

NOVÉ STOPOVACÍ ZKOUŠKY V MORAVSKÉM KRASU I.: JESKYNNÍ SYSTÉM RUDICKÉ PROPADÁNÍ-BÝČÍ SKÁLA

New tracer tests in the Moravian karst I.: the Jedovnické propadání-Býčí skála cave system

Martin Knížek¹, Anna Vojtěchovská², Jiří Bruthans², Helena Vysoká²

¹ Ústav geologických věd PřF MU Brno, Kotlářská 2, 611 37 Brno; e-mail: kniza@mail.muni.cz

² Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky PřF UK Praha, Albertov 6, 128 43 Praha

(24-41 Vyškov)

Key words: Moravian karst, Rudické propadání-Býčí skála cave system, tracer test, karst hydrology

Abstract

Five tracer tests were performed with uranine dye, chloride and iodide in the central part of the Moravian Karst (the Rudické propadání – Býčí skála cave system). Present results agree well with results of tracer test performed in 1953 by Dr. Burkhardt and they presented results well agree with previous works. Volume of whole conduit was 7000 m³. The Jedovnický brook resurgence consist of 4 springs situated in distance of several tens of meters. The study shows, that springs are fed by single conduit with no inflows after splitting the main conduit to individual springs (the same breakthrough curve detected on all springs). The only exception is spring No. III., which shows some delay in tracer arrival and peak concentration. This can be explained by large volume of conduit feeding this spring (some 140 m³) compare to other conduits.

Úvod

V roce 2005 a v prvních měsících roku 2006 byla v severní a střední části Moravského krasu provedena řada stopovacích zkoušek. Shrnutí výsledků první části zkoušek na podzemním toku Jedovnického potoka přinášíme v tomto příspěvku.

Na podzemním toku Jedovnického potoka byla v minulosti provedena řada stopovacích zkoušek (Burkhardt, 1953, 1959). Téměř celá trasa toku je známa a zmapována (včetně potápěčského průzkumu). Proudění vody v jeskynním systému a geometrie zatopených prostor jsou tedy poměrně dobře zmapována. Ve dnech 7.–11. 6. 2005 bylo provedeno v jeskynním systému Rudické propadání-Býčí skála celkem pět stopovacích zkoušek. Jejich cílem bylo: otestování metodiky kvantitativních stopovacích zkoušek na jeskynním systému s dobře známým prouděním (použití více druhů stopovačů), získání nových údajů o jeskynním systému (disperzivita, střední doba zdržení, objem kanálů) a o vývěrech Jedovnického potoka (v úseku Kaňony – vývěry) a především ověření, zda lze ze stopovacích zkoušek určit charakter zatopených prostor.

Zkoušky proběhly za stálého chladnějšího počasí beze srážek a normálních vodních stavů. Pouze 8. 6. 2005 bylo v dopoledních hodinách slabé mrholení, které nemělo na vodní stavy vliv. Vodní stavy Jedovnického potoka byly vyrovnané (vodní stav byl sledován na instalované měrné lati pod vývěry Jedovnického potoka a opakovaně měřen).

Metodika

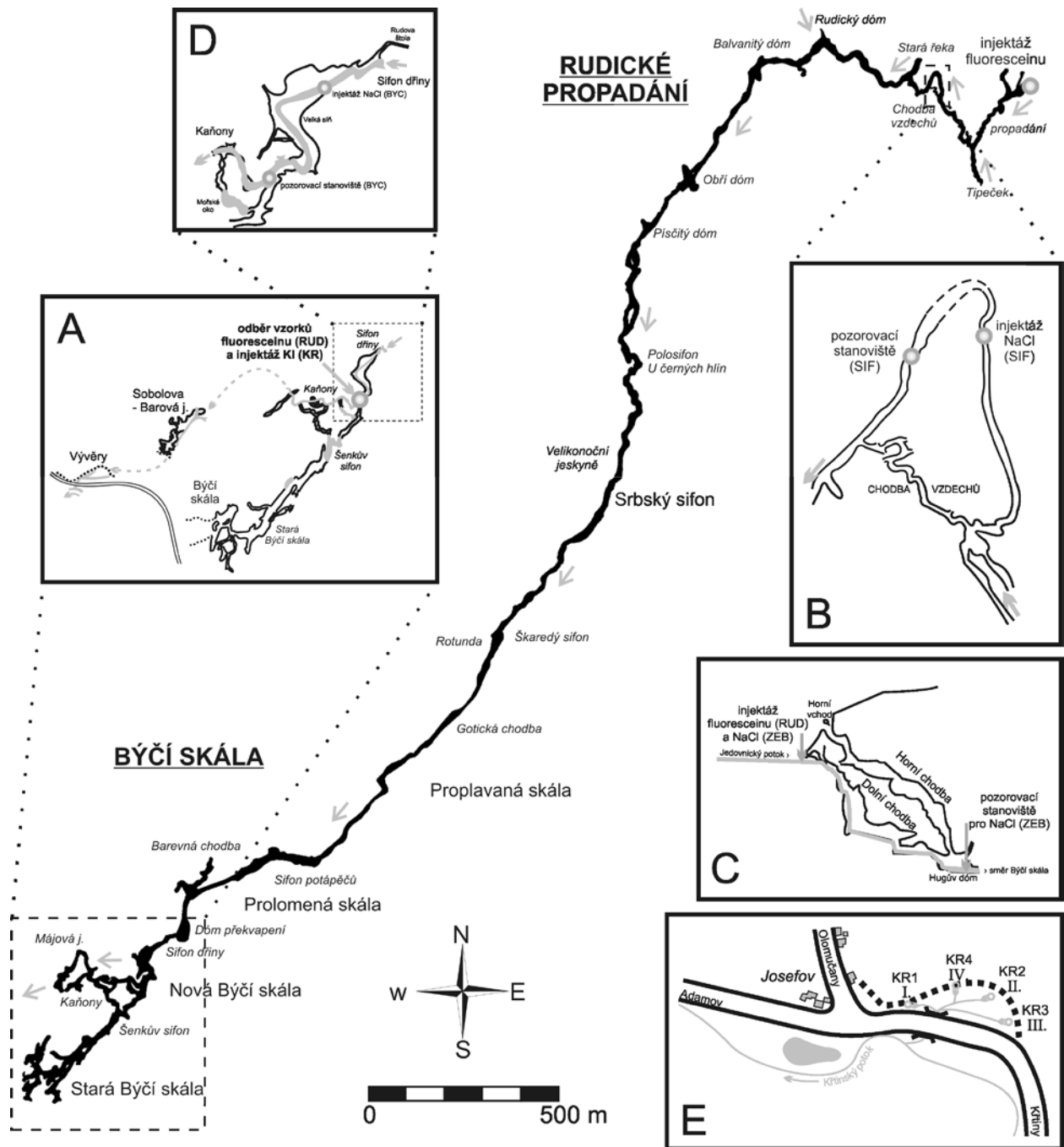
Byly použity 3 druhy stopovačů: NaCl, KI a uranin (Na-fluorescein). Časy injektáže, množství stopovačů i průtoky na sledovaných profilech uvádí tab. 1.

Průtok byl měřen chemickou integrační metodou. Měření se zakládá na principu dokonalého ředění známého

množství látky vodou toku z čehož lze dobře určit průtok. Měření se provádí následovně: do toku je přidáno přesně navážené množství NaCl rozpuštěné ve vodě. Ve vzdálenosti desítek metrů po proudu se měří konduktivita vody toku v intervalu 5 s. Tím je získána průběhová křivka konduktivity. Proveďte se několikastupňová kalibrace mezi koncentrací NaCl a konduktivitou (vysoký koeficient korelace, často 0,999). Z míry ředění NaCl lze určit průtok toku. Detaily metody uvádí např. Ouhřabka (1992) a Zeman (1999).

Všechny zkoušky byly pojaty jako kvantitativní. Takto prováděné zkoušky jsou založeny na dostatečné četnosti odběrů vzorků vod v kombinaci s měřením průtoků jak v místě injektáže, tak v místě odběrů vzorků. Díky tomu mohou být vcelku spolehlivě určeny průnikové křivky a na jejich základě lze získat informace o proudění podzemní vody a charakteru krasových kanálů. Metodiku zkoušek podrobněji popisuje Field (2002).

Vzorky vody z hlavní stopovací zkoušky byly analyzovány na obsah uraninu na fluorimetru Perkin-Elmer 203 (metodika viz Zeman & Bruthans 2002). Obsah KI byl stanoven za použití kombinované iodidové selektivní elektrody a pH/mV metru pH330i od fy WTW podle metodiky Kobrové (1983). Všechny analýzy byly provedeny na PřF UK. U stopovacích zkoušek s NaCl byly koncentrace chloridů sledovány pomocí konduktivity a kalibrace byla provedena na místě. Průnikové křivky stopovače byly vyhodnoceny programem Qtracer2, který na jejich základě stanovuje parametry krasového kanálu. Program vyhodnocuje parametry z průběhu průnikové křivky pomocí vztahů vycházejících z časových úseků po první objevení, pík, těžiště křivky a ocasovou hranu, koncentrace stopovače a skutečné případně opravené vzdálenosti místa injektáže a vzorkování (sledování) (viz Field, 2002).



Obr. 1: Schématický přehled stopovacích pokusů jeskyní Rudické propadání – Býčí skála:

- A.) Zjednodušená mapa vývěrové části Jedovnického potoka s vyznačením stanoviště odběrů vzorků fluoresceinu a injektáže KI – RUD a KR (náčrt bez měřítka)
 - B.) Schématický náčrt sifonu pod Chodbou vzdechů v Rudickém propadání s vyznačením stanovišť dílčí stopovací zkoušky – SIF (náčrt bez měřítka)
 - C.) Schématický řez propadáním Jedovnického potoka s vyznačením stanovišť dílčí stopovací zkoušky – RUD a ZEB (náčrt bez měřítka)
 - D.) Schématický náčrt části Nové Býčí skály s vyznačením stanovišť dílčí stopovací zkoušky - BYC (náčrt bez měřítka)
 - E.) Zjednodušený náčrt vývěrů Jedovnického potoka s označením vývěrů - odběrů vzorků KI – zkouška KR1-4 (náčrt bez měřítka)
- Obrázky upraveny a zjednodušeny podle Obrové (in Musil ed. 1993), Burkhardta (1953) a Hypra (ed. 1997 - 2005)

Fig. 1: Schematic maps of the tracer tests in the Rudické propadání - Býčí skála cave system:

- A.) Schematic map of the Jedovnický brook resurgences and the Nová Býčí skála cave (RUD and KR)
- B.) Schematic map of siphon situated below the Chodba vzdechů crawl passage (SIF)
- C.) Schematic section of the Rudické propadání Cave (RUD and ZEB)
- D.) Schematic map of the part Nová Býčí skála Cave (BYC)
- E.) Schematic map of the Jedovnický brook resurgences (KR)

Provedené stopovací zkoušky a výsledky

Celkem bylo provedeno 5 stopovacích zkoušek. První hlavní byla provedena v úseku Rudické propadání – Kaňony v Býčí skále (označení RUD). Injektáž byla provedena těsně nad ponorem potoka jednorázovým vylitím uraninu (Na-fluoresceinu) a odběr vzorků probíhal z volného toku nad Kaňony v Nové Býčí skále (viz obr. 1A). Injektáž uraninu proběhla 9. 6. 2005 v 11:30 do Jedovnického potoka přímo nad ponorem. Druhá stopovací zkouška se zaměřila na úsek Kaňony v Býčí Skále – vývěry Jedovnického potoka u Josefova (viz obr. 1A a 1E). Stopovačem byl KI a ruční odběry probíhaly ze všech jednotlivých vývěrů (číslování vývěrů bylo odvozeno z Burkhardta 1953, označení zkoušky KR a jednotlivé vývěry jsou označeny doplněním arabské číslice).

Další dílčí zkoušky byly prováděny pro zpřesnění typických „signálů“ a pro zjištění geometrie zatopených prostor. Pro všechny tyto zkoušky byl použit stopovač NaCl. Jedna stopovací zkouška byla prováděna v „kaskádách“ Rudického propadání – injektáž provedena těsně nad ponorem a konduktivita byla měřena v odtoku z Hugova domu (viz obr. 1C) – označení ZEB. Další se zaměřila na sifon pod Chodbou vzdechů (délka cca 60 m) – označení SIF. Injektáž byla provedena do volného toku těsně před sifonem a pozorovací stanoviště v odtoku ze sifonu (viz obr. 1B). Poslední zkouška sledovala volný tok ve Velké síni v Nové Býčí skále (od Sifonu dřiny ke Kaňonům – cca 90 m) – označení BYC (viz obr. 1D).

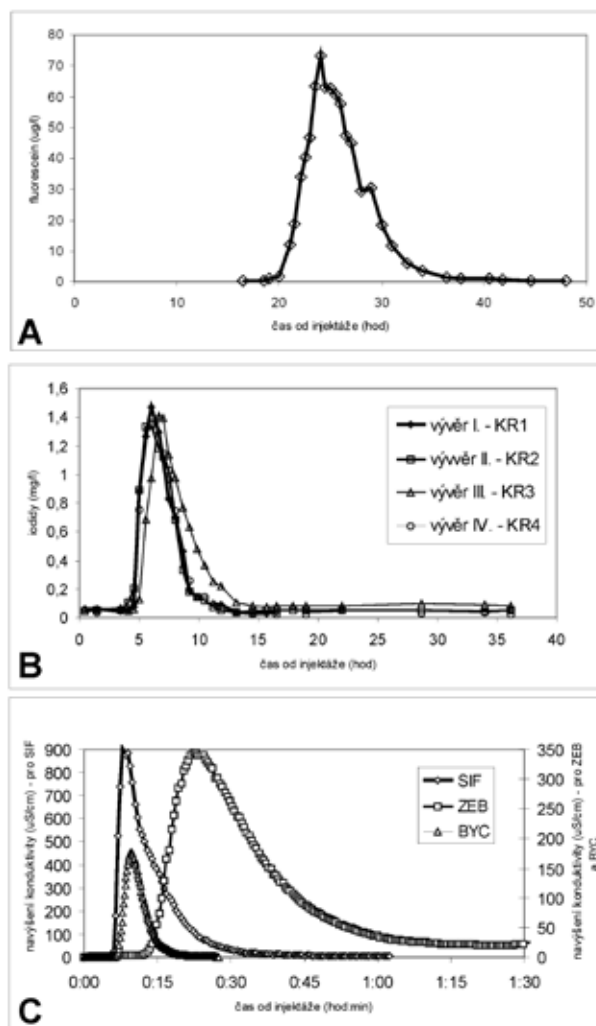
Průnikové křivky jednotlivých zkoušek představuje obr. 2. Získané parametry ze stopovacích zkoušek pak uvádí tab. 1. Charakteristiku parametrů uvádí např. Zeman et. al. (2003).

Diskuse výsledků

Získané doby proudění se celkem dobře shodují s výsledky Bukhardta (1953), který prováděl stopovací zkoušky za obdobných vodních stavů. Celkový objem zatopených prostor v jeskyním systému Rudické propadání–Býčí Skála lze za daného vodního stavu odhadnout na 7000 m³ (opraveno na postupné zvyšování průtoku jeskyní). K tomuto objemu významně přispívá zejména vývěrová část jeskynního systému (celkem 2600 m³).

Střední rychlost proudění je uměrná charakteru kanálu od 71 m.hod⁻¹ (u velkých zatopených sifonů) po 480 m.hod⁻¹ (u volného toku). Podélná disperzivita souvisí s nerovnoměrností proudění krasovými kanály – kolísá od 0,98 do 18,7 m. Vysoké číslo naznačuje velký rozdíl v rychlostech proudění vody. Dochází k tomu zřejmě především v místech, kde se voda zdržuje mnohem déle díky rozlehlosti zatopeného kanálu často s velkým množstvím hrubozrnných klastických materiálů, kde může docházet k dočasnému zachycení stopovače. Naopak nízké hodnoty disperzivity mají volné toky s malými rozdíly rychlostí proudění. Pecletovo číslo ve všech stopovacích zkouškách dokazuje očekávanou advekci jako převládající transportní proces krasovým kanálem.

Mezi Kaňony v Býčí skále a vývěry Jedovnického potoka pravděpodobně přitéká do podzemního toku okolo 10–15 l.s⁻¹ autochtonních vod (nárůst průtoku v tomto úse-



Obr. 2: Průnikové křivky stopovacích zkoušek
 A.) Průniková křivka koncentrace uraninu (Na-fluoresceinu) na odběrném místě nad Kaňony v Nové Býčí skále.
 B.) Průnikové křivky koncentrací KI na jednotlivých vývěrech Jedovnického potoka (číslování viz obr. 1E).
 C.) Průnikové křivky konduktivity při dílčích stopovacích zkouškách (SIF – sifon po Chodbou vzdechů, ZEB – „Kaskády“ v propadání, BYC – volný tok v Nové Býčí skále).

Fig. 2: Breakthrough curves at monitored sites
 A.) Uranine dye content (sampled on the Kaňony corridor in the Býčí skála Cave).
 B.) Breakthrough curves at monitored resurgences of the Jedovnický brook – iodide content (numbers in Fig. 1E).
 C.) Fig. 4: Electrical conductivities measured in: Siphon situated below the Chodba vzdechů crawl passage (SIF), “Kaskády” in the Rudické propadání Cave (ZEB) and stream in the Nová Býčí skála Cave (BYC).

ku ze 71 až 73 l.s⁻¹ na 86 l.s⁻¹). Tento závěr je však nutné ověřit dalším podrobnějším měřením průtoků. K přítokům autochtonních vod dochází ještě před rozdělením podzemního toku do čtyř samostatných vývěrů. Ve všech čtyřech vývěrech se totiž objevily stejně vysoké koncentrace jodidů, což dokládá, že všechny vývěry se rozdělují ze stejného zdroje po přítoku autochtonních vod. Průběhové křivky ve vývěrech I., II. a IV. jsou téměř identické. V případě vývěru III. je průběhová křivka zpožděna oproti ostatním o cca 1 hodinu, což při daném průtoku odpovídá většimu

úsek	„kaskády“ v Dolní chodbě	sifon pod Chodbou vzdechů	volný tok v Nové Býčí skále	propadání - Kaňony	Kaňony - vývěry				
					ZEB	SIF	BYC	RUD	KR1
Sledovaný profil	ZEB	SIF	BYC	RUD	KR1	KR2	KR3	KR4	KRsum
Průtok na bodě sledování [l.s ⁻¹]	40	40	73	71	7	37	39	3	86
Stopovač	NaCl	NaCl	NaCl	uranin	KI	KI	KI	KI	KI
Množství [kg]	10	10	2	0	2	2	2	2	2
Čas injektáže	8.6.	8.6.	9.6.	9.6.	10.6.	10.6.	10.6.	10.6.	10.6.
	16:30	13:00	18:10	11:30	4:00	4:00	4:00	4:00	4:00
Skutečná délka dráhy proudění [m]	120	60	90	5400	855	795	750	840	
Čas prvního objevení [hod]	0	0	0	19	5	5	5	5	
Čas maximální koncentrace [hod]	0	0	0	24	6	6	7	6	
Střední doba zdržení [hod]	0	0	0	26	7	7	11	7	
Střední rychlost proudění [m.hod ⁻¹]	210	253	478	208	126	119	71	124	
Maximální rychlost proud. [m.hod ⁻¹]	571	600	900	284	171	173	150	168	
Podélná disperzivita [m]	7	4	0	19	5	8	10	7	
Pecletovo číslo [-]	18	16	91	290	170	99	77	116	
Objem kanálu [m ³]	82	34	49	6640	170	890	1470	73	2600
Průměrná plocha průtoč. prof. [m ²]	0	0	0	1	0	1	2	0	4
Návratnost stopovače [%]	103	97	100	111	7	36	53	3	99

Tab. 1 – Parametry a výsledky stopovacích zkoušek (vypočteno pomocí programu Qtracer2). Délka dráhy proudění je skutečná délka nerovného průběhu chodeb, nikoli přímá spojnice mezi místem injektáže a měření.

Tab. 1 – Parameters and results of tracer tests in the Rudické propadání - Býčí skála cave system calculated under using of Qtracer2.

objemu kanálu oproti ostatním o cca 140 m³ (po oddělení kanálu od zbylých tří).

Největším problémem při stopovacích zkouškách bylo měření průtoků. Nepřesnosti v měření průtoků dosáhly na některých profilech až ±20 % a negativně ovlivnily stanovení návratnosti stopovače (97–111 %, přitom nejvyšší reálná hodnota je 100%).

Stopovací zkoušky provedené na krátkých úsecích s různým charakterem proudění (vodopády s jezery – ZEB, sifon – SIF, běhutý tok – BYC) ukázaly, že nelze dobře rozpoznat charakter prostor jen na základě průnikové křivky stopovače. Za nejlepší parametr lze považovat především průměrná plocha průtočného profilu kanálu pomocí kterého lze do určité míry rozpoznat převážně zatopené chodby (úsek Kaňony - vývěry s plochou 4 m²) od volného toku (úsek Rudické propadání – Kaňony 1,2 m²). Krátké sifony vyplněné štěrkem mohou naproti tomu mít jen malý objem a omočený profil (sifon pod Chodbou vzdechů má objem 34 m³ a plochu 0,6 m²).

Poděkování

Chtěli bychom poděkovat Ivanu Balákovi za pomoc při realizaci stopovacích zkoušek, Jiřímu Svozilovi a ZO ČSS 6-01 Býčí skála za poskytnutí zázemí a konzultace místní problematiky a v neposlední řadě Nikole Jurkové, Tomáši Kuchovskému a Antonínu Tůmovi.

Literatura

Burkhardt, R. (1953): Hydrografie Jedovnického potoka v Moravském krasu. – Čs. kras, VI.: 41 – 58. Brno.
 Burkhardt, R. (1959): Problém ponorného Jedovnického potoka v Moravském krasu. – Čs. kras, XII.: 85 – 99. Brno.
 Hypr, M. ed. (1997–2005): Mapa jeskyně Býčí skála a Sobolova-Barová. – http://www.byciskala.cz/mapa/full_map.html
 Field, M. (2002): The QTRACER2 program for Tracer Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other hydrologic Systems. – U.S. Environmental protection agency hypertext multimedia publication in the Internet at <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=54930>.

Další podrobnější informace o hydrografii a charakteru krasových kanálů podzemního Jedovnického potoka by mělo přinést plánované detailnější sledování, včetně určení dosud známých i neznámých drobných přítoků, resp. odtoků, do aktivního toku.

Závěr

Provedené stopovací zkoušky přinesly nové informace o době zdržení toku Jedovnického potoka v podzemním systému. Za normálních vodních stavů se vody ponořené v Rudické propadání objeví ve vývěrech po cca 30 hodinách. Současně s postupovými dobami můžeme za těchto vodních stavů objem zatopených prostor odhadnout na 7000 m³, při čemž velkou část představuje vývěrová část systému (2600 m³). Ve vývěrové části byl potvrzen nezanedbatelný přítok autochtonních vod. Dílčí stopovací zkoušky dokázaly, že pouze na základě tvaru průnikových křivek nelze přesněji určit charakter krasového kanálu – pouze zprostředkovaně podle některých dopočtených parametrů.

- Kobrová, M. (1983): Metody chemické analýzy vod. – ÚÚG. 200 str. Praha.
- Musil, R. ed. (1993): Moravský kras – Labyrinty poznání. – GEOprogram. 336 str. Adamov.
- Ouhřabka, V. (1992): Hydrogeologie krystalických vápenců v horním povodí Moravy pod Králickým Sněžníkem. – MS, Diplomová práce. PřF UK. Praha. 81str.
- Zeman, O. (1999) Hydrogeologie jižní a východní části Českého krasu. – MS, Diplomová práce. PřF UK. Praha. 123str.
- Zeman, O. – Bruthans, J. (2002): Stopovací zkouška ze systému Lopače a nové poznatky o ostrovsko-vilémovických vodách. – Speleofórum 2002: 24-28. Brno
- Zeman, O. – Bruthans, J. – Vojtěchovská, A. (2003): Stopovací zkoušky v krasu skupiny Branné v Rychlebských horách. – Geol. výzk. Mor. Slez. v r. 2002: 102-105. Brno