

GEOLOGIE, KRAS, HYDROGEOLOGIE / GEOLOGY, KARST, HYDROGEOLOGY

Voda z ponoru Bubovického potoka v hloubce rychle podtéká klastickou výplň holyňsko-hostimské synklinály do pramenů v údolí Loděnice**Water from the ponor of the Bubovice Stream rapidly flows in depth beneath clastic fill of the Holyně-Hostim Syncline, feeding springs in the Loděnice Stream Valley**Jiří Bruthans^{1,3}, Jakub Mareš¹, Ondřej Jäger^{2,3}, Tomáš Herza¹**Abstract**

The few positive results of tracer tests in the Bohemian Karst were achieved within a small area between the Arnika Ponor and Svatý Jan pod Skalou Spring. In the rest of the area, flow directions and velocities are generally unknown. In 2021, five tracer tests with fluorescein dye were performed mostly at high water levels from the uppermost sinks of the Bubovice Stream. The tracer was repeatedly detected in two large springs in the Loděnice Stream Valley: the V nivě Spring and the Svatý Jan pod Skalou Spring. The first arrival was after 27–38 hours to the former and after 50 hours to the latter. This means a surprisingly fast flow, as water needs to flow beneath a thick impervious clastic fill of the Holyně-Hostim Syncline, about 2 km in direct horizontal distance. The tracer test demonstrated a fast flow velocity and relatively small diameters of karst conduits which probably exceed 400 m below ground surface and 200 m below the water table. The tracer test confirmed the assumption that water from the upper reach of the Bubovice Stream, which has a negative budget, is drained away from the Bubovice catchment. This, together with the increased amount of sinking water at recent time, explains the unusually low amounts of water in the downstream part of the catchment in the last few years. The recovery of the tracer was only 10–20 %, the rest flows either to hidden springs in the major Berounka River or was more likely captured in the alluvium through which the sinking water passes to limestones and was subsequently diluted below the detection limit. Tracer tests should be performed at other sinks to better understand hydrogeology of the Bohemian Karst.

1. Úvod

Český kras je stejně jako Moravský kras budován paleozoickými vápenci. Tím však podobnost prakticky končí. Charakterem jeskynních systémů i hydrologicky se od Moravského krasu výrazně liší. Nenajdeme tu žádná poloslepá údolí, žádné otevřené hltače na trvalých vodních tocích, je tu jen minimum závrtů a žádné podzemní toky nesoucí hrubší sediment (BRUTHANS a ZEMAN 2003). Zatímco v Moravském krasu známe díky speleologickému průzkumu a stopovacím zkouškám velmi dobře směry proudění podzemní vody na většině jeho území (např. mapy jeskyní a směrů ze stopovacích zkoušek in MUSIL et al. 1993), v Českém krasu bylo proudění podzemní vody pouze odhadováno z vydatnosti pramenů a jejich pozice v rámci synklinál a antiklinál ohraničených nekarbonátovými horninami (BRUTHANS a ZEMAN 2000). Přes různé často nepublikované

pokusy se v Českém krasu podařilo prokázat stopovacími zkouškami proudění pouze mezi občasným ponorem navázaným na jeskyni Arnika a pramenem ve Svatém Janu pod Skalou: jeho větve Ivanka, Ivan a vývěr v kotelně kláštera (ŽÁK et al. 1996, 2013; BRUTHANS, MAREŠ a KARATAS 2020). Výsledky stopovací zkoušky z Palachovy propasti (propastovitá jeskyně Čerinka) s využitím radioizotopu ⁵¹Cr z 22. října 1977 byly považovány za důkaz průniku vody do pramene ve Svatém Janu pod Skalou (VČÍSLOVÁ 1980). Vzhledem k nereálně nízkému poměru doby trvání signálu stopovače v prameni ku době transportu stopovače (jediný vzorek 11 dní po injektáži), a též objevení stopovače v pouze jediné větvi tohoto pramene, však nelze výsledky zkoušky považovat za reálné (obr. 1; ŽÁK et al. 1996). Znalost směrů a rychlostí proudění podzemní vody je důležitá např. pro určení transportu případných kontaminantů, ochranu vodních zdrojů nebo ekosystémů vázaných na vodu.

Hydrogeologie zájmové oblasti je komplikovaná a k jejímu pochopení je třeba kombinovat geologické mapy s řezy (obr. 2 a 3). Krasový kolektor je tvořen především vápenci lochkovu a pragu, místy zasahuje i do zlíčovu a přídolí (BRUTHANS a ZEMAN 2000). Tento kolektor je přerušen výchozy silurských hornin kopaninského

¹Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, 128 00, Praha 2;

bruthans@natur.cuni.cz

²AQH s. r. o., Socháňova 3, 163 00 Praha 6³ZO ČSS 1-05 Geospeleos

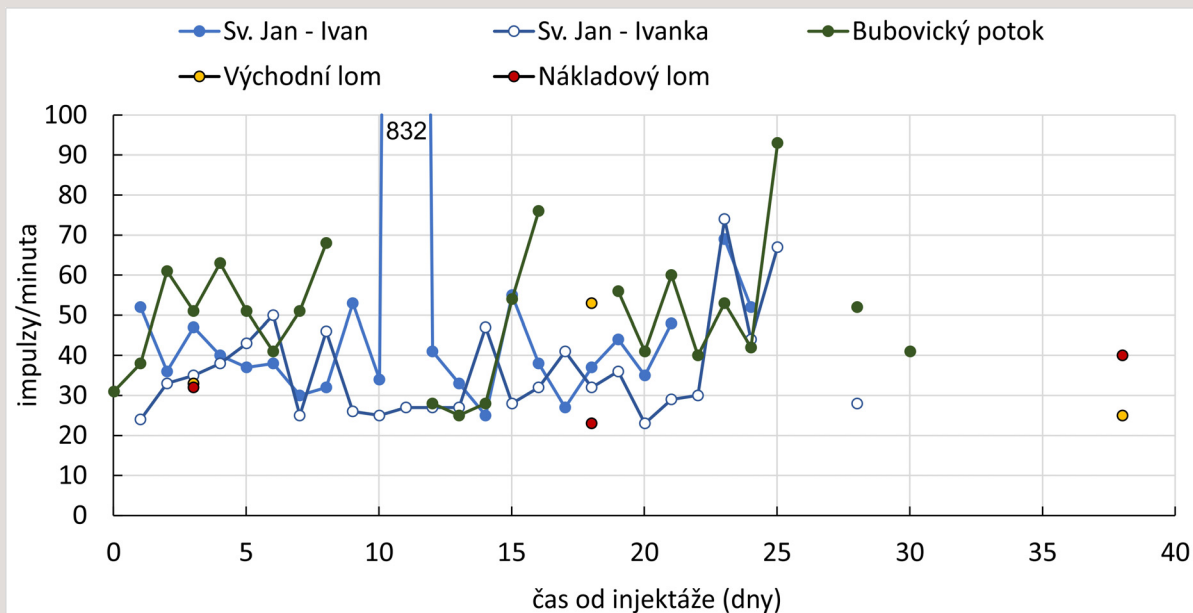
Poděkování: Poděkování patří všem, kteří umožnili stopovací zkoušku na Bubovickém potoce nebo k ní přispěli. Za pomoc s přípravou a povolením zkoušky vděčíme RNDr. P. Malíkovi CSc., RNDr. K. Žákovi CSc., RNDr. F. Pojerovi a kolegům ze Správy CHKO Český kras, J. Gregovské z Krajské hygienické stanice Středočeského kraje; Ing. P. Paškové z VAK Beroun. Za pomoc s odběrem vzorků a dalšími pracemi pak F. Vycpálkovi, M. Kolčavovi, Z. Menglerovi, J. Dragounovi, M. Šedivému, A. Buchtové, E. Šedivé, A. Ševčíkové, I. Pierce, E. Janouškovi, p. Červenkovi a dalším. Mgr. J. Kukačkoví a ing. I. Zárubovi jsme hluboce vděční za dárné zkonstruování automatického odběrového zařízení pro hydrogeologii na Univerzitě Karlově, které má již v náročných terénních podmínkách odslouženo několik let souhrnného provozu, a přece se točí. Děkujeme recenzentkám RNDr. R. Kadlecové a Mgr. D. Haviarové Ph.D., a též prof. P. Bosákovi, RNDr. K. Žákovi CSc. a RNDr. V. Lysenkovi za cenné kritické připomínky k rukopisu.

Český kras (Beroun), 48 (2022), 5–17, 2 tab., 11 obr.

© Muzeum Českého krasu, p. o., Beroun

ISSN 1211-1643

ISBN 978-80-87708-18-7



Obr. 1. Záznam radioaktivity ve vzorcích vody po injektáži radioizotopu ^{51}Cr do Palachovy propasti (VČÍSLOVÁ 1980). Nad úroveň pozadí byl zaznamenán jediný vzorek z 11. dne po injektáži, a to jen z jedné ze dvou pramenných větví pramene ve Svatém Janu pod Skalou.

Fig. 1. Radioactivity record in water samples after injection of radioisotope ^{51}Cr to the Palach Chasm (VČÍSLOVÁ 1980). Only a single sample exceeded the background 11 days after the injection and only in one of the two branches of the Svatý Jan pod Skalou Spring.

a nižších souvrství. Na mnoha místech je překryt nadložním poloizolátorem třebotovského a chotečského souvrství a izolátorem srbských břidlic, zavrásněných do hloubek i několik set metrů. Podzemní voda je tak při proudění napříč synklinálou nucena izolátor a poloizolátor podtékat a sestupovat do značných hloubek, což se projevuje na zvýšené teplotě podzemní vody vyvěrající v některých pramenech.

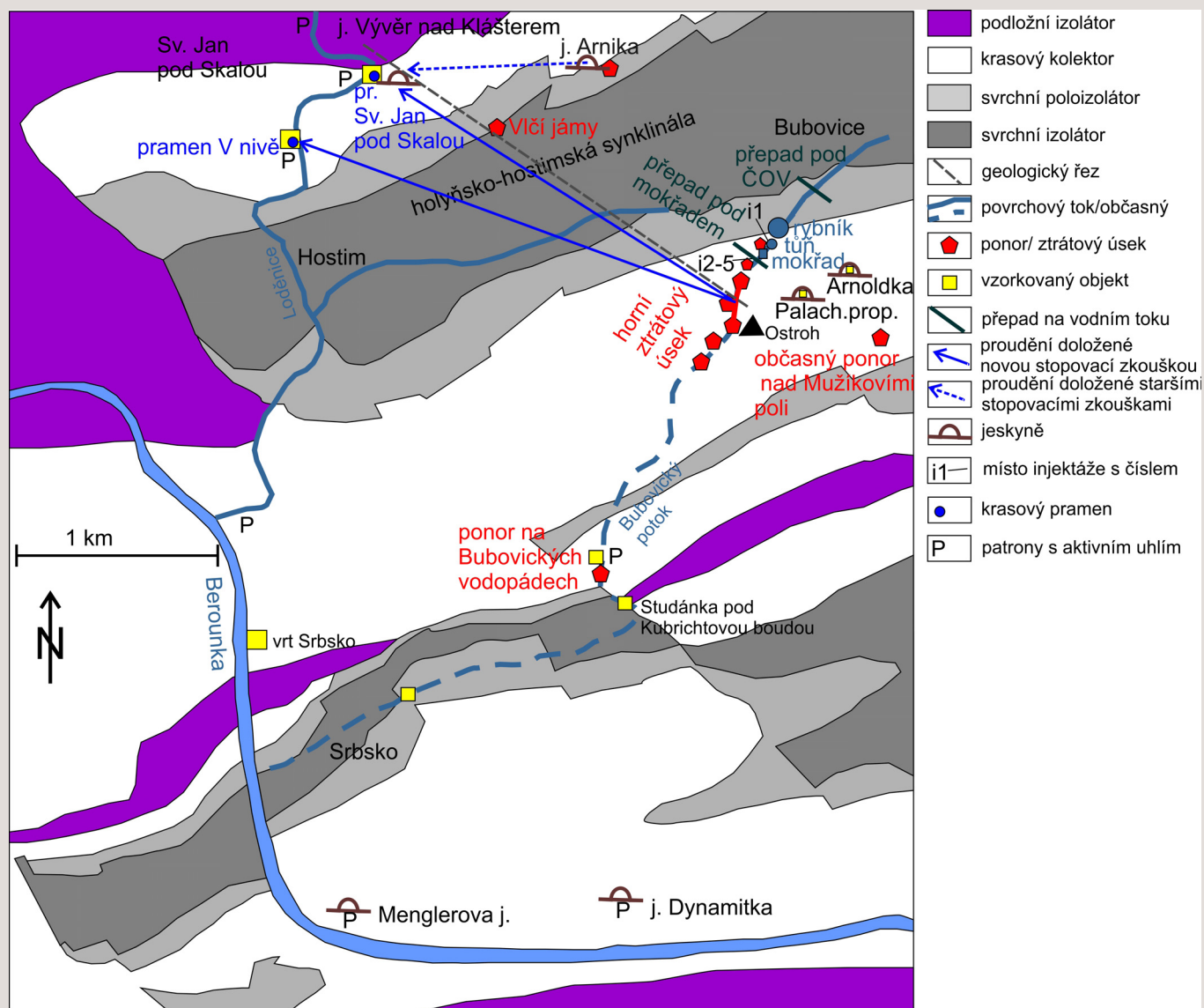
V průběhu zimy 2020/2021 se z měření průtoků na profilech na Bubovickém potoce ukázalo, že dochází k ztrátám i přes 10 l/s potoční vody v tzv. horním ztrátovém úseku Bubovického potoka pod Bubovicemi (obr. 2; HERZA 2021). Takto intenzivní ztráty vody na vzdálenosti pouhých několika stovek metrů jsou v Českém krasu výjimečné, pokud ne jediné. Ještě v devadesátých letech 20. století se v tomto úseku Bubovického potoka ztrácelo výrazně nižší množství vody (BRUTHANS 1999). Došlo tedy k rozhodnutí zorganizovat stopovací zkoušku, která by ověřila, kam voda z horního ztrátového úseku Bubovického potoka odtéká.

Znalost podzemních cest odtoku je důležitá z více důvodů. Bubovický potok v posledních několika letech v suchších obdobích nebývá výrazně ztrácí vodnost i ve střední části toku (např. na podzim 2020 zcela vyschly Bubovické vodopády; HERZA 2021). Je proto důležité vědět, zda se Bubovický potok mizí pod povrch v horním ztrátovém úseku objevuje níže v povodí, nebo míří do jiného povodí. Převážnou část vody Bubovického potoka tvoří voda ze zastavěného prostoru obce Bubovice a odtok vody z čistírny odpadních vod (dále ČOV). Podílí se také vody z okolní zemědělské krajiny. Půdní částice, transportované ze zemědělských pozemků, a na ně vázané chemické látky zde způsobují zhoršování kvality povrchových vod (VOŽENÍLEK et al. 1999). V případě jejich znečištění je proto důležité vědět, do jakých pramenů a případně vodních zdrojů voda proudí. Díky intenzivním ztrátám vody do podzemí jde o jedno z mála míst Českého krasu, kde lze provést potenciálně úspěšnou stopovací zkoušku a určit tak parametry proudění (směry proudění vůči geologickým strukturám; rychlosti proudění, objem proudových cest, disperzitivitu prostředí apod.).

2. Metodika

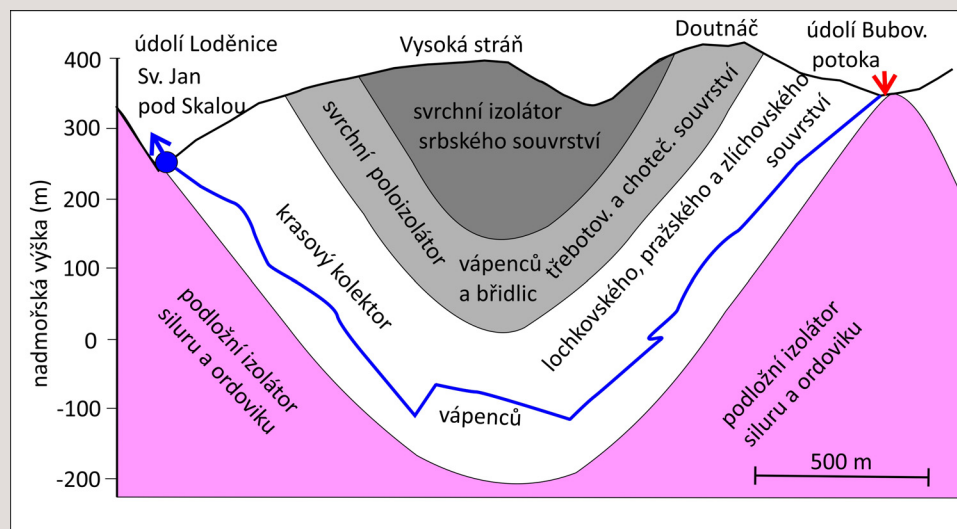
Místa vzorkování jsou zobrazena v obr. 2. Jímacím objektem pro vodovod obce Srbsko je vrt SDB14A hluboký 50 m, vyhloubený do kotýských vápenců severně od Srbska v rámci hydrogeologického průzkumu (VČÍSLOVÁ 1980). Původní slabý přítok byl výrazně zvýšen po aktivaci vrtu odstřelem na 4,7 l/s při snížení hladiny 13,9 m. Na odtokovém potrubí vrtu bylo instalováno samočinné odběrové zařízení (obr. 4a). Pramen Svatý Jan pod Skalou a jeho větve Ivan a Ivanka (obr. 4 b, d) popisují ŽÁK et al. (2001). Pramen V nivě, jehož voda z velké většiny skrytě vtéká do Loděnice (obr. 4c) je popsán v seznamu pramenů KADLECOVÉ a ŽÁKA (1998). Pramen byl lokalizován při termometrii a přírodní cesta pramene byla lokalizována pomocí metod nabitého tělesa a spontánní polarizace jako linie SSV-JJZ stáječící se do směru S-J (VČÍSLOVÁ 1980). Geofyzikálními metodami byl ale prozkoumán jen pravý břeh Loděnice. Vzorkovaná místa na Bubovickém potoce (Bubovické vodopády, studánka pod Kubrychtovou boudou, potok nad obcí Srbsko), stejně jako ponory Bubovického potoka, kde probíhaly injektáže (obr. 4e, f) detailně popsal HERZA (2021). Občasně vzorkovaná jeskynní jezera v jeskyni Arnoldka a v Palachově propasti (jeskyně Čefinka) popisuje KOLČA-VA (2013).

Bylo zřejmé, že pro úspěšnou stopovací zkoušku bude třeba použít stopovač detekovatelný i v obrovském zředění. Na rozdíl od stopovacích zkoušek provedených z ponoru Arnika nebo z jeskyně Vývěr nad Klášterem (ŽÁK et al. 1996; BRUTHANS, MAREŠ a KARATAS 2020), kde byl použit chlorid sodný (NaCl), bylo při této nové stopovací zkoušce nutné použít sodnou sůl fluoresceinu (dále fluorescein), který je v čisté vodě detekovatelný i ve velmi nízkých koncentracích 0,1 µg/l. Použití fluoresceinu na rozdíl od NaCl však nemá v České republice (ČR) ve vodních zdrojích na rozdíl od západních zemí tradici a provozovatel jímacího vrtu pro Srbsko (Vodovody a kanalizace – VAK Beroun) tak podmínil možnost použití fluoresceinu při stopovací zkoušce souhlasem krajské hygienické stanice (dále KHS) a tato dobrozdáním Státního zdravotního ústavu.



Obr. 2. Hydrogeologická mapa zájmové oblasti, ponory, vzorkovaná místa a směry proudění zjištěné ze stopovacích zkoušek. Červená čára ukazuje úsek nejintenzivnějších ztrát vody Bubovického potoka. Mapa sestavena na základě geologických map 1:25 000 (KOVANDA et al. 1984; HAVLÍČEK et al. 1987–1993).

Fig. 2. Hydrogeological map of the study area, sinks, sampling sites and flow directions determined by tracer tests. The red line indicates the reach of the Bubovice Stream with most intense sinking of water. The map is based on geological maps 1:25,000 (KOVANDA et al. 1984; HAVLÍČEK et al. 1987–1993).



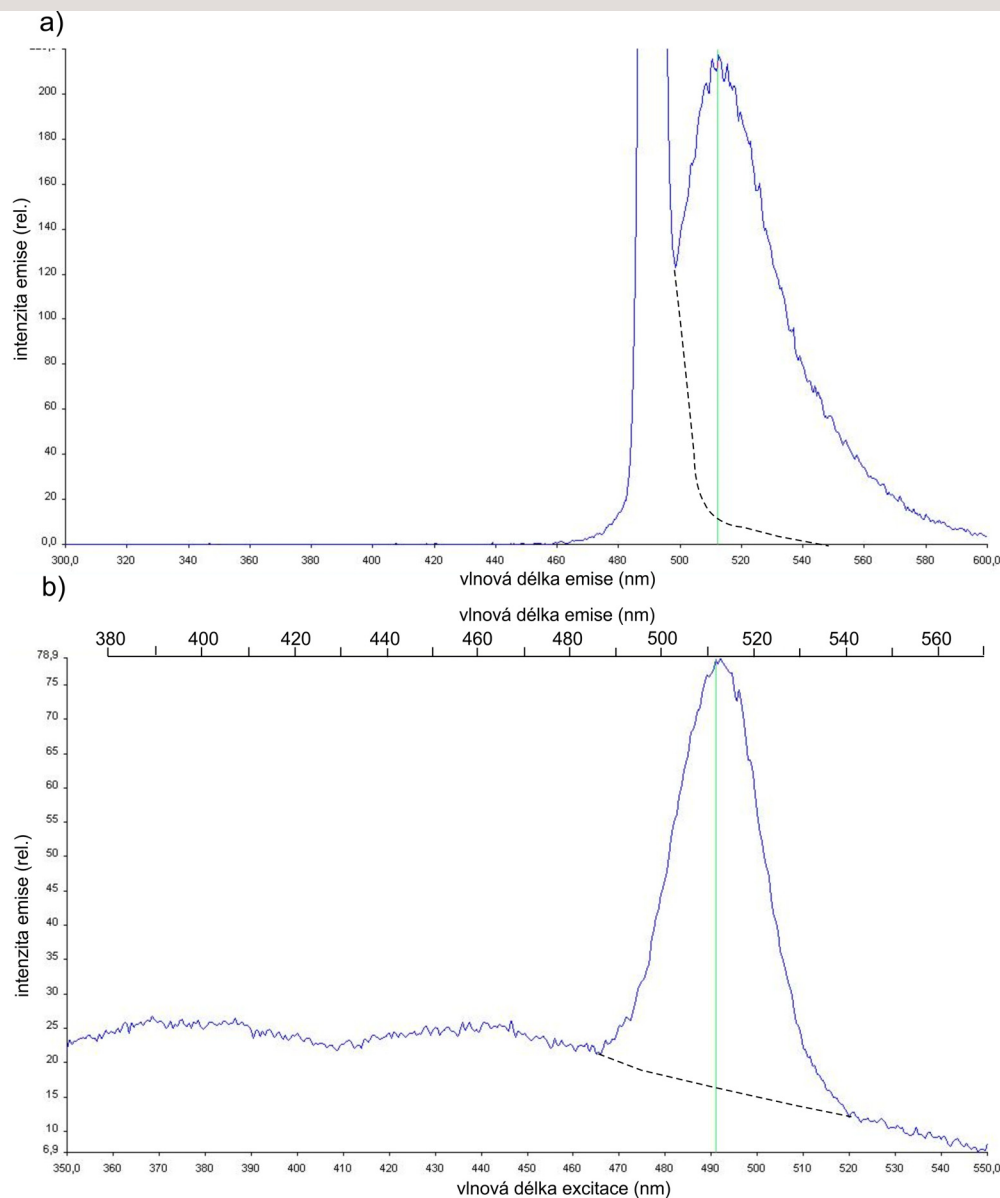
Obr. 3. Schématický hydrogeologický řez mezi Svatým Janem pod Skalou a údolím Bubovického potoka v místě ponorů (průběh řezu viz obr. 2.). Sestaveno na základě geologických map 1:25 000 (KOVANDA et al. 1984; HAVLÍČEK et al. 1987–1993). Dvakrát převýšeno. Modrá linie ukazuje stopovací zkouškou doložené proudění z ponorů do údolí Loděnice.

Fig. 3. A schematic hydrogeological cross-section between Svatý Jan pod Skalou and the Bubovice Stream at the place of the sinks (course of the cross-section is indicated in Fig. 2). Based on geological maps 1:25,000 (KOVANDA et al. 1984; HAVLÍČEK et al. 1987–1993). Vertical scale is 2 times the horizontal scale. The flow from the sinks to the Loděnice Stream Valley suggested by the tracer test is marked by a blue line.



Obr. 4. Vzorkovaná místa a ztrátový úsek Bubovického potoka. a – Automatický vzorkovač ve vodárně v Srbsku; b – pramen Svatý Jan pod Skalou, vlevo větev Ivan, vpravo větev Ivanka; c – zachycená část pramene V nivě a její přetok do Loděnice; d – zakalený pramen Svatý Jan pod Skalou 3 hodiny před kulminací 2. května 2021 v 21:30; e – fluorescein z první injekce rozptýlující se v jezeře mokřadu; f – fluorescein z páté injekce v úseku s největší intenzitou ztrát.

Fig. 4. Sampling sites and the negative-budget reach of the Bubovický Stream. a – Automated sampler at the waterworks at Srbsko; b – Svatý Jan pod Skalou Spring, spring branch Ivan on the left, branch Ivanka on the right; c – Captured part of the V nivě Spring and its outflow to the Loděnice Stream; d – Turbid water of the Svatý Jan pod Skalou Spring 3 hours before reaching the maximum discharge (May 2, 2021, 21:30; e – Fluorescein dye from the first injection in Mokřad Lake; f – Fluorescein dye from the fifth injection in the stream reach with the most intensive loss of water.



Obr. 5. a – Emisní spektrum při klasickém stanovení fluoresceinu. Je patrné maximum na excitační vlnové délce 491 nm (modré světlo) a vrchol na emisní vlnové délce 512 nm značící vyzářené zelené světlo díky přítomnosti fluoresceinu (pramen V nivě dne 22. května 2021 v 21:00); b – Metoda synchroscan. Přítomnost fluoresceinu se projevuje vrcholem na 491 nm (excitační osa), resp. 512 nm (emisní osa) (Ivanka dne 2. července 2021 v 12:00). Zelená čára ukazuje vlnovou délku typickou pro fluorescein. Přerušovaná čára ukazuje, jak by vypadal průběh bez fluoresceinu (pozadové hodnoty).

Fig. 5. a – Emission spectra for the usual method of fluorescein dye determination. A peak at excitation wavelength of 491 nm (blue light) and a peak at emission wavelength of 512 nm typical for fluorescein are clearly visible (V nivě Spring, May 22, 2021, 21:00); b – The synchroscan method. Fluorescein shows a peak at 491 nm (excitation axis) which correspond to 512 nm (emission axis), Ivanka Spring, July 2, 2021 at 12:00. The green line shows a wavelength typical for fluorescein. The dashed line shows the hypothetical course based on fluorescein-negative samples.

Fluorescein je látka s výrazně nižším dopadem na životní prostředí než NaCl. Zatímco NaCl lze obvykle detekovat od koncentrací jednotek mg/l, fluorescein lze detekovat v běžných krasových vodách v ČR v koncentracích prvních jednotek a mnohdy i desetin $\mu\text{g/l}$, tedy v 3–4 řády nižších koncentracích. Kilogramem fluoresceinu je tak možné označit až 1 000 000 m^3 vody. K dosažení stejného efektu by bylo nutné použít 5 000 kg NaCl. Příčinou nízkého detekčního limitu fluoresceinu je jeho schopnost fluorescence: na budící modré záření reaguje emisí zeleného světla, jehož i nepatrnou intenzitu lze detekovat přístroji. O několik řádů vyšší koncentrace lze ve tmě a za použití modré led diody rozeznat i pouhým okem. Fluorescein je využíván i v lékařství a jeho zdravotní nezávadnost je dobře ověřena. Navíc při chloraci a ozonizaci je ze surové vody odstraněn při koncentracích přes 100 $\mu\text{g/l}$ (Käss et al. 1998).

Aby koncentrace fluoresceinu v jímácím objektu zbytečně nepřesahovala řádově pozadí (při měření fluoresceinu je pozadí, tj. limit detekce, závislý na zakalení vody; při vyšším zákalu může být limit detekce i v řádově vyšších koncentracích, může se proto měnit i v čase na stejném objektu), bylo rozhodnuto provést stopovací zkoušku ve dvou krocích: nejprve injektovat jen 100 g fluoresceinu

(množství, které bude bezpečně pod nebo při hranici pozadí) a následně po dostatečně dlouhou dobu vzorkovat všechny objekty, a pokud nebude fluorescein detekován, navýšit injektované množství na 1 000 g a zkoušku zopakovat. Tato množství se mohou zdát vůči průtokům pramenů vysoká, nicméně se počítalo s tím, že velká většina fluoresceinu zůstane zachycena a rozředěna pod mez detekce v kvartérních náplavech, kterými se voda Bubovického potoka před dosažením vápenců procezuje.

Vzorky na fluorescein byly odebírány výhradně do skleněných vzorkovnic, které byly uchovány ve tmě. Ve vodárně v Srbsku byl umístěn automatický vzorkovač (obr. 4a), který od 20. dubna 2021 do 14. července 2021 odebíral vzorky ve dvanáctihodinových intervalech, poté vzorky až do 29. září 2021 odebíral v týdenním intervalu manuálně pan Červenka z VAKu Beroun. Na ostatních místech vzorky odebírali manuálně autoři článku a řada dobrovolníků zmíněných v poděkování.

Vzorky vody byly analyzovány na fluorimetru Perkin Elmer LS 55. Při standardní analýze bylo použito budící záření (excitace) o vlnové délce 491 nm a u každého vzorku se proměřovala intenzita emise 300–600 nm. Za pozitivní je považován takový vzorek, kde emise

tvoří vrchol na 512 nm (obr. 5a). Negativní je vzorek, kde fluorescence pouze klesá z excitačního maxima 491 nm (obr. 5a – přerušovaná čára). Koncentrace fluoresceinu se stanovila pomocí kalibrace, tj. změřením standardů fluoresceinu vytvořených z vody pramene ve Svatém Janu pod Skalou a přesně známých množství fluoresceinu.

Vzorky z pramene ve Svatém Janu pod Skalou, kde bylo podezření, že fluorescein je pod mezí detekce, byly přeměřeny metodou synchroscan (synchronous scan). Při tomto stanovení se mění vlnová délka jak budícího, tak vybuzeného záření a pro analýzu fluoresceinu je nastaven konstantní rozdíl mezi vlnovou délkou excitace a emise 21 nm (Käss et al 1998). V případě fluoresceinu se objeví vrchol na emisi 512 nm (obr. 5b). Do všech sledovaných objektů byly umístěny patrony s aktivním uhlím (pasivní vzorkovače fluoresceinu) tak, aby byly protékány vodou. Dále byly patrony s aktivním uhlím umístěny do jeskynních jezer jeskyně Dynamitky a Menglerovy jeskyně u Srbska, kde proudění není patrné. Patrony s aktivním uhlím byly ponechány bez výměny po celé období (jednou navázaný fluorescein se již z aktivního uhlí nevyplavuje). Po odebrání byly patrony s aktivním uhlím louženy v koncentrovaném roztoku lihu s KOH a výluhy analyzovány na fluorimetru. Získané průnikové křivky fluoresceinu ze vzorků vody byly vyhodnoceny pomocí programu Qtracer2 z US EPA (FIELD 2002).

Pro interpretaci stopovací zkoušky byly kontinuálně sledovány hladiny na profilech na vodních tocích (dva profily na Bubovickém potoce) a v jeskyních (Arnoldka, Palachova propast a Vývěr nad Klášterem; obr. 2) pomocí čidel Solinst (Kanada) a Noel (ČR). V týdenním intervalu byla stahována data hladiny toku Loděnice na profilu Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ) v obci Loděnice (originální surová měření v hodinovém intervalu) z ČHMÚ (2021).

3. Výsledky

3.1. Průběhy vodních stavů, injektáží a prvotních výsledků stopovací zkoušky

Po obdržení souhlasu KHS a povolení od VAK Beroun se, v koordinaci se Správou CHKO Český kras, přistoupilo k první injektáži 101 g fluoresceinu dne 20. dubna 2021 (tab. 1). Tato injektáž proběhla za nepříliš vhodných hydrologických podmínek. Zimní zvýšené průtoky, které vyprovokovaly provedení stopovací zkoušky, již ustaly a voda se ztrácela v mokřadu (obr. 2, 4e), kde se tvořilo bezodtoké jezero. Vzhledem k tomu, že sušší období zde mohou trvat i roky, bylo rozhodnuto provést injektáž i za nepříznivého stavu. Injektáž proběhla těsně pod tůň, tj. asi 50 m pod rybníkem pod Bubovicemi do několika rozvětvených proudů vody, které protékaly nivou a pomalu se vsakovaly do sedimentů. Fluorescein pomalu unášela

voda a během několika hodin dorazil do stojaté vody v mokřadu, kde byl vystaven degradaci slunečním zářením (obr. 4e). Ke ztrátě vody docházelo všude zcela rozptýleně a nepozorovatelně. Obarvení potoční vody neindikovalo žádnou soustředěnou ztrátu vody v pozorovaném úseku.

Dne 2. května 2021 došlo po srážkách ke zvýšení průtoku Bubovického potoka. Potok protékal mokřadem a mizel 100 m nad Ostrohem (místo, kde se spojuje údolí Bubovického potoka s levostranným velkým údolím od lomu Čerínka) a protékal úsekem s nejintenzivnějšími ztrátami vody z toku (červená linie, obr. 2). Protože se dosud fluorescein nikde neobjevil, byla provedena druhá injektáž v prakticky stejném množství (97 g), jako v případě první injektáže, avšak již na vhodnějším místě, a to pod mokřadem, kde je rychlý tok bez tůň a postupně se ztrácí do náplavů a zahliněných sutí lemujících koryto.

Ve dnech 13.–15. května 2021 došlo k výrazným srážkám následovaným výjimečně vysokým odtokem z povodí Bubovického potoka. Při kulminaci protékal Bubovický potok po dlouhou dobu v celé délce od Bubovic po ústí do Berounky (HERZA 2021). Nastaly tak zcela výjimečné hydrologické podmínky, kdy se do horního ztrátového úseku vcezovalo přes 10 l/s. Zároveň v žádném objektu dosud nebyl detekován fluorescein. Jakmile začala vodnost potoka prudce klesat, přistoupilo se dne 20. května 2021 k třetí injektáži, kdy bylo do toku pod mokřad injektováno 1 000 g fluoresceinu. Tok protékal úsekem s nejintenzivnějšími ztrátami vody a mizel 30 m pod Ostrohem. Tato třetí injektáž byla následována odběrem vzorků vody ze všech objektů v maximální intenzitě, kterou bylo možné zajistit. Vzorkovány byly pramen ve Svatém Janu pod Skalou po několik dní 3× denně, Bubovický potok na vodopádech i další místa s nejvyšší dosažitelnou intenzitou (viz obr. 7, 8).

Dne 22. května 2021 ve 21:00, tedy 47 hodin po třetí injektáži, kdy snižující se stavy toku Loděnice dovozovaly tok bezpečně přebrodit, byla pozorována ve světle silné potápěčské svítilny charakteristická jasně patrná zelená emise fluoresceinu ve vývěrové prohlubni pramene V nivě (obr. 6). Proto se začaly z tohoto špatně dostupného pramene odebírat vzorky vody s co nejvyšší četností (viz obr. 9). Ukázala se velmi překvapivá skutečnost, že vody Bubovického potoka proudí napříč holoňsko-hostimskou synklinálou velmi rychle a dosahují pramene V nivě za méně než 47 hodin.

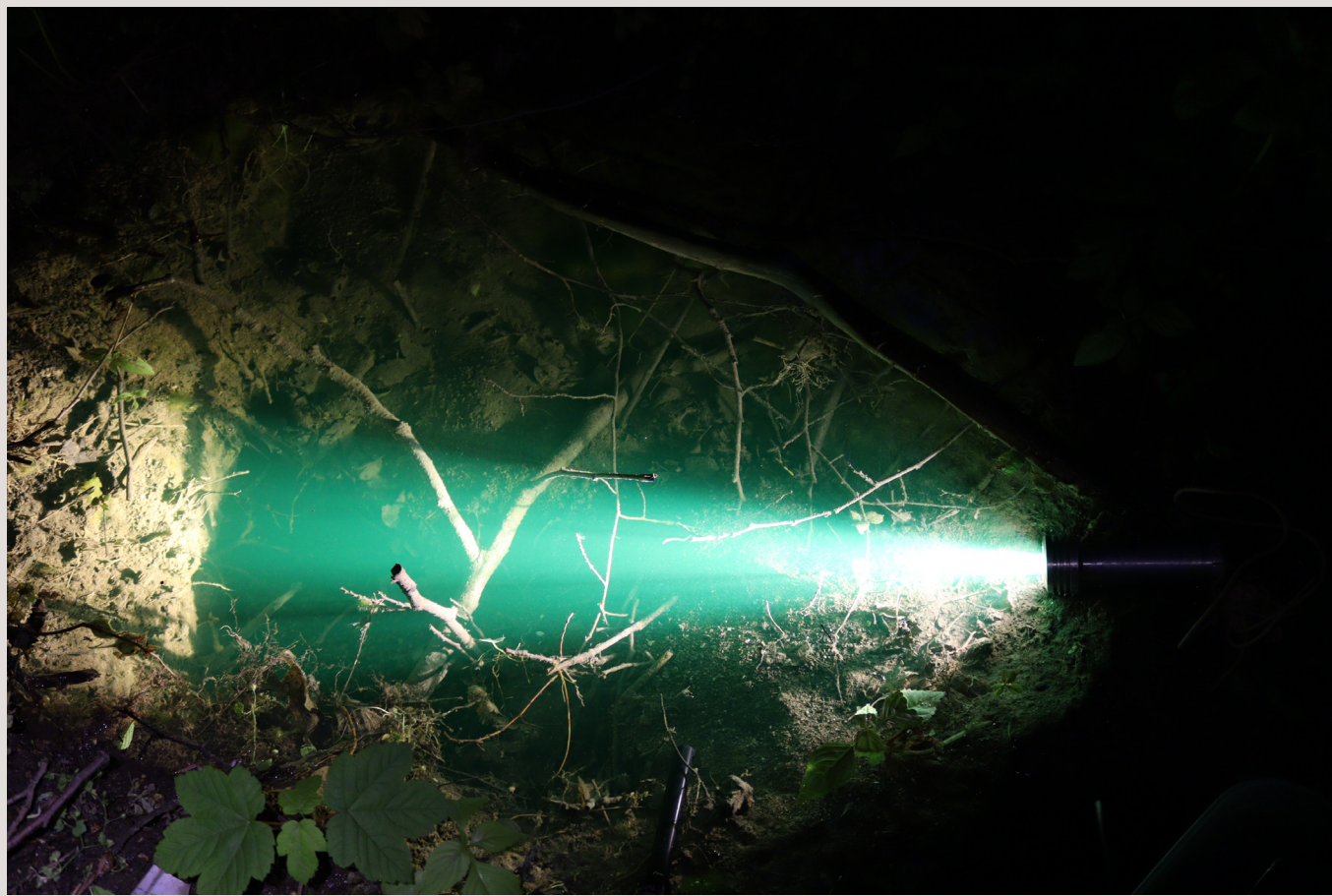
Z třetí injektáže se podařilo poměrně dobře podchytit koncentrace fluoresceinu na klesající větvi průnikové křivky v prameni V nivě. Chyběla ovšem informace, kdy se fluorescein v tomto prameni objevil. Protože stavy na ponoru klesaly, bylo rozhodnuto o pomocné čtvrté injektáži 206 g fluoresceinu dne 27. května 2021, kdy Bubovický potok protékal částí intenzivních ztrát a mizel asi 200 m nad Ostrohem. Pramen V nivě byl intenzivně sledován v intervalu dvou až tří hodin po dobu dvou dnů. Injektované množství fluoresceinu se ukázalo jako příliš nízké (nebo se Bubovický potok ztrácel příliš vysoko) a průniková křivka fluoresceinu zůstala zcela skryta v klesající větvi z třetí injektáže, nebo fluorescein ze čtvrté injektáže do výše uvedeného pramene vůbec nedorazil (zahuštěné body na obr. 8, 9).

Po opakovaných srážko-odtokových událostech 23–26. června 2021, kdy průtoky Bubovického potoka v horním ztrátovém úseku opět opakovaně narostly, byla provedena dne 27. června 2021 ještě pátá injektáž 510 g fluoresceinu pro upřesnění doby transportu do pramene V nivě. Bubovický potok protékal nejintenzivnější ztráty a mizel 50 m pod Ostrohem. Podařilo se dobře zachytit vrchol koncentrace fluoresceinu, a tak celou průnikovou křivku, bez které jinak není možné získat většinu parametrů stopovací zkoušky.

Tab. 1. Data a časy injektáží, injektovaná množství a průtoky v místech injektáže. Průtok s * byl měřen manuálně pomocí nádoby.

Tab. 1. Dates and times of tracer releases, amounts of tracer released and discharge at injection point. Discharge values marked with * were measured manually.

injektáž č.	injektováno (g)	datum a čas	hltnost (l/s)	místo injektáže
1	101	20.04.2021 13:00	cca 2	nad mokřadem
2	97	04.05.2021 20:00	<u>2,2*</u>	pod mokřadem
3	1000	20.05.2021 21:11	<u>8,6*</u>	pod mokřadem
4	206	27.05.2021 21:25	<u>1,9*</u>	pod mokřadem
5	510	27.06.2021 6:17	<u>5,6*</u>	pod mokřadem



Obr. 6. Jasně patrná stopa zelené emise fluoresceinu ve dráze světla silné potápěčské svítilny v jinak čiré vodě. Vývěrová prohlubeň pramene V nivě dne 22. května 2021 ve 21:00. Okamžik, kdy byla zodpovězena otázka, kam proudí voda z ponorů Bubovického potoka.

Fig. 6. A clear green trace in a beam of a powerful diving torch in otherwise transparent water. Resurgence pool of the V nivě Spring on May 22, 2021 at 21:00. At this moment, the question where does the water from the sink of the Bubovice Stream flow was resolved.

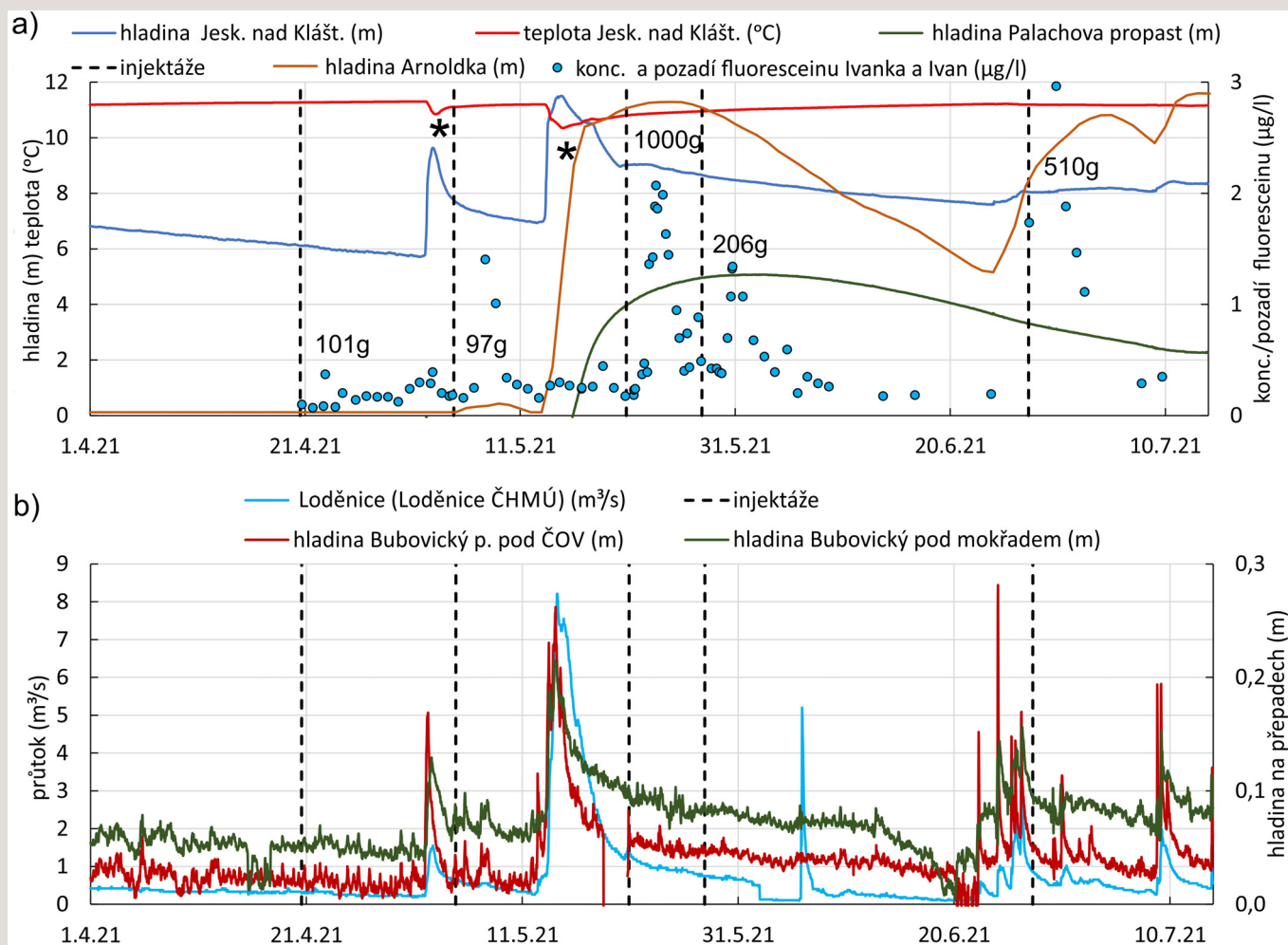
Celkově bylo odebráno a analyzováno 73 vzorků vody z pramene V nivě, 96 vzorků z pramene ve Svatém Janu pod Skalou (pramenné větve Ivan a Ivanka), 175 vzorků z jímacího vrtu v Srbsku, 30 vzorků potoční vody z Bubovických vodopádů a 27 vzorků vody z dalších míst zobrazených na obrázku 2.

Průběh hladin podzemní vody a průběh průtoků vodních toků ukazuje obrázek 7. Kolísání hladiny vody v jeskyni Vývěr nad Klášterem je úzce svázané s vydatností pramene Svatý Jan pod Skalou. V květnu 2021 došlo ke dvěma maximům hladiny vody v jeskyni (a tedy průtoku pramene ve Svatém Janu pod Skalou) doprovázeným poklesem teploty vody přitékající do tohoto pramene (obr. 7a – označeno hvězdičkou). Poklesy teploty vody jsou tak výrazné a dlouhotrvající, že nemohou být způsobené pouze vodou z povrchu, ale spíše přítokem chladnější vody mělkého oběhu o teplotě okolo 9 °C, např. z epikrasové zóny. Je dobře patrné, že nárůsty hladiny vody v jeskyni Vývěr nad Klášterem (potažmo i vydatnost pramene ve Svatém Janu pod Skalou) nastávají ve stejnou dobu jako nárůsty průtoku Bubovického potoka. Jedná se o objekty rychle reagující na dotaci ze srážek. Opačným extrémem je hladina vody v Palachově propasti, která se zvyšuje pozvolna po dobu mnoha týdnů a poté pomalu klesá a na jednotlivé srážkové události nereaguje (obr. 7a). Mezi těmito extrémny je hladina v jeskyni Arnoldka, která reaguje na srážkové události, ale s táhlými vrcholy (KOLČAVA 2013).

3.2. Výsledky analýzy průnikových křivek na prameni V nivě

Z pramene V nivě byly pro odlehlost brány vzorky vody z prvních dvou injektáží pouze sporadicky (25. dubna 2021 a 4. května 2021), tedy 5 dní po první a těsně před třetí injektáží. Oba vzorky vody neobsahovaly fluorescein. Průnikové křivky při intenzivním vzorkování po třetí a páté injektáži ukazuje obrázek 9. Po páté injektáži dorazil fluorescein do pramene V nivě mezi 27 a 38 hodinou. Jeho koncentrace vrcholila 43 hodin po injektáži a poté klesala pod mez detekce okolo 200 hodin po injektáži. Průniková křivka po třetí injektáži je velmi podobná. Zachycena byla ale pouze sestupná větev po maximu koncentrace fluoresceinu ve vodě (od 47 hodin po injektáži). Je zřejmé, že při třetí injektáži byla koncentrace fluoresceinu v poměru k injektovanému množství vyšší a pokles jeho koncentrace byl rychlejší než při páté injektáži (obr. 9), zřejmě kvůli vyšší hltnosti ztrátového úseku.

Pro analýzu průnikových křivek je důležité znát průtok pramene V nivě v době konání stopovací zkoušky. Vyvěrající voda tohoto pramene odtéká z velké většiny přímo do toku Loděnice a s výjimkou extrémně nízkých stavů Loděnice nelze průtok pramene nijak měřit. Průtok pramene V nivě za extrémního sucha v roce 2019 byl 5–6 l/s (BRUTHANS, MAREŠ a KARATAS 2020). Na základě velikosti povodí, specifického odtoku a chování ostatních pramenů v Českém krasu kvalifikovaně odhadujeme průtok pramene V nivě za stopovací zkoušky na 10–15 l/s.



Obr. 7. Průběh hladin podzemní vody, hladin na vybudovaných přepadech na Bubovickém potoce (ukazující nízké a vysoké průtoky), průtok Loděnice, okamžiky injektáží včetně injektovaného množství fluoresceinu a pozadí, resp. koncentrace fluoresceinu v prameni ve Svatém Janu pod Skalou. Hvězdičky označují období, kdy byl nárůst průtoku pramene ve Svatém Janu pod Skalou (pozorovatelné na nárůstu hladiny podzemní vody v jeskyni Vývěr nad Klášterem) doprovázen poklesem teploty vody.

Fig. 7. The course of groundwater tables and levels of the Bubovice Stream profiles (showing low and high discharges), the discharge of the Loděnice Stream, times of tracer releases including the amounts of fluorescein dye released and the backgrounds, i.e. the fluorescein concentrations in the Svatý Jan pod Skalou Spring. Periods during which the peak in the yield of the Svatý Jan pod Skalou Spring (noted by the rise of water level in the Vývěr nad Klášterem Cave) was accompanied by a decrease in water temperature.

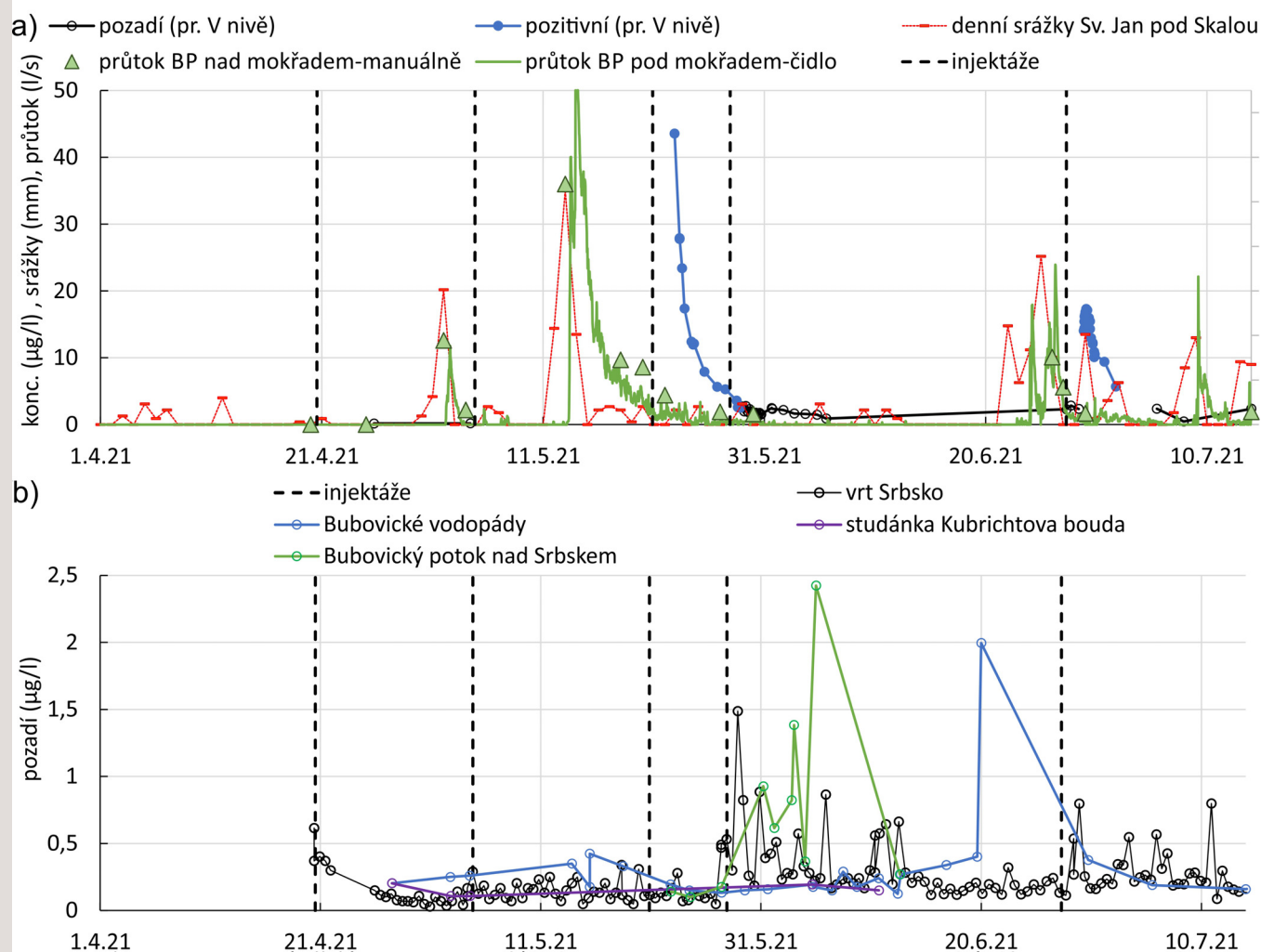
Analýzou průnikové křivky z páté injektáže byly získány parametry krasového kanálu (tab. 2). Přímá vzdálenost ponor–pramen činí 2,3 km, což po opravě na nerovný průběh vede k odhadu délky krasového kanálu okolo 3,4 km. Střední doba zdržení, tedy čas, kdy dorazila polovina ze zachyceného množství fluoresceinu v prameni, je 105 hodin. Maximální rychlost proudění podle prvního objevení fluoresceinu je mezi 2,2–3,0 km/den, střední rychlost proudění je 0,8 km/den. Objem zatopené části krasového kanálu mezi ponorem a pramenem je 2 200–5 700 m³, což odpovídá průměrné ploše zatopeného profilu 0,6–1,7 m². Disperze v systému je relativně velká, což naznačuje nižší Pecletovo číslo. Návratnost činí 9–13 %, což znamená, že do pramene V nivě dorazilo 9–13 % z injektovaného množství fluoresceinu.

Podzemní voda tedy proudí velmi rychle, podobnou rychlostí jako v běžném krasovém prostředí, což je velmi překvapivé, protože při proudění musí sestupovat do značných hloubek (obr. 3). Objem zaplavené části kanálu je překvapivě nízký. Profil kanálu je zjevně mnohem užší než např. profily jeskyně Arnoldka nebo Palachovy propasti. Buď se jedná o mladý jeskynní jev (vzniklý nově

ponornými vodami Bubovického potoka) nebo, pokud jde o běžnou paleokrasovou jeskyni, jsou jeskynní prostory z velké části vyplněny jemnozrnnými sedimenty. Při očekávaných velkých změnách příčného profilu kanálu (dómy vs. úzké části kanálu) je pravděpodobné, že značná část dráhy kanálu bude téměř jistě pod limitem průleznosti.

3.3. Výsledky analýzy průnikových křivek na prameni ve Svatém Janu pod Skalou a otázka průniku fluoresceinu do dalších objektů

Při stopovací zkoušce byly pravidelně odebírány vzorky z pramen-
né větve Ivan a občas z pramené větve Ivanka. Ve vývoji pozadí
nebo koncentrace fluoresceinu nebyl mezi oběma sledovanými vět-
vemi pramene ve Svatém Janu pod Skalou rozdíl, a proto byly vzorky
pro analýzu z obou větví pramene sloučeny do jediné časové řady.
Na první injektáž fluoresceinu, pramen ve Svatém Janu pod Skalou
nijak nereagoval, avšak po druhé injektáži se objevilo zvýšení pozadí
(viz obr. 7 a metodika), což může indikovat koncentraci pod mezí
detekce. Proto bylo při třetí injektáži fluoresceinu vzorkování vody
s četností jednou denně navýšeno na 3× denně. Po třetí injektáži do-



Obr. 8. Průběh průtoku na přepadu na Bubovickém potoce pod mokřadem (manuální měření i hodnoty odvozené z hladiny na přepadu), denní úhrn srážek, okamžiky injecktáží a pozadí a koncentrace fluoresceinu. Otevřené kroužky představují pozadí (vzorky na koncentraci fluoresceinu negativní), plné kroužky vzorky na fluorescein pozitivní.

Fig. 8. The course of the discharge at profile „pod Mokřadem“ at the Bubovický Stream (manually measured values and values derived from water levels at the profile), daily sums of precipitation, times of tracer releases, and the background and the concentration of the tracer. The background (samples negative to fluorescein dye) is marked by open circles, samples positive to fluorescein are marked by full circles.

šlo po dobu několika dnů k výraznému nárůstu pozadí, přítomnost fluoresceinu nebyla nicméně klasickým měřením opět prokazatelná. Při páté injecktáži byl zachycen pozitivní vzorek vody s fluoresceinem na pramenné větvi Ivanka. Poté došlo k vykreslení všech analýz fluoresceinu vůči časům injecktáže a vrcholům průtoku (obr. 7). Ukázalo se, že až na první injecktáž se vždy po injecktáži zvýšilo pozadí a toto zvýšení nijak nesouvisí se zvýšením průtoků na ponorech nebo se zvýšením průtoku pramene (obr. 7). Původně totiž bylo zvýšení pozadí fluoresceinu připisováno četným srážko-odtokovým událostem. Všechny dochované vzorky vody se proto analyzovaly na fluorescein znovu citlivějšími metodami (např. synchroscan). Ve všech vzorcích se zvýšením pozadím byla doložena jeho přítomnost na rozdíl od vzorků vody s nízkým pozadím. Přeměření fluoresceinu citlivější metodou tak jednoznačně prokázalo, že s výjimkou první injecktáže pronikl fluorescein při zbývajících čtyřech injecktážích do pramene ve Svatém Janu pod Skalou (sledovaných pramenných větví Ivanka a Ivan). Jedná se však o koncentrace mnohem nižší než v případě pramene V nivě (Svatý Jan pod Skalou maxima jen 1–3 µg/l, zatímco V nivě byla maxima 17–44 µg/l).

Průnikové křivky ukazuje obr. 10. Je zřejmé, že až na pátou injecktáž dochází k prvnímu objevu fluoresceinu v prameni 50 hodin po jeho injecktáži. Koncentrace vrcholí asi 70 hodin po injecktáži a vyznívá pod mez detekce asi po 150 hodinách. Rychlost proudění je tedy, až na pátou injecktáž, podobná, bez ohledu na různé hltnosti ponoru. Překvapivý je malý rozdíl ve výsledných koncentracích fluoresceinu ve vodě pramene při značně odlišném injecktovaném množství. Důvodem může být jednak skutečnost, že zastoupení vody z ponoru Bubovického potoka se v celkové směsi vody pramene výrazně měnilo v čase (na rozdíl od pramene V nivě). Příčinou může být i zvýšená chyba při měření koncentrací za vysokého pozadí a blízko limitu detekce.

Průnikové křivky v prameni ve Svatém Janu lze interpretovat pouze zhruba. Střední doba zdržení je okolo 100 hodin. Průtok pramene za stopovací zkoušky nebylo možné změřit, protože velká většina vyvěrající podzemní vody uniká rozptýleně do rozvodněné Loděnice. V analogii s rozsáhlým měřením ŽÁKA et al. (2001) ho odhadujeme na 20–30 l/s. Přímá vzdálenost mezi ponorem a pramenem dosahuje 2,1 km, po opravě na nepřímý průběh krasového ka-

Tab. 2. Parametry krasového kanálu mezi ponorem a pramenem V nivě získané analýzou průnikové křivky z páte injecktáže v programu Qtracer2.

Tab. 2. Parameters of the karst conduit between the sink and the V nivě Spring obtained from an analysis of breakthrough curve from 5th release of the tracer in Qtracer2.

místo injecktáže	pod mokřadem
místo sledování	pramen V nivě
hltnost ponoru (l/s) – měřená	5,7
průtok pramene (l/s) – kvalifikovaný odhad	10–15
vzdálenost přímá a opravená (x 1,5) (m)	2 260; 3 390
čas prvního objevení (hod)	27–38
čas maximální koncentrace (hod)	43
střední doba zdržení (hod)	104,6
maximální koncentrace (µg/l)	17,3
maximální rychlost proudění (m/den)	2 140–3 010
střední rychlost proudění (m/den)	779
disperzní koeficient (m ² /s)	1,24
podélná disperzivita (m)	138
Pecletovo číslo (bezrozměrné)	25
objem zatopené části krasového kanálu (m ³)	2 150–5 700
průměrná plocha zatopeného profilu (m ²)	0,6–1,7
návratnost stopovače (%)	9–13

nálu 3,2 km. Maximální rychlost proudění tak dosahuje 1,5 km/den, střední rychlost proudění okolo 0,8 km/den. Maximální rychlost je nižší než při proudění z ponoru do pramene V nivě.

Do pramene ve Svatém Janu pod Skalou dorazilo 6–9 % fluoresceinu z ponoru při druhé injecktáži, 1 % při třetí, 4–6 % při čtvrté a okolo 2 % po páté injecktáži. Návratnost však může být i vyšší, protože většina fluoresceinu mohla proniknout po rozptýlení v náplavách okolo ponoru do pramene pod limitem detekce.

Vzhledem k tomu, že ze čtvrté injecktáže se objevila voda s fluoresceinem v prameni ve Svatém Janu pod Skalou, ale neobjevila se v prameni V nivě, lze usuzovat, že proudové cesty do obou pramenů jsou zřejmě do značné míry samostatné.

Fluorescein nebyl zachycen v žádném z intenzivně odebíraných vzorků podzemní vody z jímacího vrtu v Srbsku (175 vzorků mezi 20. dubnem a 29. zářím 2021; obr. 8b). Nebyl zjištěn ani v žádném ze vzorků vody odebíraných nepravidelně z Bubovických vodopádů, studánky pod Kubrychtovou boudou ani z Bubovického potoka v Srbsku (obr. 8b). Je tak zřejmé, že do těchto objektů voda z míst injecktáže nedorazila.

Fluorescein nebyl zjištěn ve vzorku vody z Palachovy propasti z 30. května 2021 ani z Arnoldky z 31. května a 12. června 2021. Vzhledem k odběru omezeného počtu 1–2 vzorků nelze proudění do obou jeskynních jezer vyloučit.

Patrona na vyústění přítoku do automatického vzorkovače z jímacího vrtu v Srbsku byla odebrána v červenci 2021, patrony z Bubovických vodopádů, jeskyně Menglerova a Dynamitka pak v červenci 2022. Patrony umístěné v Loděnici nad Svatým Janem pod Skalou, v Loděnici nad ústím do Berounky a v ústí pramene v Nivě do Loděnice byly zničeny povodní, patrona ze Svatého Jana pod Skalou byla zcizena. Patrony s aktivním uhlím umístěné po dobu 1,5 roku od injecktáže v jeskynních jezerech Menglerova a Dynamitka byly

na přítomnost fluoresceinu negativní, je ale otázkou, do jaké míry voda jezery vůbec proudí. Podobně byla na fluorescein negativní i patrona z jímacího vrtu v Srbsku a patrona umístěná na Bubovických vodopádech.

3.4. Nové poznatky o proudění vzhledem ke geologické stavbě a návrhy dalších prací

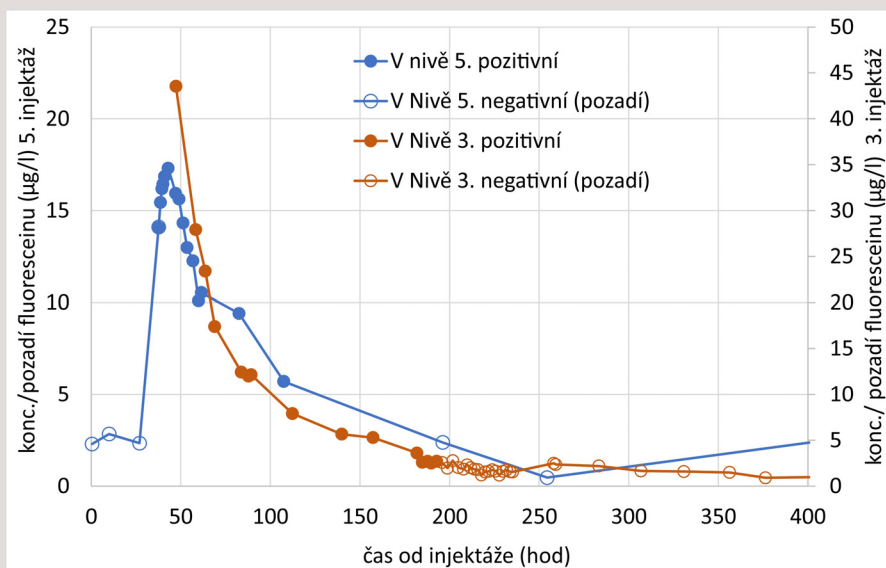
Vztah mezi geologickou stavbou a prouděním podzemní vody ukazují obr. 2 a 3. Je zřejmé, že proudění podzemní vody probíhá výrazně kose k ose synklinál a antiklinál ve vápencích hluboce zavrásněných pod nepropustné srbské břidlice. Krasový kanál zřejmě při proudění zčásti následuje křížení příčných zlomů a vrstevních ploch, tedy stejných elementů jako dlouhé chodby jeskyně Arnoldky, a zčásti zřejmě vrstevní plochy či otevřené pukliny podélného směru.

Překvapivé je rychlé proudění podzemní vody do značných hloubek. Oba prameny v údolí Loděnice mají výrazně vyšší teplotu, než je průměrná roční teplota vzduchu (obr. 11). V prameni ve Svatém Janu pod Skalou je teplota vody 11,6 °C, ale propadá se i o 1 °C po výrazných srážkových událostech (ŽÁK et al. 1996; obr. 11a). Naopak v prameni V nivě je teplota jen okolo 11 °C, ale po srážkových událostech se mění méně. Podobně i konduktivita pramene V nivě je mnohem stálější (obr. 11b).

Alternativní možnost, že by podzemní vody pronikala srbským souvrstvím podle puklin nebo zlomů, lze vyloučit. V srbském souvrství jsou pukliny ve větších hloubkách sevřené, což se projevuje tím, že hladina podzemní vody je vždy zastížena do asi 20 m pod terénem, bez ohledu na morfologii (BRUTHANS 1999). Jedná se o nejvýraznější izolátor Českého krasu, kvůli flyšovému charakteru horniny, kde se střídají plastické a rigidnější polohy (BRUTHANS a ZEMAN 2000). I v silně rozpukané přípovrchové zóně obdobného prostředí jsou stopovací zkoušky na vzdálenost vyšší než první desítky m neúspěšné a voda překoná tuto vzdálenost v řádu typicky měsíců. Možnost, že by puklinami srbského souvrství pronikal stopovač v řádech km/den, lze vyloučit. Taková rychlost je možná jen v otevřených kanálech rozšířených činností podzemní vody. Sestup vody do značných hloubek pod úroveň srbského souvrství a zřejmě i pod úroveň svrchního poloizolátoru dokládá i zvýšení teploty obou pramenů.

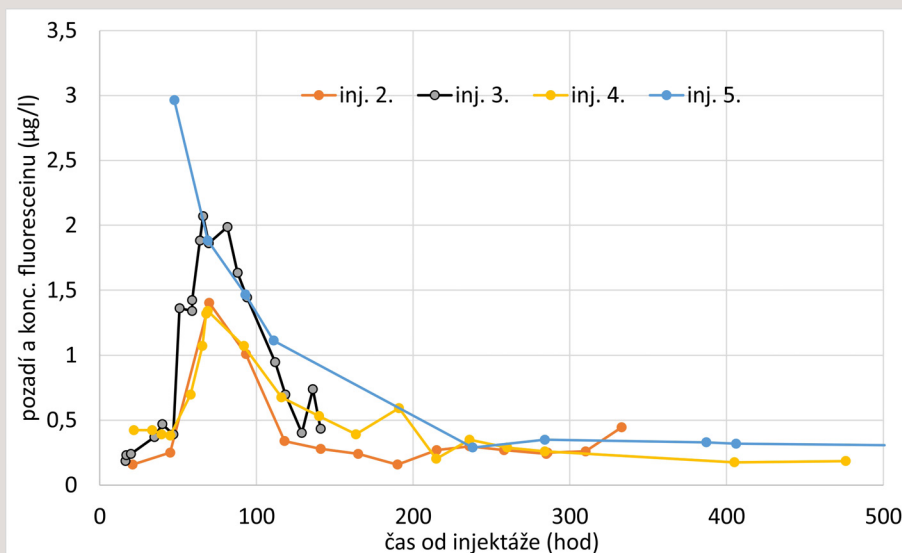
Průnikové křivky v prameni ve Svatém Janu pod Skalou byly určeny s poměrně malým rozlišením v čase. Bylo by proto vhodné stopovací zkoušku zopakovat za vyšších vodních stavů s tím, že do jeskyně Vývěr nad Klášterem bude umístěn terénní fluorimetr se sondou spuštěnou na dno jeskyně do místa, kde aktivně proudí krasová voda (jak je zřejmé ze změn teplot vody v jeskyni za vyšších vodních stavů na obr. 7a). Tím by měly být získány průnikové křivky s časovým krokem v minutách. Taktéž by bylo vhodné ověřovat nebo pomoci terénního fluorimetru změřit výtok z pramene V nivě, protože není přesně podchyceno první objevení fluoresceinu v tomto prameni.

Při stopovací zkoušce je vhodné injektovat minimálně 500 g fluoresceinu, protože při čtvrté injecktáži s 200 g nedošlo k nárůstu koncentrace fluoresceinu v prameni V nivě nad úroveň hodnot pozadí. Průtok pod mokřadem by měl při stopovací zkoušce přesahovat 5 l/s, stejně jako tomu bylo při úspěšných průnicích stopovače do pramene V nivě při třetí a páté injecktáži (tab. 1) a takový průtok by měl trvat mnoho dnů nebo lépe týdnů, aby došlo k nasycení náplavů. Při nižším průtoku Bubovického potoka pod mokřadem nebo při jen krátkodobém zvýšení průtoku nelze zaručit, že budou aktivovány ty proudové cesty podzemní vody, které vodu vedou do krasového kanálu. Tak vysoký průtok toku je ovšem na Bubovickém potoce vzácný a nastává jen po několika dnech či týdnech v běžném roce.



Obr. 9. Průnikové křivky fluoresceinu v prameni V nivě v čase od injektáže. Prázdné kroužky: pozadí, plné kroužky: vzorky pozitivní na fluorescein. Na levé vertikální ose koncentrace po páté injektáži, na pravé vertikální ose koncentrace po třetí injektáži. Osy jsou v poměru 1 : 2, aby byla koncentrace normalizována na poměr 1 : 2 v injektovaném množství.

Fig. 9. Breakthrough curves in the V nivě Spring as a function of time after tracer release. Empty circles – background, full circles – fluorescein dye concentration. The left vertical axis shows the concentrations after 5th tracer release, the right vertical axis shows the concentrations after 3rd tracer release. The axes are related 1 : 2 to normalize the concentrations to a ratio of 1 : 2 in the amount of tracer released.



Obr. 10. Průnikové křivky fluoresceinu v prameni ve Svatém Janu pod Skalou v čase po injektáži fluoresceinu. Koncentrace nad 0,5 µg/l byly pozitivní na fluorescein po přeměření metodou synchroscan.

Fig. 10. Breakthrough curves of the fluorescein dye in the Svatý Jan pod Skalou Spring as a function of time after tracer release. Concentrations above 0.5 µg/l were positive to fluorescein after repeated measurement by the synchroscan method.

Za předpokladu, že srážky jsou poměrně rovnoměrně distribuované v povodí Bubovického potoka i povodí Loděnice, je přesažení průtoku 1 m³/s v Loděnici (aktuální průtok Loděnice dostupný na stránkách ČHMÚ), indikátorem, že na Bubovickém potoce by mohl být zastížen vhodný vodní stav (obr. 7b).

Za nižších vodních stavů, kdy se voda na Bubovických vodopádech ztrácí pod druhým jezírkem odshora do puklin ve vápencích, by bylo vhodné pomocí stopovací zkoušky určit, kam tato voda proudí (zda se objevuje v jímácím vrtu vodovodu v Srbsku, v Menglerově jeskyni či jinde). Za velmi vysokých vodních stavů, kdy je aktivní ztrácející se tok nad Mužíkovými poli (M. Kolčava, ústní sdělení), by bylo vhodné označit fluoresceinem tento tok pro zjištění, zda voda z ponoru též proudí do pramenů v údolí Loděnice či jinde. Bylo by též vhodné provést stopovací zkoušku i na ponoru toku pod vodárnou Domášov nad Tetínem pro zvýšení našich zatím velmi kusých znalostí o krasové hydrogeologii Českého krasu.

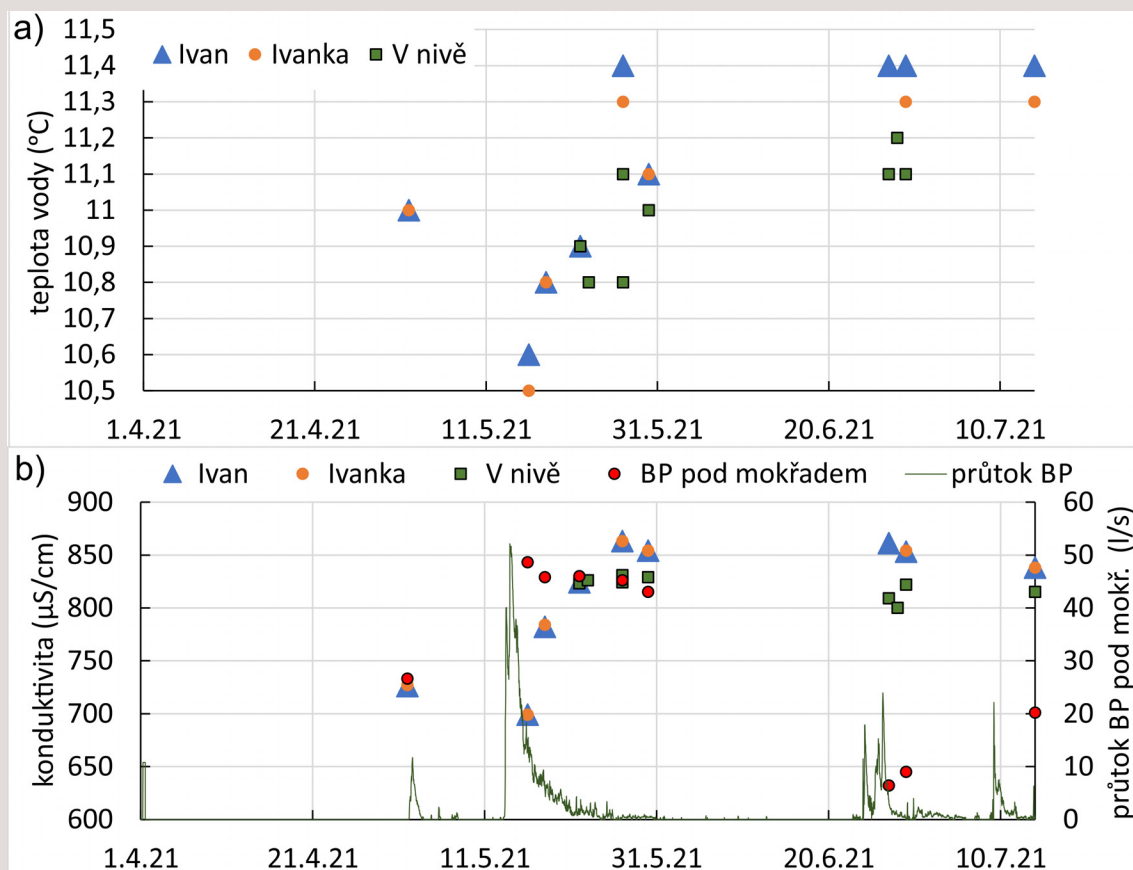
Bylo by vhodné za různých vodních stavů opakovaně ověřovat vody ponoru Bubovického potoka a pramenů V nivě a Svatý Jan pod Skalou a porovnat jejich základní chemizmus a mikrobiologické rozborů pro lepší pochopení spojitosti mezi oběma prameny a vztahem k ponoru.

4. Závěr

Voda z horního ztrátového úseku Bubovického potoka neodtéká podzemní cestou do pramenů nad Bubovickými vodopády, studánky pod Kubrychtovou boudou, ani se neobjevuje v Bubovickém potoce nad Srbskem. Neproniká ani do jímacího vrtu v Srbsku, rovněž patrony s aktivním uhlím umístěné po dobu 1,5 roku od injektáže v jeskynních jezerech Menglerovy jeskyně a Dynamitky nezaznamenaly fluorescein v jezerní vodě. Namísto toho prokazatelně proudí vody z ponorů do jediných dvou velkých krasových pramenů v údolí Loděnice: pramene ve Svatém Janu pod Skalou a pramene V nivě.

Do pramene V nivě dorazilo 9–13 % z injektovaného množství fluoresceinu. Maximální rychlost proudění podle prvního objevení fluoresceinu (27–38 hodin po injektáži) je mezi 2,2–3,0 km/den, střední rychlost proudění je 0,8 km/den. Objem zatopené části krasového kanálu mezi ponorem a pramenem je 2 200–5 700 m³, což odpovídá průměrné ploše zatopeného profilu kanálu 0,6–1,7 m². Krasový kanál bude tedy zřejmě z většiny neprůlezný. Disperze v systému je relativně velká, což naznačuje nižší Pecletovo číslo.

Do pramene ve Svatém Janu pod Skalou dorazilo mezi 1 a 9 % z injektovaného množství fluoresceinu do Bubovického potoka. Koncentrace byla kvůli výraznějšímu ředění téměř o řád nižší než



Obr. 11. Teplota a konduktivita pramenných větví Ivan a Ivanka v Svatý Janu pod Skalou, pramene V nivě a Bubovického potoka na ponorech. Pro srovnání průtoky Bubovického potoka na ponorném úseku.

Fig. 11. Temperatures and conductivities of Ivan and Ivanka spring branches at Svatý Jan pod Skalou, the V Nivě Spring and the Bubovice Stream upstream of the sinks. Discharges of the sink reach of the Bubovice Stream are given for comparison.

v prameni V nivě. Voda z ponorů Bubovického potoka je tedy v prameni V nivě zastoupená asi 10× více (tvoří zřejmě desítky % vydatnosti pramene) než je tomu v prameni ve Svatém Janu pod Skalou, kde tvoří pouhý % v celkové směsi.

Voda z Bubovického potoka ponořující se do horního ztrátového úseku tedy opouští jeho orografické povodí a míří do orografického povodí Loděnice. Přes 80 % fluoresceinu nebylo zachyceno, takže nelze vyloučit, že významná část vody z Bubovického potoka ztrácí se do podzemí proudí např. do skrytých pramenů přímo do Berounky. Nicméně za pravděpodobnější považujeme spíše rozptýlení fluoresceinu v náplavech Bubovického potoka v prostoru ztrátového úseku a jeho pomalý odtok do pramenů V nivě ve Svatém Janu pod Skalou, ovšem již zředěného pod mez detekce fluoresceinu.

Velkým překvapením jsou vysoké rychlosti proudění podzemní vody ve vápencích pod osou holyňsko–hostimské synklinály, tedy v hloubkách 300–600 m pod terénem a přes 200 m pod hladinou podzemní vody, a malý objem proudové cesty. To naznačuje, že se jedná o relativně mladý krasový jev (vázaný na současnou hydrologii), nebo pokud jsou pro proudění podzemní vody v takových hloubkách využity starší jeskyně, pak jsou tyto z většiny vyplněny málo propustnými sedimenty.

Pramen ve Svatém Janu pod Skalou se ve světle nových poznatků a z hlediska dlouhodobé jakosti vyvěrající vody jeví nevhodný nejen pro dříve uvažované hromadné zásobování obyvatel pitnou vodou. Jeho voda představuje evidentní riziko i pro jednotlivce plnící si

zde kanystry domněle kvalitní podzemní vodou. Dochází zde nejen k dobře známému zakalování pramene kvůli rychlému průniku vody po srážkách do ponorů okolo Arniky a dalších, což je doprovázeno bakteriálním znečištěním. Voda ze Svatojanského krasového pramene nesplňuje všechny parametry normy pro pitnou vodu již nejméně 20 let (VOŽENÍLEK et al. 1999; ŽÁK et al. 2001). Navíc lze na základě nové stopovací zkoušky očekávat průnik bakterií i za vysokých vodních stavů na ponorech Bubovického potoka (z ČOV a zastavěného povodí obcí Bubovice), a to po dobu týdnů a ve velmi vodních letech i mnoha měsíců, kdy je ovšem voda pramene čirá a nijak tedy před bakteriálním znečištěním nevaruje. Vodu by neměly konzumovat zejména starší osoby a osoby s oslabenou imunitou a informace o tom, že do pramene rychle proniká voda s bakteriemi ze závrtů a z ČOV Bubovice, by měla být viditelně umístěná u pramene, aby každý mohl provést kvalifikované rozhodnutí, zda je či není ochoten nést riziko konzumace této vody nebo dokonce tuto vodu nabízet dalším osobám, které o původu vody pramene nic netuší. Voda pramene je mnohými uživateli (v rozporu s měřenými jakostními parametry) považována za excelentní zdroj pitné vody a informace o změřené kvalitě vody jsou systematicky ničeny. Proto by toto upozornění mělo být vyhotoveno z velmi trvanlivého materiálu. Nechtě si každý pije, co chce, ale měl by vědět, co dělá.

Literatura

- BRUTHANS J. (1999): *Hydrogeologické poměry Českého krasu severně od řeky Berounky*. – Diplomová práce, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy: 1–103. Praha.
- BRUTHANS J., MAREŠ J., KARATAS T. (2020): Nové poznatky o krasových pramenech ve Svatém Janu pod Skalou a příčiny extrémně nízkých průtoků Loděnice v letech 2018 a 2019. – *Český kras*, 26: 41–50. Beroun.
- BRUTHANS J., ZEMAN O. (2000): Nové poznatky o hydrogeologii Českého krasu. – *Český kras*, 26: 41–50. Beroun.
- BRUTHANS J., ZEMAN O. (2003): Factors controlling exokarst morphology and sediment transport through caves: Comparison of carbonate and salt karst. – *Acta Carsologica*, 32 (1): 83–99.
- ČHMÚ (2021): https://hydro.chmi.cz/hpps/popup_hpps_prfdyn.php?seq=307285&lng=CZE
- FIELD M. (2002): *The QTRACER2 program for tracer break through curve analysis for tracer tests in karstic aquifers and other hydrologic systems*. – U.S. Env. protect. agency, hypertext multimedia publication: <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=54930>.
- HAVLÍČEK V., HOLUBEC J., CHÁB J., CHLUPÁČ I., KOVANDA J., PRANTL F., SVOBODA J., ŠNAJDR M., ŠTORCH P. (1993): *Základní geologická mapa ČSFR 1 : 25 000. List 12-411 Beroun*. – Ústřední ústav geologický. Praha.
- HAVLÍČEK V., HORNÝ R., CHLUPÁČ J., KOVANDA J., KŘÍŽ J., MAŠEK J., SVOBODA J., ŠTORCH P. (1987): *Základní geologická mapa ČSSR 1 : 25 000. List 12-414 Černošice*. – Ústřední ústav geologický. Praha.
- HAVLÍČEK V., HORNÝ R., MAYER V., KOVANDA J., PRANTL F., SVOBODA J., ŠNAJDR M. (1989): *Základní geologická mapa ČSSR 1 : 25 000. List 12-413 Králův Dvůr*. – Ústřední ústav geologický. Praha.
- HERZA T. (2021): *Hydrologie a hydrogeologie Bubovického potoka*. – Bakalářská práce, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy: 1–55. Praha.
- KADLECOVÁ R., ŽÁK K. (1998): Krasové prameny Českého krasu. – *Český kras*, 24: 17–34. Beroun.
- KÄSS W., BEHRENS H., HIMMELSBACH T., HÖTZL H., HUNKELER D., LIEBUNDGUT C. H., MOSER H., ROSSI P., SCHULTZ H. D., STOBER I., WERNER A. (1998): *Tracer technique in geohydrology*. – Balkema: 1–600. Rotterdam.
- KOLČAVA M. (2013): Sledování hladin podzemní vody v jeskyních na paní hoře v Českém krasu a jejich abnormální stav v roce 2013. – *Český kras*, 39: 13–24. Beroun.
- KOVANDA J. et al. (Red., 1984): *Základní geologická mapa ČSSR 1 : 25 000. List 12-412 Rudná*. – Ústřední ústav geologický. Praha.
- MUSIL R., DEMEK J., DVOŘÁK J., GAISLER J., GLICH V., HAVEL H., HYPR D., LOŽEK V., PŘIBYL J., QUITT E., RAUŠEK J., SLEZÁK L., SOUKUPOVÁ V., ŠTELCL O., ŠTEFKA L., VALOCH K., VANĚČKOVÁ L., VAŠÁTKO J., VLČEK V., VODIČKA J., ZIMA J. (1993): *Moravský kras – Labyrinty poznání*. – GEOprogram: 1–336. Adamov.
- VČÍSLOVÁ B. (1980): *Silur - devon Barrandienu - II. fáze - závěrečná zpráva*. – Nепublikovaná zpráva. Stavební geologie: 1–191. Praha. Geofond GF FZ005789.
- VOŽENÍLEK A., ŠVIHLA V., ŠIMUNEK O., DOSTÁL T. (1999): *Revizace v povodí Bubovického potoka*. – Nепublikovaná zpráva. Ministerstvo životního prostředí a Správa CHKO Český kras: 1–104, 40 příloh. Praha, Karlštejn.
- ŽÁK K., HLADÍKOVÁ J., BUZEK F., KADLECOVÁ R., LOŽEK V., CÍLEK V., KADLEC J., ŽIGOVÁ A., BRUTHANS J., ŠTASTNÝ M. (2001): Holocenní vápence a krasový pramen ve Svatém Janu pod Skalou v Českém krasu. – *Práce Českého geologického ústavu*, 13: 1–136. Praha.
- ŽÁK K., KADLECOVÁ R., KADLEC J., KOLČAVA M. (1996): Chování krasových pramenů ve Svatém Janu pod Skalou během mimořádných srážkových událostí v květnu a červnu 1995 a nový občasný ponor v údolí Propadlé vody. – *Český kras*, XXII: 41–47. Beroun.
- ŽÁK K., KOLČAVA M., BRUTHANS J., ŽIVOR R. (2013): Evidence jeskyní Českého krasu: doplňky a změny za období 1. října 2011 až 30. září 2013. – *Český kras*, XXXIX: 63–67. Beroun.