výsledky získané po spracovaní sorpčných náplní indikačných kapsúl z aktívneho uhlia preukázali prítomnosť dvoch stopovačov na rozdielnych sledovaných miestach vo veľmi nízkej intenzite. Naftionát sodný, aplikovaný v závrte (A) západne od Marikinho jazera, sa objavil vo vode prameňa Pod kameňolomom (označenie miesta indikácie: 8), ako aj vo vode prameňa Mezeš (10).

Zatiaľ čo prítomnosť naftionátu v prameni Pod kameňolomom bola zaznamenaná už pri prvom odbere sorpčnej náplne 14. 11. 2016, teda 19 dní po jeho aplikovaní, a pretrvávala až do odberu 5. 1. 2017 (52 dní po aplikácii), v prípade vodárenského zdroja Mezeš to bolo iba počas neskoršieho a kratšieho obdobia. Naftionát tu bol zaznamenaný len v odberoch z 21. 11. 2016 a 28. 11. 2016, teda 7 až 14 dní po jeho uvedení do horninového prostredia na povrchu Silickej planiny v závrte Z (A). Väčším prekvapením je ale indikovanie fluoresceínu vo vode prameňa Hradná vyvieracia pri Brzotíne (11) v rovnakom čase, teda 7 až 14 dní po jeho vypustení do dna závrty (B) sv. od Marikinho jazera. Ide tu o podstatne väčšiu vzdialenosť, 7,57 km vzdušnou čiarou, na rozdiel od 2,95 km medzi závrty Z (A) a prameňom Mezeš. V prvom prípade (fluoresceín v prameni Hradná vyvieracia) by bola nepravá rýchlosť prúdenia (pri prepočte vzdušnou vzdialenosťou miest aplikácie a indikovania) v rozsahu medzi 540,7 a 1 081,4 m/deň (0,63 – 1,25 cm/s). V prípade prameňa Mezeš a závrty (A) by bola nepravá rýchlosť prúdenia 210,7 až 421,4 m/deň (0,24 až 0,49 cm/s).

Prítomnosť stopovačov nebola vizuálne zaznamenaná na žiadnom z miest detekcie počas celého priebehu monitoringu. S výnimkou výpadku meraní na prietokovom

Tab. 3

Výsledky pozorovaní prítomnosti stopovacích látok na indikačných miestach pomocou prietokových fluorimetrov počas stopovacích skúšok v období 25. 10. 2016 – 5. 4. 2017.

Tab. 3

Results of tracer observations at indication sites using flow-through fluorimeters during tracing tests in the period 25. 10. 2016 – 5. 4. 2017.

Miesto detekcie (výrobné číslo fluorimetra)	Stopovacia látka	Dátum a čas prvej indikácie stopovača	Dátum a čas vrcholnej detekcie stopovača	Maximálna koncentrácia stopovača [ppb]	Poznámka
1 – výtok z Marikinho jazera (914)	naftionát sodný	6. 11. 2016 16.45	21. 11. 2016 6.00	61,82	jediný signál
	sulforodamín B	---	---	---	nedetegovaný
	fluoresceín	---	---	---	nedetegovaný
2 – ľavostranný prítok pod Veľkou sieňou (737)	naftionát sodný	8. 11. 2016 17.00	9. 11. 2016 15.30	56,3	jediný signál
	sulforodamín B	---	---	---	nedetegovaný
	fluoresceín	17. 11. 2016 07.15	1. 12. 2016 17.30	0,68	jediný signál
3 – miesto presakovania zo Siene obrov (309)	naftionát sodný	7. 11. 2016 02.00	19. 11. 2016 01.15	0,68	jediný signál
	sulforodamín B	---	---	---	nedetegovaný
	fluoresceín	---	---	---	nedetegovaný
4 – pravostranný prítok V Abonyiho dóme (736)	naftionát sodný	8. 11. 2016 00.00	8. 11. 2016 22.30	32,96	jediný signál
	sulforodamín B	---	---	---	nedetegovaný
	fluoresceín	6. 11. 2016 19.15	8. 11. 2016 14.30	0,24	jediný signál
5 – prameň Buzgó (310)	naftionát sodný	27. 10. 2016 06.00 30. 10. 2016 06.00 6. 11. 2016 17.15	28. 10. 2016 06.00 3. 11. 2016 06.00 21. 11. 2016 07.00	166,00 124,96 58,30	prvý signál druhý signál tretí signál
	sulforodamín B	---	---	---	nedetegovaný
	fluoresceín	---	---	---	nedetegovaný
6 – prameň Eveteš, VZ ¹ (738)	naftionát sodný	27. 10. 2016 08.15 6. 11. 2016 09.00	29. 10. 2016 23.45 7. 11. 2016 18.30	107,73 121,71	prvý signál druhý signál
	sulforodamín B	---	---	---	nedetegovaný
	fluoresceín	---	---	---	nedetegovaný

Pozn.: ¹VZ – vodárenský zdroj



Obr. 8. Použitie kontinuálne pracujúceho poľného prietokového fluorimetra GGUN-FL30 – detailná ukážka detekčnej časti (a) a pamäťovej časti zariadenia slúžiaceho na zber údajov (b).

Fig. 8. The use of continuously measuring field fluorimeter GGUN-FL30 – detail of its detection part (a) and data memory part (b)



Obr. 9. Terénny zber výsledkov z poľného prietokového fluorimetra GGUN-FL30 vnútri Krásnohorskej jaskyne.

Fig. 9. Data collection from the flow-through field fluorimeter GGUN-FL30 inside the Krásnohorská jaskyňa Cave.



Obr. 10. Poľný prietokový fluorimeter GGUN-FL30 inštalovaný vnútri vodárenského zdroja – krasového prameňa Eveteš v Hrušove (a), detailný pohľad na kapsulu so sorpčnou látkou, použitú na detekčných miestach 7 až 11 v rámci opisovaných stopovacích skúšok (b).

Fig. 10. Flow-through field fluorimeter GGUN-FL30 inside the drinking water source of Eveteš karstic spring (a), capsule with sorption agent, as applied on sites 7 to 11 (b).

fluorimetri č. 914 na výtoku z Marikinho jazera (monitorovací bod č. 1) počas prvých 10 dní meraní po injektácii farbivacích stopovačov, ostatné kontinuálne merače pracovali počas celého monitoringu bez vážnych porúch a prerušení.

Spracovanie sorpčných náplní sa robilo semikvantitatívnou metódou, ktorá neumožňuje stanoviť koncentráciu stopovacích látok vo vode. Indikuje sa len ich prítomnosť v určitom časovom intervale, ktorý je definovaný frekvenciou výmeny sorpčných náplní. Naše výsledky preukázali prítomnosť dvoch stopovačov na troch sledovaných miestach (tab. 5) vo veľmi nízkej (+) intenzite. Okrem vody prameňov Pod kameňolomom, Mezeš a Hradná vyvieračka, kde sa v určitom úseku monitorovacieho obdobia zaznamenali stopovače naftionát sodný, resp. fluoresceín, sa zistili aj dve miesta detekcie, ktoré vykazovali úplnú negatívitu – neprítomnosť žiadnej z aplikovaných stopovacích látok. Išlo o prameň Pri kaplnke (7) a prameň Pri mlyne (9). Počas analýz vzoriek získaných z aktívneho uhlia sa však zaznamenala veľmi nízka hladina prítomnosti stopovačov, čo výrazne sťažovalo detekciu ich prítomnosti a spôsobilo nutnosť výkonu opakovaných analýz vzoriek. Ani uvedené tri prepojenia (tab. 5) teda nemožno považovať sa overenie miest s úplnou pozitivitou vo vzťahu k aplikovaným stopovačom. Výsledky získané zo spracovania sorpčných náplní treba skôr považovať za indície možných prepojení.

Pri stopovacej látke sulforodamín B aplikovanej v závrte (C) východne od Marikinho jazera ani pri bakteriofágoch H40/1 aplikovaných do závrty (D) vjv. od Marikinho jazera sa nezistili nijaké reakcie na žiadnom z jedenástich miest ich detekcie. Tieto miesta možno považovať za miesta s lepšou prirodzenou ochrannou funkciou proti potenciálnemu znečisteniu.

Naopak, za lokalitu s vysokým stupňom aktívneho podzemného prepojenia s jednotlivými časťami podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne možno považovať závrty (A) západne od Marikinho jazera. Okrem uvedených nálezov aplikovaného naftionátu sodného v prameňoch Pod kameňolomom (8) a Mezeš (10) bol naftionát sodný indikovaný prietokovými fluorimetrami na všetkých nimi monitorovaných miestach, a to v značnej intenzite, danej maximálnou indikovanou koncentráciou stopovača (tab. 6). Tá sa pohybovala od 0,68 ppb vo vode presakovanej zo Siene obrov až do 107,73 ppb, zistených prekvapujúco už po vyše 3 dňoch v prameni Eveteš nad obcou Hrušov vzdialenom 4,8 km. Vo vode tohto prameňa bol zaznamenaný aj príchod druhého, ešte intenzívnejšieho signálu s intenzitou 121,71 ppb po 12,1 dňoch. Vzhľadom na silu signálu a rýchlosť jeho prenosu je potrebné v oblasti medzi závrty (A) západne od Marikinho jazera a prameňom Eveteš predpokladať existenciu dvoch vzájomne oddelených, ale v obidvoch prípadoch veľmi aktívnych obehových ciest vo vadóznej zóne pod polohovo relevantným povrchom Silickej

planiny. Nepravá rýchlosť prúdenia je v tomto prípade 1 443,2 m/deň (1,67 cm/s) v prípade predpokladaného „rýchlostne aktívnejšieho kanála“ nenasýtenej zóny a 396,8 m/deň (0,46 cm/s) v prípade druhého „kanála“, pri ktorom zas možno predpokladať nižšiu mieru disperzie a prenos vyššej koncentrácie aj v prípade kontaminantov, nielen stopovacích látok.

Najvyššia úroveň zachyteného signálu sa podľa očakávania prejavila vo vode krasového prameňa Buzgó, kde dosiahla pri príchode dvoch po sebe idúcich signálov (1,6 dňa a 7,6 dňa) po injekťži naftionátu sodného do závrťu (A) úroveň 166,0 ppb pri prvom, skoršom signáli a 125,0 ppb pri druhom signáli prichádzajúcom šesť dní po ňom. Aj v tomto prípade môžeme hovoriť o dvoch vzájomne oddelených aktívnych obehových cestách vody vo vadóznej zóne. Pretože uvedené monitorované miesto spája v sebe vody prechádzajúce monitorovanými miestami 1 až 4 (hlavným výtokom z Marikinho jazera či tromi nižšie sa nachádzajúcimi prítokmi), predpokladáme, že signál sa objavil vo vode Marikinho jazera, kde bol v danom čase nefunkčný fluorimeter. Pri výpočte nepravéj rýchlosti prúdenia je potrebné počítať so vzájomnou vzdušnou vzdialenosťou Marikinho jazera a závrťu (A) 613 m, pri ktorej je potom v prípade aktívnejšieho kanála nepravá rýchlosť 385,5 m/deň (0,45 cm/s) a v prípade druhého 80,8 m/deň (0,09 cm/s). S týmto („prvým“ naftionátovým) maximom zisteným vo vode prameňa Buzgó a predpokladaným vo vode Marikinho jazera súvisí zrejme aj prítomnosť naftionátu sodného v prameni Pod kameňolomom indikovaná sorpčnými kapsulami (dva odbery s pozitívnym výsledkom, zachytávajúce časový interval 18. 11. až 28. 11. 2016; tab. 5). Podľa systematického monitorovania chemického zloženia vody oboch týchto zdrojov v rámci projektu KRASCAVE (Malík et al., 2019) sú ich kvalitatívne vlastnosti veľmi podobné a možno medzi nimi očakávať významný súvis.

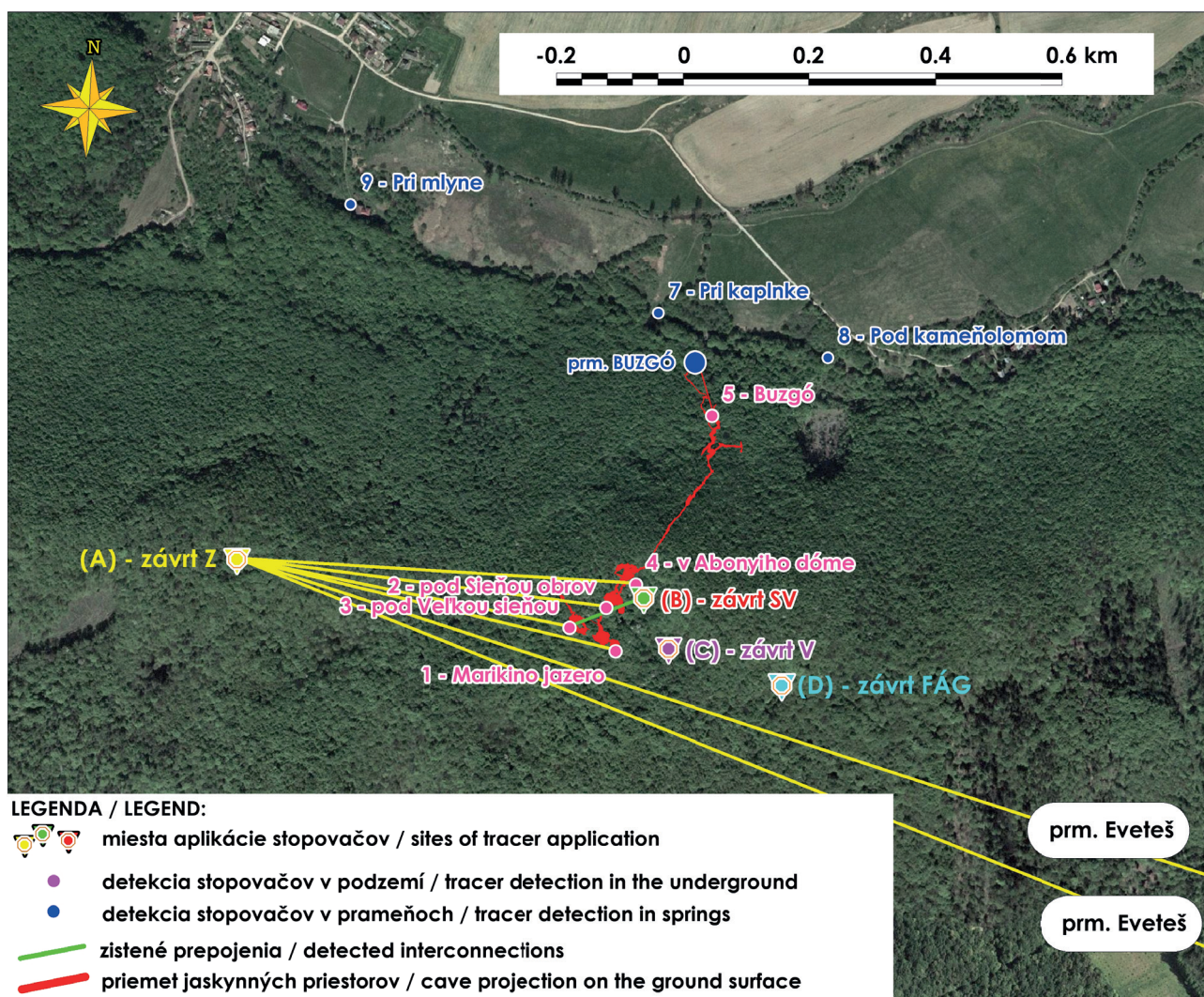
Po čase, keď sa zistil chybný záznam fluorimetra č. 914 inštalovaného v Sifóne potápačov (kde je prirodzená cesta odvodňovania Marikinho jazera) a došlo k náprave meraní, bol 6. 11. 2016 v čase od 16.45 detegovaný nástup ďalšieho, v poradí už tretieho signálu, ktorý dosiahol najvyššiu intenzitu až 21. 11. 2016 okolo 6.00 hod. Z toho vyplýva, že išlo o značne rozptýlený príchod stopovača signalizujúci značný stupeň disperzie, hoci úroveň vrcholovej koncentrácie bola až 61,8 ppb. Pri zjednodušenom chápaní by sme k tomuto tretiemu signálu priradili nepravú rýchlosť 23,9 m/deň (0,028 cm/s), no v tomto prípade evidentne ide o pomalý nárast stopovača rozptýleného v horninovom prostredí. Oveľa intenzívnejší bol koncentračný nárast v prípade dvoch väčších prítokov v Krásnohorskej jaskyni – ľavostranného prítoku pod Veľkou sieňou (od Heliktitového dómu; č. 2 v tab. 2) a pravostranného prítoku v Abonyiho dóme (č. 4). V oboch prípadoch sa zaznamenal časový rozdiel medzi prvou indikáciou stopovača a jeho

najvyššou hodnotou 22.30 hod. (0,94 dňa), v prítoku v Abonyiho dóme však bola prvá indikácia stopovača zaznamenaná o 17 hodín skôr a takisto bola v čase posunutá aj najvyššia zistená hodnota. V oboch prípadoch však išlo o časový posun od injekťže naftionátu sodného do závrťu (A) v rozmedzí 13 až 14 dní. Zaujímavosťou je, že stopovač bol zaznamenaný skôr vo vzdialenejšom pravostrannom prítoku v Abonyiho dóme (č. 4) na „opačnej“, východnej strane Krásnohorskej jaskyne. Preto je v prípade prítoku pod Veľkou sieňou (2) hodnota nepravéj rýchlosti menšia (38,2 m/deň, resp. 0,044 cm/s), v prípade prítoku v Abonyiho dóme o 25 % väčšia (47,4 m/deň, resp. 0,055 cm/s). Uvedené signály boli zaznamenané aj na fluorimetri č. 310 na monitorovacom mieste 5 – prameň Buzgó. Napokon bolo po vyše troch týždňoch zachytené maximum signálu stopovacej látky naftionát sodný aj v mieste presakovania zo Siene obrov, teda vo vode, ktorá sa podieľa na vytváraní gigantického, 32,6 m vysokého Kvapľa rožňavských jaskyniarov nachádzajúceho sa v tejto sieni. Toto maximum však bolo mimoriadne nízke (len 0,68 ppb), a tak nebol tento signál ani rozlíšený v rámci kontinuálnych meraní na prietokovom fluorimetri č. 310 priamo nad prameňom Buzgó, na monitorovacom mieste 5. Podobne ako v prípade tretieho signálu vo vode Marikinho jazera, aj tu išlo o veľmi pomalý nárast – prvá indikácia stopovača bola registrovaná 7. 11. 2016 o 2.00 hod. a maximum nastalo až o 12 dní neskôr (19. 11. 2016 o 1.15 hod.). Časovo sa oba signály (tento z prítoku zo Siene obrov a tretí z Marikinho jazera) veľmi podobajú, jednak časom tranzitu (23,39, resp. 25,59 dňa) a časom svojho nástupu, jednak časom dosiahnutia maxima (tab. 6). Môžeme preto predpokladať, že uvedené miesta nachádzajúce sa v zadných, vzdialenejších častiach Krásnohorskej jaskyne boli zasiahnuté rozptýleným mrakom naftionátu sodného zo závrťu (A), keď predtým bol cez Marikino jazero transportovaný stopovač vstupujúci koncentrovane do iných miest podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne. Zároveň tieto miesta neboli zasiahnuté stopovačom, ktorý sa v trocha menej koncentrovanej forme objavil v dvoch väčších prítokoch – v ľavostrannom pod Veľkou sieňou (od Heliktitového dómu), ako aj pravostrannom v Abonyiho dóme (č. 2 a 4).

Pri stopovacom fluoresceíne, ktorý bol aplikovaný do závrťu (B) nachádzajúceho sa sv. od Marikinho jazera, bol fluorimetrami zaznamenaný len slabý signál. Je však zaujímavé, že zasiahol len bezprostredne najbližšie monitorovacie miesta – ľavostranný prítok pod Veľkou sieňou (od Heliktitového dómu; č. 2 v tab. 2) a pravostranný prítok v Abonyiho dóme (č. 4) – a na iných miestach podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne fluoresceín nebol detegovaný. Nebolo to tak ani v prípade monitorovacieho bodu č. 5 nad prameňom Buzgó. Vysvetľujeme si to príliš veľkým zriedením stopovača, ktorý mal mimoriadne nízku koncentráciu už v spomínaných prítokoch.

koch. Vo vode pravostranného prítoku v Abonyiho dóme to bolo len 0,24 ppb a vo vode ľavostranného prítoku pod Veľkou sieňou 0,68 ppb. Aj čas tranzitu fluoresceínu tu však bol napriek mimoriadne malej vzdialenosti pomerne dlhý – príchod maxima bol zaznamenaný po vyše 13, resp. vyše 36 dňoch (tab. 6), pritom vzdušnou čiarou je vzdialenosť týchto monitorovacích miest 25, resp. 126 m od dna závrtu – závrt (B) sa prakticky nachádza priamo nad priestormi Krásnohorskej jaskyne. Nepravá rýchlosť odvozená z týchto hodnôt (1,9 m/deň, resp. 0,002 cm/s v prítoku č. 4 v Abonyiho dóme a 3,5 m/deň, resp. 0,004 cm/s v prítoku č. 3 pod Veľkou sieňou od Heliktitového dómu) je najnižšia, aká bola zistená počas nami analyzovaných stopovacích skúšok. V prípade monitorovacieho bodu č. 3 možno navyše konštatovať pomerne veľkú disperziu stopovacieho farbiva v horninovom prostredí, keď čas od

záznamu prvej indikácie po záznam najvyššej koncentrácie stopovača tu bol až 14,4 dňa (v bližšom monitorovacom bode č. 4 len 1,8 dňa). Z nízkych hodnôt zistenej koncentrácie, veľmi dlhého tranzitného času a malej rýchlosti tranzitu vyplýva, že horninové prostredie v oblasti pod závrtom (B) sv. od Marikinho jazera v smere ku Krásnohorskej jaskyni poskytuje vcelku dobrú prirodzenú ochranu pred potenciálne prenikajúcim znečistením vďaka svojim hydrofyzikálnym vlastnostiam alebo značnému objemu vody v zóne epikrasu, ktorým stopovač nestačil preniknúť. O to zaujímavejšia je potom detekcia stôp fluoresceínu na aktívnom uhlí sorpčných kapsúl situovaných vo vode prameňa Hradná vyvieračka pri Brzotíne (tab. 5) v čase medzi 18. 11. a 28. 11. 2016. V tomto prípade by pri vzájomnej vzdialenosti oboch bodov bola nepravá rýchlosť v rozmedzí približne 220 až 320 m/deň, resp. 0,258 až 0,369 cm/s.



Obr. 11. Výsledky stopovacích skúšok podľa údajov zaznamenaných prietokovými ponornými fluorimetrami GGUN-FL30 – detail bezprostrednej oblasti Krásnohorskej jaskyne.

Fig. 11. Results of tracer tests according to the data recorded by GGUN-FL30 flow-through submersible fluorimeters – detail for the nearest area of the Krásnohorská jaskyňa Cave.

Stopovacia látka by sa však zjavne od závrtnu (B), kde bola injektovaná, musela šíriť spočiatku južným smerom (mimo oblasti Krásnohorskej jaskyne, kde sa vyskytla len v zanedbateľnej koncentrácii približne v rovnakom čase) a až následne v smere na západ, takže jej rýchlosť by mala byť ešte vyššia.

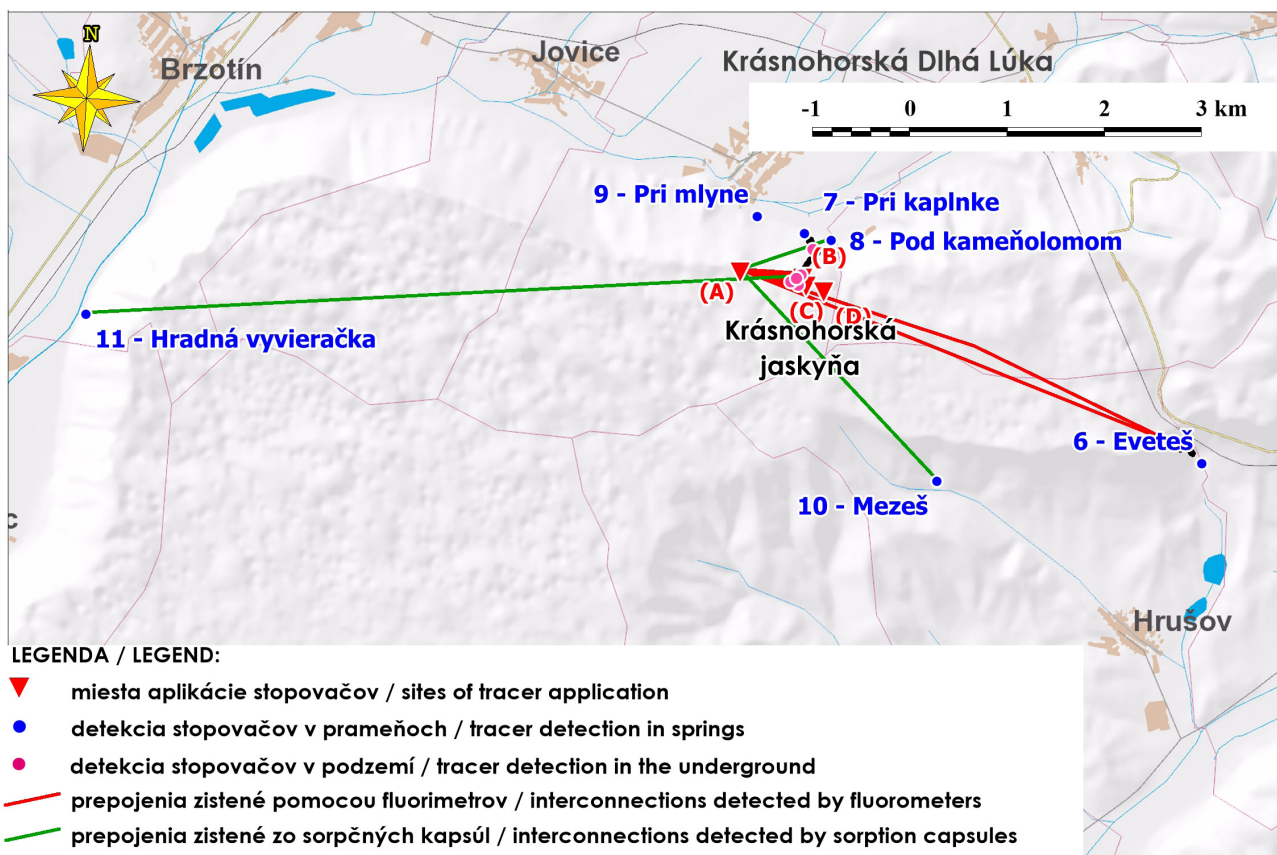
Vlhkostné pomery v skúmanej oblasti Silickej planiny boli v období realizácie stopovacích skúšok nadnormálne: pre zrážkomernú stanicu SHMÚ 55 180 Silica (505 m n. m.) je charakteristický zrážkový úhrn za mesiac október 57 mm, októbrový zrážkový úhrn v roku 2016 však bol v takmer dvojnásobnej výške, 112 mm. Výrazné tu boli zrážky v dňoch 3. 10. 2016 (28,0 mm), a najmä 21. 10. 2016 (27,2 mm), ktoré prispeli k saturácii pôdy dostatočným množstvom vlhky pred samotnou aplikáciou stopovačov 26. 10. 2016. Mesiac november 2016 so zaznamenaným úhrnom 52,0 mm bol potom vlhkostne priemerný, pretože priemerné novembrové úhrny na stanici Silica dosahujú 52 mm. Väčšina denných úhrnov neprekročila 3,0 mm, s výnimkou dvoch výrazných dažďových dní 5. 11. 2016 (18,4 mm) a 6. 11. 2016 (17,8 mm). Je zrejmé, že uvedený zrážkový impulz v tomto období do veľkej miery aktivo-

val prenos stopovačov, pretože väčšina prvých indikácií stopovačov bola zaznamenaná až po 5. novembri 2016. Naopak, december 2016 s úhrnom 1,3 mm bol v stanici Silica mimoriadne suchý, keďže úhrny tu zvyčajne dosahujú 40 mm. V uvedenom období nedošlo na povrchu Silickej planiny k akumulácii snehových zrážok, a teda ani k ich topeniu. Priemerný zrážkový úhrn v stanici Silica za 44-ročné obdobie 1973 – 2017 je 707 mm.

Výsledky prepojení jednotlivých miest aplikácie a indikácie stopovacích látok sú zhrnuté v tab. 3 až 6, znázornené sú aj na obr. 11 a 12.

Záver

V období na prelome rokov 2016 a 2017 v oblasti východnej časti Silickej planiny v rámci predpokladaného rozsahu podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne sa realizovali štyri stopovacie skúšky na testovanie citlivosti vody Krásnohorskej jaskyne na potenciálnu kontamináciu prítomnú na bezprostredne blízkom povrchu Silickej planiny. Farbiace stopovacie látky boli aplikované do horninového prostredia 26. októbra 2016



Obr. 12. Výsledky stopovacích skúšok v širšej oblasti Krásnohorskej jaskyne podľa údajov zaznamenaných prietokovými ponornými fluorimetrami GGUN-FL30 a aktívnym uhlím v sorpčných kapsulách.

Fig. 12. Results of tracer tests in the broader area of the Krásnohorská jaskyňa Cave according to the data recorded by GGUN-FL30 flow-through submersible fluorimeters and activated carbon in the capsules.

Tab. 4

Počty plakov detegované v jednotlivých vzorkách počas stopovacej skúšky s použitím bakteriofágov H40/1 v závrtě (D) vjv. od Marikinho jazera v období 14. 11. 2016 až 11. 04. 2017.

Tab. 4

Presence of plaques detected in individual samples taken in the period 14. 11. 2016 – 11. 04. 2017, during tracer test using H40/1 bacteriophages in the (D) sinkhole ESE from the Marikino jazero Lake.

Dátum	1 – výtok z Marikinho jazera	2 – presakovanie zo Siene obrov	3 – ľavostranný prítok pod Veľkou sieňou od Helikťitového domu	4 – pravostranný prítok v Abonyho dome	5 – prameň Buzgó	6 – prameň Eveteš, VZ (Hrušov)	7 – prameň Pri kaplnke	8 – prameň Pod kameňolomom	9 – prameň Pri mlyne	10 – prameň Mezeš (Hrušov)	11 – prameň Hradná vyvieračka (Brzotín)
14. 11. 2016 14.30	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0		0/0	0/0	0/0		
14. 11. 2016 18.00					0/0		0/0	0/0	0/0		
14. 11. 2016 22.15					0/0		0/0	0/0	0/0		
15. 11. 2016 02.15	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0		0/0	0/0	0/0		
15. 11. 2016 06.00					0/0		0/0	0/0	0/0		
15. 11. 2016 10.00					0/0		0/0	0/0	0/0		
15. 11. 2016 15.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
15. 11. 2016 22.00					0/0		0/0	0/0	0/0		
16. 11. 2016 02.30	0/0	0/0	0/0								
16. 11. 2016 06.15					0/0		0/0	0/0	0/0		
16. 11. 2016 14.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
16. 11. 2016 22.20					0/0		0/0	0/0	0/0		
17. 11. 2016 02.15	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
17. 11. 2016 06.15	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
17. 11. 2016 14.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
17. 11. 2016 22.15	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
18. 11. 2016 14.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
19. 11. 2016 14.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
20. 11. 2016 14.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
21. 11. 2016 14.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
28. 11. 2016 13.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
5. 12. 2016 12.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
5. 1. 2017 12.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
5. 2. 2017 12.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
28. 2. 2017 12.00	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
10. 4. 2017 12.00	0/0	0/0	0/0	0/0		0/0			0/0	0/0	0/0
11. 4. 2017 12.00					0/0		0/0	0/0			

Tab. 5

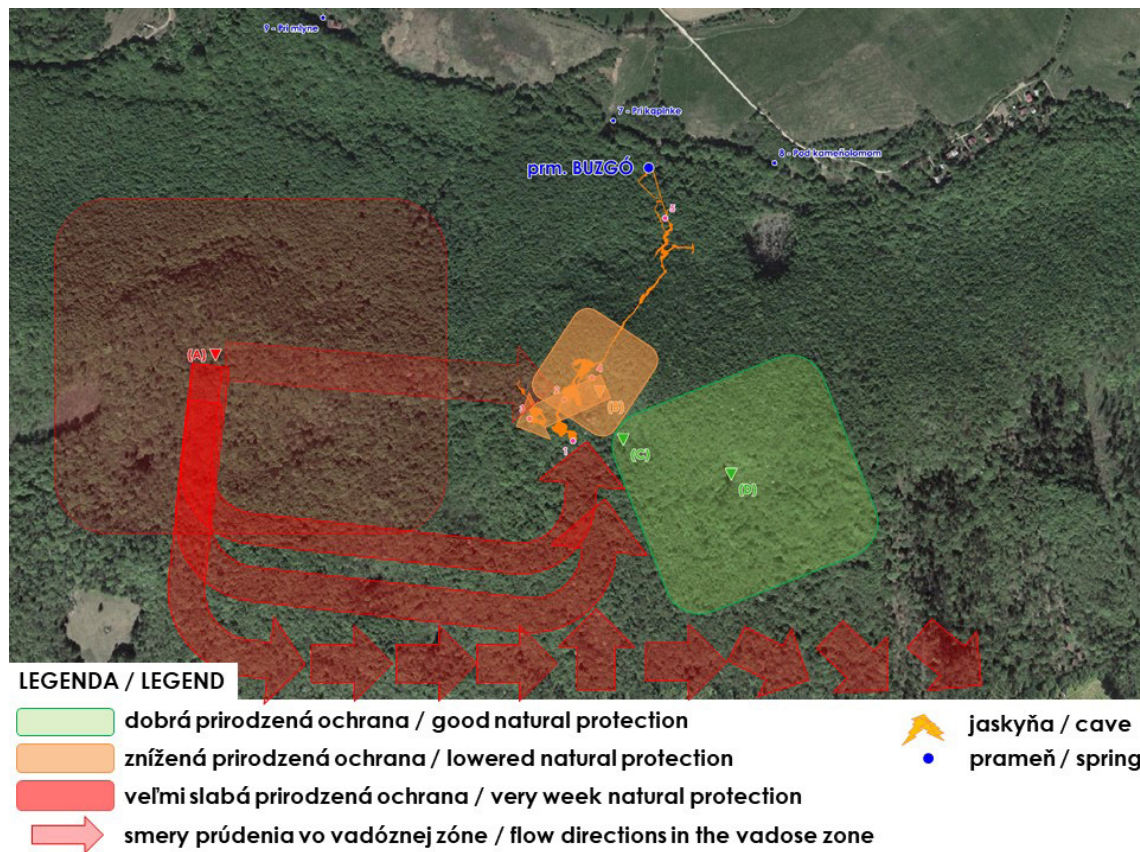
Prítomnosť stopovačov zistená na sorpčnom materiáli v indikačných kapsulách na vybraných miestach, čísla miest detekcie zodpovedajú tab. 2. Detegované farbivá: Ns – naftionát sodný, Fl – fluoresceín.

Tab. 5

Presence of tracers detected on sorption material in indicator capsules at selected detection sites, markings of tracer detection sites correspond to Tab. 2. Detected dye tracers: Ns – sodium naphtionate, Fl – fluorescein.

Dátum	7 – prameň Pri kaplnke	8 – prameň Pod kameňolomom	9 – prameň Pri mlyne	10 – prameň Mezeš (Hrušov)	11 – prameň Hradná vyvieráčka (Brzotín)
14. 11. 2016 12.00	---	Ns +	---	---	---
16. 11. 2016 12.00	---	Ns +	---	---	---
18. 11. 2016 12.00	---	Ns +	---	---	---
18. 11. 2016 12.00	---	Ns +	---	---	---
21. 11. 2016 12.00	---	Ns +	---	Ns +	Fl +
28. 11. 2016 12.00	---	Ns +	---	Ns +	Fl +
5. 12. 2016 12.00	---	Ns +	---	---	---
5. 1. 2017 12.00	---	Ns +	---	---	---
5. 2. 2017 12.00	---	---	---	---	---
5. 3. 2017 12.00	---	---	---	---	---
5. 4. 2017 12.00	---	---	---	---	---

Pozn.: Intenzita signálu: + veľmi nízka, ++ nízka, +++ stredná, ++++ zvýšená, +++++ vysoká



Obr. 13. Prirodzená ochranná funkcia horninového prostredia nad Krásnohorskou jaskyňou.

Fig. 13. Natural protection function of the rock environment above the Krásnohorská jaskyňa Cave.

Tab. 6

Sumarizácia výsledkov stopovacích skúšok podľa záznamov z prietokových fluorimetrov GGUN-FL30, označenia miest aplikácie zodpovedajú tab. 1 a čísla miest detekcie tab. 2.

Tab. 6

Summary of tracer tests results according to data taken from GGUN-FL30 field fluorimeters, markings od tracer applications correspond to Tab. 1 and markings of tracer detection sites correspond to Tab. 2.

Miesto aplikácie stopovača	Miesto indikovania stopovača	Druh stopovača	Vzdialenosť [m]	Maximálna indikovaná koncentrácia stopovača	Čas tranzitu [deň]	Rýchlosť tranzitu koncentračného maxima [m/deň]	Rýchlosť tranzitu koncentračného maxima [cm/s]	Dátum a čas zapustenia stopovača	Dátum a čas prvej indikácie stopovača	Dátum a čas najvyššej koncentrácie stopovača
(A) závrť Z	1 – výtok z Marikinho jazera	naftionát sodný	613	61,82	25,59	23,9	0,028	26. 10. 2016 15.50	6. 11. 2016 16.45	21. 11. 2016 06.00
(A) závrť Z	2 – ľavostranný prítok pod Veľkou sieňou od Heliktitového domu	naftionát sodný	534	56,30	13,99	38,2	0,044	26. 10. 2016 15.50	8. 11. 2016 17.00	9. 11. 2016 15.30
(A) závrť Z	3 – miesto presakovania zo Stene obrov	naftionát sodný	586	0,68	23,39	25,1	0,029	26. 10. 2016 15.50	7. 11. 2016 02.00	19. 11. 2016 01.15
(A) závrť Z	4 – pravoststranný prítok v Abonyiho dome	naftionát sodný	629	32,96	13,28	47,4	0,055	26. 10. 2016 15.50	8. 11. 2016 00.00	8. 11. 2016 22.30
(A) závrť Z	5 – prameň Buzgó	naftionát sodný	783	166,00	1,59	492,4	0,570	26. 10. 2016 15.50	27. 10. 2016 06.00	28. 10. 2016 06.00
(A) závrť Z	5 – prameň Buzgó	naftionát sodný	783	124,96	7,59	103,2	0,119	26. 10. 2016 15.50	30. 10. 2016 06.00	3. 11. 2016 06.00
(A) závrť Z	5 – prameň Buzgó	naftionát sodný	783	58,30	25,63	30,5	0,035	26. 10. 2016 15.50	6. 11. 2016 17.15	21. 11. 2016 07.00
(A) závrť Z	6 – prameň Eveteš, VZ (Hrušov)	naftionát sodný	4 806	107,73	3,33	1 443,2	1,670	26. 10. 2016 15.50	27. 10. 2016 08.15	29. 10. 2016 23.45
(A) závrť Z	6 – prameň Eveteš, VZ (Hrušov)	naftionát sodný	4 806	121,71	12,11	396,8	0,459	26. 10. 2016 15.50	6. 11. 2016 09.00	7. 11. 2016 18.30
(B) závrť SV	2 – ľavostranný prítok pod Veľkou sieňou od Heliktitového domu	fluoresceín	126	0,68	36,29	3,5	0,004	26. 10. 2016 10.30	17. 11. 2016 07.15	1. 12. 2016 17.30
(B) závrť SV	4 – pravoststranný prítok v Abonyiho dome	fluoresceín	25	0,24	13,17	1,9	0,002	26. 10. 2016 10.30	6. 11. 2016 19.15	8. 11. 2016 14.30

v troch závrtoch, resp. krasových jamách: (A) závrt západne od vertikálneho priemetu Marikinho jazera na povrch Silickej planiny – naftionát sodný, (B) závrt sv. od Marikinho jazera – fluoresceín, (C) závrt východne od Marikinho jazera – sulforodamín B. Fágová suspenzia bakteriofágov H40/1 sa pre technologické ťažkosti prípravy jej dostatočného množstva a koncentrácie aplikovala až neskôr, a to 14. novembra 2016 do miesta aplikácie (D) – závrtu vjv. od Marikinho jazera. Po aplikácii stopovačov sa realizoval ich monitoring na 11 pozorovacích miestach v trvaní zhruba päť mesiacov. V šiestich prípadoch boli použité poľné prietokové fluorimetre GGUN-FL30 s kontinuálnym meraním koncentrácie použitých farbív a na ostatných miestach indikačné kapsuly so sorpčnou látkou. Na tých istých miestach sa odoberali aj vzorky vody na detekciu bakteriofágov H04/1, ktoré sa následne doručili do Ústavu fyziológie hospodárskych zvierat SAV v Košiciach, kde sa do 24 hodín po doručení spracúvali.

Detekcia stopovacích látok sa vykonávala na 5 miestach vnútri podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne (1 – výtok z Marikinho jazera pod Sifónom potápačov, 2 – miesto presakovania zo Sieň obrov, 3 – ľavostranný prítok pod Veľkou sieňou od Heliktitového domu, 4 – pravostranný prítok v Abonyiho dóme, 5 – celkový odtok vody z Krásnohorskej jaskyne v krasovom prameni Buzgó), kde boli inštalované fluorimetre GGUN-FL30. Tento prístroj bol inštalovaný aj vo vodárensky zachytenom prameni Eveteš nad obcou Hrušov. Na ďalších prameňoch boli inštalované kapsuly so sorpčným materiálom (aktívne uhlie), ktorý sa v pravidelných intervaloch vymieňal a následne analyzoval. Takto bolo sledovaných päť menších prameňov: Pri kaplnke (Krásnohorská Dlhá Lúka), Pod kameňolomom (Krásnohorská Dlhá Lúka), Pri mlyne (Krásnohorská Dlhá Lúka), Hradná vyvieračka (Brzotín) a prameň Mezeš (Hrušov). Posledný z nich sa využíva aj ako vodárenský zdroj pre obec Hrušov.

Počas celého obdobia sledovania nebol zaznamenaný signál stopovacej látky sulforodamín B, aplikovanej v závrtu (C) východne od Marikinho jazera. Takisto nebola zaznamenaná prítomnosť bakteriofágov H40/1 aplikovaných do závrtu (D) vjv. od Marikinho jazera ani v jednej z 223 odobraných a analyzovaných vzoriek. Oba závrtu sa nachádzajú južne, resp. jv. od Krásnohorskej jaskyne. Predpokladáme, že v týchto miestach poskytuje povrch Silickej planiny pre Krásnohorskú jaskyňu a jej podzemný hydrologický systém vcelku dobrú prirodzenú ochranu pred potenciálne prenikajúcim znečistením.

Výsledky získané po spracovaní sorpčných náplní indikačných kapsúl z aktívneho uhlia preukázali prítomnosť dvoch stopovačov na rozdielnych sledovaných miestach vo veľmi nízkej intenzite. Naftionát sodný, aplikovaný v závrtu (A) západne od Marikinho jazera, sa objavil vo

vode prameňa Pod kameňolomom (označenie miesta indikácie: 8), ako aj vo vode prameňa Mezeš (10). Fluoresceín aplikovaný do závrtu (B) bol zas detegovaný v dvoch sorpčných náplniach v prameni Hradná vyvieračka (11) pri Brzotíne. Neprítomnosť stopovacích látok sa zistila v prameni Pri kaplnke (7) a prameni Pri mlyne (9). Výsledky získané pomocou sorpčných náplní však treba skôr považovať za indície možných prepojení. Dôvodom je veľmi nízka hladina prítomnosti stopovačov, ktorá sa tu zistila.

Veľmi dobrú charakteristiku spôsobu šírenia stopovacích látok poskytli prietokové fluorimetre GGUN-FL30 švajčiarskeho výrobcu. Zistená nepravá rýchlosť (stanovená podľa vzdušnej vzdialenosti miest aplikácie a indikovania) sa tu pohybovala od 1,9 do 1 443,2 m/deň (0,002 až 1,670 cm/s), čas tranzitu bol od 3,3 do 36,3 dňa s mediánovou hodnotou 13,6 dňa. Miesta indikovania stopovačov boli vzdialené od 25 do 4 806 m vzdušnou čiarou a maximálna indikovaná koncentrácia stopovacej látky sa v individuálnych prípadoch pohybovala od 0,24 do 127,71 ppb.

Najrýchlejšie a zároveň najintenzívnejšie šírenie stopovacej látky sa zistilo v prípade naftionátu sodného, ktorý bol aplikovaný na dne závrtu (A) západne od Krásnohorskej jaskyne. Tento stopovač už v priebehu 1,59 dňa dosiahol Marikino jazero (1), v dôsledku krátkodobého výpadku fluorimetra však bol indikovaný na celkovom výtoku z jaskyne. Na ďalších troch miestach prítokov v jaskyni sa však v rámci tohto prvého a najintenzívnejšieho signálu (166,0 ppb nad prameňom Buzgó; 5) už nezistil. Vzápätí sa v sile 107,73 ppb už po 3,33 dňoch od injektáže objavil naftionát vo vode prameňa Eveteš (6), po 7,59 dňoch opäť v prameni Buzgó (124,96 ppb) a po 12,11 dňoch bolo 7. 11. 2016 o 18.30 zaznamenané maximum druhého signálu aj v prameni Eveteš. Uvedené štyri prípady boli zároveň najintenzívnejším prejavom tohto stopovača, ktorý sa až následne po 13,28 dňoch objavil v pravostrannom prítoku v Abonyiho dóme (4) pri sile signálu 32,96 ppb a po 13,99 dňoch v ľavostrannom prítoku pod Veľkou sieňou (56,30 ppb). Vzhľadom na silu signálu a rýchlosť jeho prenosu je teda potrebné v oblasti medzi závrtom (A) a prameňom Eveteš predpokladať existenciu dvoch vzájomne oddelených, ale v oboch prípadoch veľmi aktívnych obehových ciest vo vadóznej zóne pod polohovo relevantným povrchom Silickej planiny. Nepravá rýchlosť prúdenia je tu 1 443,2 m/deň (1,67 cm/s) v prípade predpokladaného „rýchlostne aktívnejšieho kanála“ nenasýtenej zóny a 396,8 m/deň (0,46 cm/s) v prípade druhého „kanála“, pri ktorom zas možno predpokladať nižšiu mieru disperzie a prenos vyššej koncentrácie nielen stopovacích látok, ale aj kontaminantov. Obdobné cesty vo vadóznej zóne možno očakávať aj v smere do oblasti južne od Marikinho jazera (tu možno rátať s nepravou rýchlosťou 385,5 m/deň, čiže 0,45 cm/s a 80,8 m/deň, resp. 0,09 cm/s). Smerom k prítokom pod Veľkou sieňou (2)

a v Abonyiho dóme (4) sa potom zjavne dostáva samostatná vetva prúdenia od závrta (A), ktorá zároveň nezasahuje oblasť nad Marikiným jazierom, ale ani nad Sieňou obrov. Do týchto posledných sa potom dostala ešte tretia „naftionátová“ vlna s posunom 25,59 dňa v Marikinom jazere (1) a 23,39 dňa v prítoku v Sieni obrov (3). Kým signál zaznamenaný pod Sieňou obrov bol len slabučký (0,68 ppb), vo výtoku z Marikinho jazera to bolo až 61,82 ppb. Tento signál už nebol zachytený ani v prameni Eveteš, ani na inom mieste Krásnohorskej jaskyne, s výnimkou odtoku v prameni Buzgó (5). Vo vadóznej zóne medzi oblasťou južne od Marikinho jazera a závrtem (A) zjavne existuje ešte tretia diskretná cesta potenciálneho šírenia kontaminantu, tentoraz však s vyšším stupňom jeho disperzie (časový rozdiel medzi prvou indikáciou stopovača a jeho maximom tu bol najvyšší, až 14,55 dňa).

V prípade fluoresceínu aplikovaného v závrte (B) nachádzajúcom sa sv. od Marikinho jazera sa fluorimetrami zaznamenala len slabá prítomnosť stopovača, ktorá po 13,17 dňoch zasiahla pravostranný prítok v Abonyiho dóme (4) v sile signálu iba 0,24 ppb a po 36,29 dňoch a s intenzitou 0,68 ppb aj ľavostranný prítok pod Veľkou sieňou (2). Išlo teda len o bezprostredne najbližšie monitorovacie miesta od miesta aplikácie fluoresceínu, pretože na iných miestach podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne nebol tento stopovač detegovaný.

Z nízkych hodnôt zistenej koncentrácie, veľmi dlhého tranzitného času a malej rýchlosti tranzitu vyplýva, že horninové prostredie v oblasti pod závrtem (B) sv. od Marikinho jazera je v smere ku Krásnohorskej jaskyni buď slabo skrasovatené, alebo v dôsledku veľkého objemu vody akumulovanej v epikrasovej zóne poskytuje vcelku dobrú prirodzenú ochranu pred potenciálne prenikajúcim znečistením (obr. 13). Najrizikovejšou oblasťou z hľadiska potenciálneho ohrozenia podzemného hydrologického systému Krásnohorskej jaskyne je oblasť závrta (A). Z týchto miest možno na základe získaných výsledkov predpokladať rýchle šírenie potenciálnej kontaminácie, a to nielen do Krásnohorskej jaskyne, ale aj krasového prameňa Eveteš nad obcou Hrušov. Pre existenciu vzájomne oddelených krasových obehových ciest vo vadóznej zóne tu zároveň možno očakávať príchod znečistenia vo viacerých vlnách, s rôznou mierou jeho zriedenia v dôsledku jeho rôznej disperzie v horninovom prostredí.

PodĎakovanie

Výsledky uvedené v práci boli získané vďaka projektu LIFE+ 11 ENV SK 1023 *Zavedenie trvalo udržateľného využívania podzemnej vody v podzemnom krasovom systéme Krásnohorskej jaskyne* (akronym KRASCAVE), ktorý realizoval Štátny geologický ústav Dionýza Štúra (ŠGÚDŠ) ako koordinujúci projektový partner a OZ ENVI

Slovakia ako pridružený projektový partner s podporou finančného nástroja LIFE+ Európskej komisie a príspevku Ministerstva životného prostredia Slovenskej republiky. Spracovanie týchto výsledkov sa mohlo vykonávať ako súčasť projektu aplikovaného výskumu a vývoja s názvom *Výskum zraniteľnosti podzemných vôd pre manažment trvalo udržateľného využívania podzemných vôd v BSK s ITMS kódom projektu 26240220059*, ktorý v rokoch 2010 až 2014 riešil ŠGÚDŠ na základe podpory Agentúry Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu SR pre štrukturálne fondy EÚ (ASFEU, v súčasnosti Výskumná agentúra). Podporujeme výskumné aktivity na Slovensku. Projekt je spolufinancovaný zo zdrojov Európskej únie.

Literatúra

- BAJTOŠ, P., MALÍK, P., REPKOVÁ, R. & MÁŠA, B., 2017: Geochemické modelovanie tvorby chemického zloženia vody Krásnohorskej jaskyne v Slovenskom krase. *Miner. Slov.*, 49, 1, 73 – 94.
- ERDÖS, M., 1995: Jaskyne, priepasti a vyvieracky severnej časti Silickej planiny. *Slov. Kras*, 33, 115 – 127.
- FEAKOVÁ, R., GAVULIAKOVÁ, B., HAVIAROVÁ, D. & ŽENIŠOVÁ, Z., 2018: Izotopový výskum krasových vôd Silickej planiny. *Bratislava, Slovenská asociácia hydrogeológov*, ISBN 978-80-972651-2-0, 126 s.
- GAVULIAKOVÁ, B., 2016: Štúdium krasových vôd metódami izotopovej geológie. Dizertačná práca. *Manuskript. Bratislava, Univerzita Komenského v Bratislave*, 190 s.
- GAVULIAKOVÁ, B., FEAKOVÁ, R., ŽENIŠOVÁ, Z., HAVIAROVÁ, D. & GROLMUSOVÁ, Z., 2015: Chemické a izotopové zloženie vôd v systéme Krásnohorskej jaskyne. *Podzemná voda*, 21, 2, 118 – 136.
- GILLMANN, A., 2007: Etude du comportement des substances particulières et solubles dans le système karstique de la source de la Noiraigue. *Travail de diplôme. Université de Neuchâtel, Centre d'hydrogéologie*, 89 s.
- GREŇČIKOVÁ, A., BUČOVÁ, J., GAŽI, P., MITTER, P., MORAVANSKÝ, D., SZABÓ, S., SMOLEŇÁK, J., MAJERČÁK, J., GAŽÚR, J., LUKÁCS, M., COPLÁKOVÁ, J., SKLENÁROVÁ, D., OTRUBA, M., HEGLAS, D., HAJČÍK, J., ŠÁLI, J., ANDRISKOVÁ, O., VLČEK, M., FLIMMEL, J., KOMOŇ, J. & ZÁHOREC, P., 2018: Rýchlostná cesta R2 Rožňava – Jablonov nad Turňou. Záverečná správa, DPP Žilina. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 230 s.
- HAVIAROVÁ, D., 2008: Nové poznatky k hydrografii jaskyne Štefanová (Nízke Tatry, Demänovská dolina). *Aragonit*, 13, 2, 20 – 23.
- HAVIAROVÁ, D., 2014: Smery prúdenia ponorných autochtónnych vôd z bočných krasových doliniek na pravej strane Demänovskej doliny. *Aragonit*, 19, 1 – 2, 15 – 20.
- HAVIAROVÁ, D., 2016: Výsledky nových stopovacích skúšok na lokalite Priepadlá (Važecký kras). *Aragonit*, 21, 1 – 2, 22 – 28.
- HAVIAROVÁ, D. & PRISTAŠ, P., 2008: Najnovšie výsledky stopovacích skúšok z povodia Brestovskej jaskyne. *Slov. Kras*, 46, 1, 81 – 86.

- HAVIAROVÁ, D. & PRISTAŠ, P., 2010: Výsledky nových stopovacích skúšok ponorových jaskýň v Demänovskej doline vo vzťahu k Demänovskej jaskyni slobody. *Aragonit*, 15, 2, 76 – 82.
- HAVIAROVÁ, D. & PRISTAŠ, P., 2013: Riešenie otázky komunikácie povrchových vôd Studeného potoka s podzemným tokom v Brestovskej jaskyni. *Aragonit*, 18, 1, 17 – 21.
- HAVIAROVÁ, D. & PRISTAŠ, P., 2018: Stopovacie skúšky v okolí Ponickéj jaskyne (Zvolenská pahorkatina, Ponický kras). *Aragonit*, 13, 1 – 2, 3 – 8.
- HAVIAROVÁ, D., PRISTAŠ, P. & STANKOVIČ, J., 2009a: Nové poznatky o smeroch prúdenia krasových vôd Plešivskej planiny. *Aragonit*, 14, 1, 27 – 31.
- HAVIAROVÁ, D., TULIS, J. & PRISTAŠ, P., 2009b: Nové poznatky k odvodňovaniu jaskynného systému Stratenskej jaskyne. *Slov. Kras*, 47, 2, 217 – 230.
- KALLIES, R., KIESEL, B., SCHMIDT, M., KACZA, J., GHANEM, N., NARR, A., ZOPFI, J., WICK, L. Y., HACKERMÜLLER, J., HARMS, H. & CHATZINOTAS, A., 2017: Complete genome sequence of Pseudoalteromonas phage vB_PspS-H40/1 (formerly H40/1) that infects Pseudoalteromonas sp. strain H40 and is used as biological tracer in hydrological transport studies. *Stand Genomic Sci.*, 12, 20.
- KOVÁČOVÁ, E., MALÍK, P., ŠVASTA, J., BAHNOVÁ, N., PAŽICKÁ, A., BAJTOŠ, P. & GROLMOUSOVÁ, Z., 2017: Priestorové zmeny distribúcie mikroklimatických parametrov počas letného režimu prúdenia vzduchu v Krásnohorskej jaskyni. *Slov. Kras – Acta Carsol. Slov.*, 55, 1, 81 – 102.
- KRONOME, B. & BOOROVÁ, D., 2016: Geologická stavba Silickej planiny pri Krásnohorskej Dlhej Lúke. *Geol. Práce, Spr.*, 129, 55 – 78.
- MALÍK, P., GREGOR, M., ŠVASTA, J. & HAVIAROVÁ, D., 2011: Interpretácia meraní teploty a mernej elektrickej vodivosti v profile podzemného toku Krásnohorskej jaskyne. *Slov. Kras*, 49, 1, 41 – 56.
- MALÍK, P., GREGOR, M., BOTTLIK, F. & ŠVASTA, J., 2014a: Kvantitatívna charakteristika prirodzených výstupov podzemnej vody v oblasti Krásnohorskej Dlhej Lúky. In: *Fláková, R. & Ženíšová, Z. (red.): Zborník 17. slovenskej hydrogeologickej konferencie Nové výzvy v oblasti ochrany vôd, Piešťany, 14. – 17. 10. 2014. Bratislava, Slovenská asociácia hydrogeológov*, 65 – 68.
- MALÍK, P., GREGOR, M., ČERNÁK, R., BOTTLIK, F., ŠUTAROVÁ, B. & OTRUBA, M., 2014b: Stupeň skrasovatenia horninového prostredia severného okraja Silickej planiny na základe analýzy výtokových čiar. *Podzemná voda*, 20, 2, 128 – 141.
- MALÍK, P., BAHNOVÁ, N., BAJTOŠ, P., BOTTLIK, F., GREGOR, M., MICHALKO, J., ŠVASTA, J. & VASILENKOVÁ, A., 2018: Projekt LIFE+ KRASCAVE. Laická správa. Bratislava, Št. Geol. Úst. D. Štúra, ISB N 978-80-8174-033-6, 48 s.
- MALÍK, P., MICHALKO, J., PAŽICKÁ, A., MÁŠA, B. & STANKOVIČ, J., 2019: Detailed water quality monitoring at various points of the Krásnohorská Cave system (Slovakia). Chapter 23. In: *Bertrand, C., Denimal, S., Steinmann, M. & Renard, P. (eds.): EuroKarst 2018, Besançon: Advances in Karst Science. Springer, Cham, Switzerland*, 199 – 212. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-14015-1_23.
- MELLO, J. (red.), ELEČKO, M., PRISTAŠ, J., REICHWALDER, P., SNOPOKO, L., VASS, D., VOZÁROVÁ, A., GAÁL, L., HANZEL, V., HÓK, J., KOVÁČ, P., SLAVKAY, M. & STEINER, A., 1996: Geologická mapa Slovenského krasu 1 : 50 000. Bratislava, Ministerstvo život. prostr. Slovak. rep., GS SR.
- MELLO, J. (red.), ELEČKO, M., PRISTAŠ, J., REICHWALDER, P., SNOPOKO, L., VASS, D., VOZÁROVÁ, A., GAÁL, L., HANZEL, V., HÓK, J., KOVÁČ, P., SLAVKAY, M. & STEINER, A., 1997: Výsvetlivky ku geologickej mape Slovenského krasu 1 : 50 000. Bratislava, GS SR, Vyd. D. Štúra, 255 s.
- ORVAN, J. & VRÁBIOVÁ, M., 1986: Rožňava – Horný vrch, predbežný hydrogeologický prieskum. *Manuskript. Bratislava, Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 69 s.
- PRISTAŠ, P., 2017: Záverečná správa o výsledku analýzy výskytu bakteriofága H40/1 vo vzorkách vody počas stopovacej skúšky v priestore Krásnohorskej jaskyne. Záverečná správa. *Manuskript. Bratislava, archív Št. Geol. Úst. D. Štúra*, 11 s.
- PRONK, M., GOLDSCHIEDER, N. & ZOPFI, J., 2006a: Dynamics and interaction of organic carbon, turbidity and bacteria in a karst aquifer system. *Hydrogeol. J.*, 14, 473 – 484.
- PRONK, M., GOLDSCHIEDER, N. & ZOPFI, J., 2006b: Monitoring of organic carbon, natural particles and bacteria in a deep karst system, Yverdon-les-Bains, Switzerland. Proc. 8th Conference on Limestone Hydrogeology, Neuchâtel (Switzerland) 21 – 23 sep. 2006. *Presses universitaires de Franche-Comté, Besançon, France*, 215 – 219.
- RODA, Š., 1964: Jaskyňa Buzgó. *Krásy Slovenska*, 41, 10, Bratislava, 382 – 386.
- RODA, Š., 1966: Je najvyšší na svete? *Krásy Slovenska*, 43, 7, 258 – 259.
- RODA, Š., 1967: Výskum občasného toku „Studňa Rákoť“ na Silickej planine farbením fluoresceínom. *Zbor. Východoslov. Múz. (Košice), Sér. A, VIII*, 69 – 71.
- RODA, Š., RODA, Š., ML. & ŠČUKA, J., 1986: Aplikácia fraktálnej analýzy na interpretáciu stopovacích skúšok. *Slov. Kras*, 24, 61 – 75.
- SKŘIVÁNEK, F., 1965: Objev jeskyně Buzgó v Jihoslovenském krasu. *Čs. Kras*, 16, 139 s.
- STANKOVIČ, J. & HORVÁTH, P., 2004: Jaskyne Slovenského krasu v živote Viliama Rozložníka. *Rožňava, Speleoklub MINOTAURUS*, 193 s.
- STANKOVIČ, J., CÍLEK, V. (red.), BRUTHANS, J., CÍLEK, V., GAÁL, L., KOVÁCS, Á., ROZLOŽNÍK, M., STANKOVIČ, J., SCHMELZOVÁ, R., ZEMAN, O., KOVÁČ, L., MOCK, A., EUPTÁČIK, P., HUDEC, I., NOVÁKOVÁ, A., KOŠEL, V. & FENĎA, P., 2005: Krásnohorská jaskyňa Buzgó. *Rožňava, Speleoklub Minotaurus, Region. rozvoj. Agentúra*, 150 s.
- SZABÓ, S., COPLÁKOVÁ, J., SOTÁK, J., MAJERČÁK, J., OTRUBA, M., MORAVANSKÝ, D., MITTER, P., GAŽI, P., BUČOVÁ, J., GREŇČIKOVÁ, A. & MALÍK, P., 2018: Engineering-geological, geotechnical and hydrogeological parameters of the Soroška tunnel rock sequences. *Miner. Slov.*, 50, 2, 101 – 124.
- ZWAHLEN, F. (ed.), 2004: Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. COST Action 620 Final Report. Luxembourg, Office Offic. Publ. Europ. Commun., XVIII, 297 s.

Survey of protective function of the aeration zone above the Krásnohorská jaskyňa Cave (Silická planina Plateau) using tracing tests

Four tracing tests verifying the pollution sensitivity of water circulation inside the underground hydrological system of the Krásnohorská jaskyňa Cave were performed in the area of the eastern part of the Silická planina Plateau in 2016/2017 (October 2016 – April 2017). Dye tracers of sulphorhodamine B, fluorescein and sodium naphthionate were injected into the pits manually dug in the bottoms of sinkholes / dolines / surface karst depression on the 26th October 2016. The aim of this testing was the verification of the natural protection function of the vadose zone above the cave system. Taking into account the vertical distance of the underground stream in the cave (310 – 315 m a.s.l.) and the levels of the sinkholes' bottoms in the area (500 – 550 m a.s.l.), the thickness of the vadose zone was between 185 and 240 m. Sodium naphthionate was applied in the (A) sinkhole located west of the vertical projection of the Marikino jazero Lake to the Plateau surface, sulphorhodamine B was used in the (B) sinkhole SE of the Marikino jazero Lake and fluorescein was injected into the (C) sinkhole eastwards of the Marikino jazero Lake surface projection. Suspension of H40/1 bacteriophages was applied only 19 days later (on 14th November 2016) into the (D) sinkhole eastwards of the Marikino jazero Lake, due to its slow preparation process and relatively small abundance of bacteriophages in the prepared suspension (2×10^8 per 1 mm³ of suspension). After the injection of these tracers, water monitoring was carried out at 11 observation points for about five months. GGUN-FL30 flow-through filed fluorimeters were used in six cases, indication capsules with activated carbon sorbent were used at the remaining monitoring sites. Samples for bacteriophages H40/1 detection were taken at the same locations and subsequently delivered to the Slovak Academy of Sciences Institute of Animal Physiology in Košice, where they were processed within 24 hours after delivery.

Tracer detection was carried out at 5 sites inside the underground hydrological system of the Krásnohorská jaskyňa Cave: 1 – water outlet from the Marikino jazero Lake under the Sifón potápačov (Diver's Siphon); 2 – seepage from the Sieň obrov; 3 – left-hand tributary under the Veľká sieň Hall, from the Heliktitový dóm Dome, 4 – right-hand tributary in the Abonyiho dóm Dome; 5 – total water outflow from the Krásnohorská jaskyňa Cave in the Buzgó karst spring. GGUN-FL30 field flow-through fluorimeters were installed here. This device was also installed in the karstic spring of Eveteš above the Hrušov municipality, exploited as drinking water source. Capsules with sorption material (activated carbon) were installed on other springs and exchanged at regular intervals. Five smaller

karstic springs were monitored in this way: Pri kaplnke, Pod kameňolomom, Pri mlyne (all three springs located in the Krásnohorská Dlhá Lúka municipality), Hradná vyvieračka (Brzotín) and Mezeš spring (Hrušov). The last one is also used as drinking water supply for the village of Hrušov.

In the whole period of tracing experiment, no response of the sulforhodamine B dye tracer, applied in the (C) sinkhole, was observed. Also, the presence of bacteriophages H40/1 applied to the (D) sinkhole was not recorded in either of the 223 samples. Both sinkholes are located south, respectively southeast of the Krásnohorská jaskyňa Cave. Therefore we can assume that in these places the surface of the Silická Planina Plateau provides relatively good natural protection against potential pollution for the Krásnohorská jaskyňa Cave and its underground hydrological system.

The results obtained from activated carbon (charcoal) after processing the sorption fillings of indicator capsules showed the presence of two tracers at different monitored sites at very low intensities. Sodium naphthionate, applied in the sinkhole (A) appeared in the waters of the Pod kameňolomom spring (site marking: 8) as well as in the waters of Mezeš spring (10). Fluorescein applied to the (B) sinkhole was detected in two sorption cartridges in the Hradná vyvieračka spring (11) near Brzotín. The tracers were totally absent in analyses of charcoal taken at Pri kaplnke (7) and Pri Mlyne springs (9). However, the results obtained by activated carbon analyses should rather be considered as indicative of possible interconnections as the signal intensity was mostly very low.

The most reliable results were achieved by continuously measuring flow-through fluorimeters GGUN-FL30 records. The detected apparent velocities (determined by the air distance of the application and indication sites) ranged from 1.9 to 1443.2 m/day (0.002 to 1.670 cm/s), the recorded transit time was from 3.3 to 36.3 days, with median value of 13.6 days. The tracer indication sites were at a direct distance range of 25 to 4,806 m. The maximal indicated tracer concentration in the individual breakthrough curves was ranging from 0.24 ppb to 127.71 ppb (median: 44.63 ppb).

The fastest and most intensive tracer spreading was found for sodium naphthionate, which was applied at the bottom of sink (A). This dye tracer has already reached Marikino jazero Lake (marked as 1) in 1.59 days. Due to a short-term, ten days lasting failure of the fluorimeter at site 1, this peak has been indicated on the total cave discharge (5 – Buzgó monitoring site). As this first strong

(166.0 ppb at Buzgó site, No. 5) and quick peak was not detected in the other three tributary sites in the cave, it has to be directly linked to the main karst water stream appearing at 1 – Marikino jazero Lake monitoring site. However, after 3.33 days of injection, naphthionate appeared in waters of 6 – Eveteš spring, in the peak concentration of 107.73 ppb. After 7.59 days the second naphthionate peak appeared again in 5 – Buzgó spring (124.96 ppb) and after 12.11 days (on November 7, 2016 at 6:30 pm) the second naphthionate peak with higher (121.71 ppb) intensity arrived to the spring of Eveteš (6). These four cases were also the most intense manifestation of the naphthionate dye tracer, which, after 13.28 days, appeared also in the right-hand tributary of the Abonyiho dóm Dome (4) at a peak concentration of 32.96 ppb and after 13.99 days in the left-hand tributary below the Veľká sieň Hall (56.30 ppb). Thus, taking into account the peak concentration and its transmission rate, it is necessary to assume that in the area between the sinkhole (A) and the Eveteš spring the existence of two mutually separated but very active water circulation pathways present in the vadose zone below the relevant surface of the Silická planina Plateau. The apparent flow velocity in this case is 1443.2 m/day (1.67 cm/s) for the anticipated “faster active conduit” of the unsaturated zone and 396.8 m/day (0.46 cm/s) for the second conduit. In the second case, lower dispersion rates and higher concentrations can be expected even in the case of potential contaminants, not just dye tracers.

Similar underground pathways in the vadose zone can also be expected in the area south of Marikino jazero Lake (site 1; fictive velocities of 385.5 m/day or 0.45 cm/s and 80.8 m/day or 0.09 cm/s can be envisaged in two independent unsaturated channels). Towards the tributaries below the Veľká sieň Hall (2) and in the Abonyiho dóm Dome (4), a third separate flow branch from the sinkhole (A) can be expected, which at the same time does not interfere with the area above (south from) the Marikino jazero Lake (1), or over the Sieň obrov site (3). The “third naphthionate” peak wave with a shift of then reached the site 1 of Marikino jazero Lake with time shift of 25.59 days and the Sieň obrov (3) within 23.39 days. While the peak recorded under the Sieň obrov (3) was only weak (0.68 ppb), it

was up to 61.82 ppb in the outlet from the Marikino jazero Lake (1), and this peak was no longer recorded either in the Eveteš spring (6) or elsewhere in the Krásnohorská jaskyňa Cave except for the outlet of the whole hydrologic system in the Buzgó spring (6). Obviously, in the vadose zone between the area south of the Marikino jazero Lake and the sinkhole (A) a third discrete path for potential contaminant propagation exists, but with substantially higher degree of its dispersion (the time difference between the first tracer indication and its maximum was 14.55 days).

Only a weak response was detected by two fluorimeters for fluorescein dye tracer applied in the (B) sinkhole. Fluorescein peak of maximal 0.24 ppb concentration after 13.17 days reached the right-hand tributary in the Abonyiho dóm Dome (4), and only after 36.29 days, with an intensity of maximal peak concentration only 0.68 ppb, a left-hand tributary below the Veľká sieň Hall (2). These sites represent the closest monitoring points to the (B) application site, and fluorescein was not detected at other places in the whole underground hydrological system of the Krásnohorská jaskyňa Cave.

Rock environment in the area around the (B) sinkhole northeast of Marikino jazero Lake provides good natural protection against potential pollution propagation (Figure 13), as indicated by low levels of detected concentrations, very long transit times and low apparent velocities of transit. The sinkhole (A) area, on the other hand represents the most risky area in terms of potential threats to the Krásnohorská jaskyňa Cave underground hydrological system. Rapid spreading of potential contamination can be expected from these sites, not only towards the Krásnohorská jaskyňa Cave, but also to the Eveteš karst spring (6; Hrušov municipality). Pollution arrival in several waves, in various degrees of dilution due to its different dispersion in the rock environment can be expected here due to the existence of distinct karst circulation pathways in the vadose zone.

Doručené / Received:	15. 4. 2019
Prijaté na publikovanie / Accepted:	4. 6. 2019