

# Stopovací zkoušky na krasovém systému Zrcadlová koza u Turnova (písčité vápence jizerského souvrství)

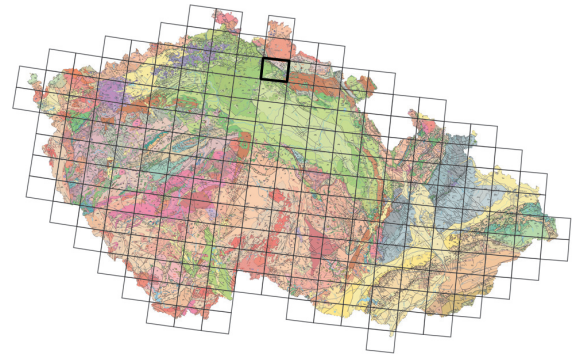
Tracer tests in karst system of Zrcadlová koza near Turnov (sandy limestones of the Jizera Formation)

MARTIN PADĚRA

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky,  
Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, Albertov 6,  
128 43 Praha 2; martin.padera@centrum.cz

**Key words:** tracer test, karst, Bohemian Cretaceous Basin, breakthrough curve

**Summary:** A series of 4 repeated tracer tests was carried out at never before investigated area of Zrcadlová koza near the town of Turnov (Fig. 1). This area consists of a single sinkhole located in a small stream and several springs above and below the path bordering the left bank of the Jizera River. A group of small springs and the main spring Pod Myšinou occur in the study area. In one of the tests a special technique was used that enabled a surface diversion of water normally falling into the local karst system. As shown in Fig. 2, plastic sheet along the yellow line was used to drain the surface water down the valley to reach the Jizera River, thus preventing infiltration into the karst system. Using this technique, the whole karst system temporarily dried up, and then was again flooded so that the flow into a sinkhole could have been fully artificially controlled. Flow rates during the tests ranged from 1.1–2.3 l/s for the sinkhole, and 0.3–1.7 l/s in the main spring Pod Myšinou. The maximum flow velocities ranged between 130–350 m/h, mean flow velocities between 90–160 m/h. The estimated volume of the flooded part of the system corresponds to 12–23 m<sup>3</sup>, depending on the current flow conditions. This calculation applies to



(03-32 Jablonec nad Nisou)

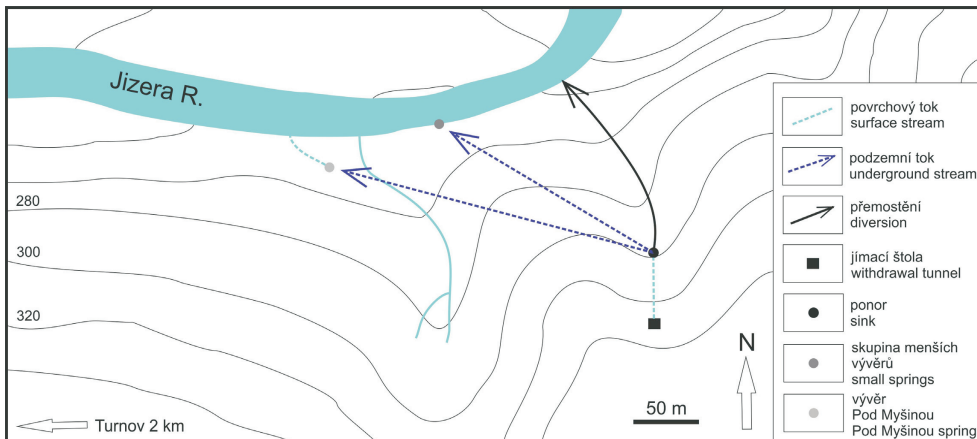
the mean residence time, which is related to a 50 % tracer recovery. Dispersivity (1.7–2.5) increased with increasing flow rate indicating dominating advection transport, while the Peclet number has fallen (232-138). Complete results are shown in Table 1. It turned out that the tracer recovery and its concentration depend on the flow rate, and on the volume of pore spaces in individual vadose and phreatic zones above and below the lowest water table in the system. Bimodal breakthrough curve obtained, due to the use of a special technique, which is described above, allows to detect or locate bifurcation in the system. Otherwise, this bifurcation would not be detected and located. Results of tracer test showed high flow velocity in the Jizera Formation in this area, and the existence of karst conduits in this important aquifer.

Zájmové území se nachází na levém břehu řeky Jizery, asi 2 km sv. od Turnova, naproti obci Dolánky u Turnova (obr. 1) a náleží do turnovského krasu (vymezení a charakteristika viz Bruthans 2006). Jevy plně odpovídají moderní definici krasových jevů (Bruthans et al. 2001). Krasové jevy vznikají v jemnozrnných vápničitých pískovcích a písčitéch vápencích jizerského souvrství (obsahy karbonátu 21–77 %, v průměru 55 % CaCO<sub>3</sub> na základě analýz čtrnácti jader odebraných z povrchových výchozů, J. Bruthans, úst. sdělení 2014). Jizerské souvrství je významným kolektorem v této oblasti s krasovou pórozitou.

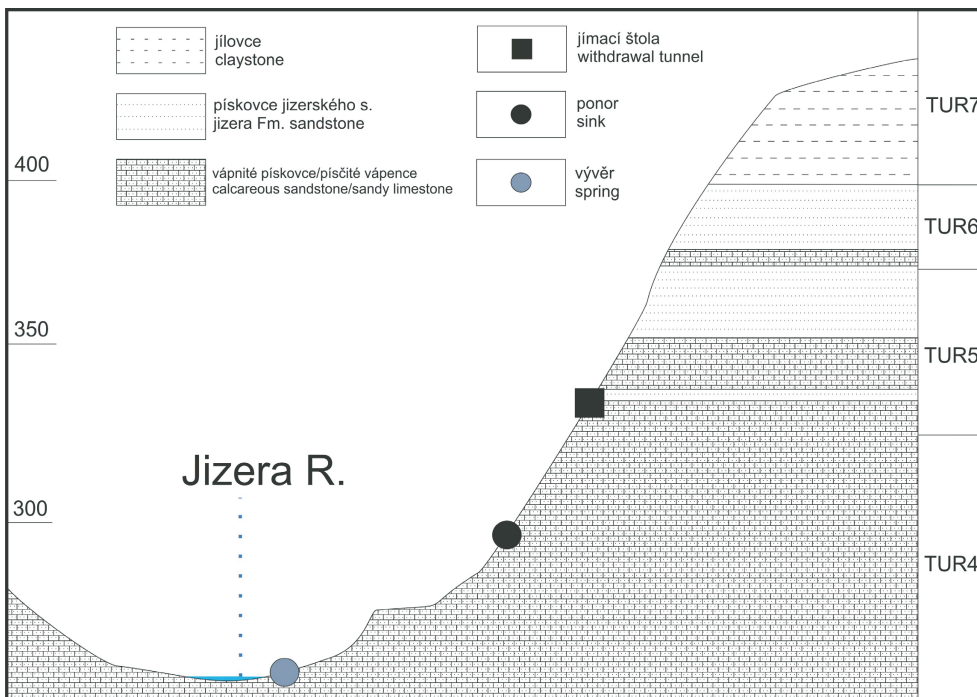
V nadloží jizerského souvrství se nachází 10–20 m mocná vrstva vápničitých jíílů (obr. 2), tvořících izolátor a v jejím nadloží křemité pískovce coniacu, bez vápničitého tmelu tvořící kolektor s puklino-průlinovou pórozitou. Voda coniackého kolektoru je výrazně nenasycená CaCO<sub>3</sub> (Bruthans et al. 2001, Bruthans 2006). Studovaný krasový systém sestává z jednoho ponoru v korytě drobného bezejmenného toku vytékajícího z vodovodní štol Šlejferna, která jímá podzemní vodu pro Turnov, a z několika vý-

věřů podzemní vody pod i nad cestou lemující levý břeh řeky Jizery. Hlavní vývěř Pod Myšinou (50° 36' 2.230 N, 15° 10' 42.422 E) je nejvíce vzdálený od ponoru. Další drobné vývěře se otvírají za vyššího vodního stavu Jizery přímo do řeky, za nižšího jsou patrné jako malé vývěře z břehu první centimetry nad hladinou řeky (50.6009856 N, 15.1802961 E). Přímá vzdálenost ponoru a pramene Pod Myšinou je 230 m. Štola Šlejferna jímá podzemní vodu z báze coniacových kvádrových křemenných pískovců teplického souvrství. Tok ze štol se po překonání podložních jíílů ztrácí ve vápničitých horninách jizerského souvrství. Charakteristiku hornin a kolektorů uvádí Krásný et al. (2012) a Rapprich et al. (2013). Jádro horniny, odvrtné ze skalního výchozu jizerského souvrství 5 m nad pramenem Pod Myšinou, vykázalo po loužení v HCl okolo 65 % rozpustných součástí (F. Balák, ústní sdělení).

Cílem této práce bylo pomocí kvantitativních stopovacích zkoušek charakterizovat proudění a krasové kanály jizerského souvrství na levém břehu Jizery. Pro získání detailnějších informací bylo cílem jedné ze zkoušek i umělé



Obr. 1. Detailní situace lokality / Fig. 1. Locality in detail.



Obr. 2. Geologický řez / Fig. 2. Geological vertical section.

ovlivnění přítoku do ponoru díky odvedení vody povrchovým korytem do řeky.

## Metodika

Stopovací zkoušky byly provedeny podle metodiky Fielda (2002). Jako stopovač bylo při každé zkoušce použito 2 kg NaCl, množství dostatečné pro detekci přístroji a zároveň dostatečně nízké, aby negativně neovlivnilo prostředí. Stopovač rozpuštěný ve vodě byl vždy injektován přímo v místě ponoru. Před každou zkouškou a po ní byl při ponoru i vývěru změřen opakovaně průtok (Q) pomocí kalibrovaných nádob o objemu (V) 10 l naplněné za čas (t). Skutečná délka krasového kanálu byla odhadnuta jako 1,5násobek přímé vzdálenosti ponor-pramen, tedy přibližně 345 metrů (Field 2002), protože střední skutečná délka krasových kanálů odpovídá zhruba 1,5násobku přímé vzdálenosti. Koncentrace stopovače byla zaznamenávána pomocí konduktivity. Použit byl jak konduktometr s auto-

matickým záznamem Cond 3310 (WTW, Německo) s přesností měření 0,5 % a frekvencí automatického záznamu 5 minut, tak i manuální GLF 100 (Greisinger, Německo) s přesností měření 1,5 % a frekvencí manuálních měření 5–15 min. Vztah mezi nárůstem koncentrace NaCl ve vodě a nárůstem konduktivity byl před zkouškou určen z terénní kalibrace. Měření probíhalo od injektáže stopovače až po návrat konduktivity na požadovou hodnotu. Výsledky zkoušek byly zpracovány pomocí programu Qtracer2 (Field 2002).

## Popis zkoušek

První dvě zkoušky Z1 a Z2 byly provedeny za vzájemně velmi podobných vodních stavů a přirozené situace, kdy voda volně vtékala ponorem do systému a stejně i vytékala (8.11.2013 a 23.11.2013). Při zkoušce Z3 (2.3.2014) byl průtok na ponoru přibližně poloviční (1,2 l/s, viz tab. 1). Pomocí igelitové fólie byla voda dočasně svedena korytem

Tabulka 1. Výsledky stopovacích zkoušek / Table 1. Tracer tests results

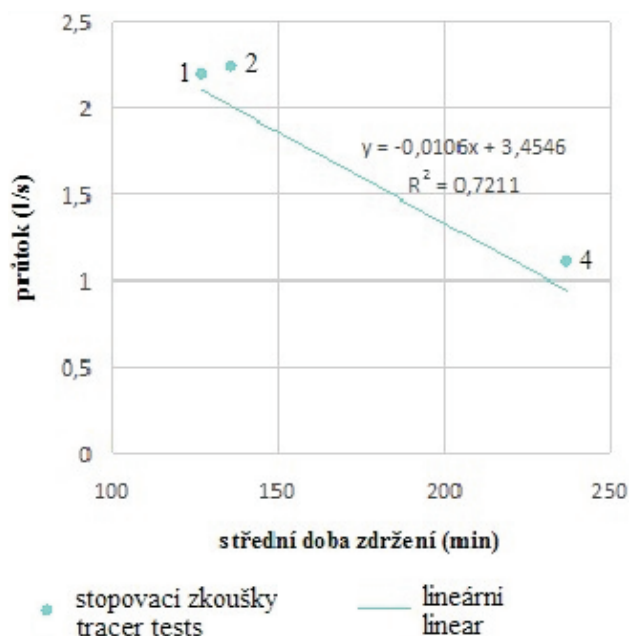
zkouška / Test	Z1 8.11.2013	Z2 23.11.2013	Z3 2.3.2014	Z4 31.3.2014
průtok ponor / discharge sink (l/s)	2,2	2,25	1,2	1,1
vydatnost vývěru / discharge main spring (l/s)	1,6	1,7	0,5	0,3
pozařová konduktivita / background conductivity (μS/cm)	381	376	365	393
max. konduktivita / max. conductivity (μS/cm)	854	822	533	701
čas prvního objevení stopovače / tracer first arrival (min)	87	85	59	165
střední doba zdržení / mean residence time (min)	127	136	167	237
maximální rychlost proudění / max. travel speed (m/h)	238	244	351	125
střední rychlost proudění / mean travel speed (m/h)	163	152	124	87
návrat konduktivity na pozadí / background recovery (min)	255	315	323	405
disperzivita / dispersivity (m)	2	2,5	1,5	1,7
Pecletovo číslo / Peclet number	171	138	232	201
objem systému / system volume (m <sup>3</sup> )	12,2	13,8	17	22,7
návratnost stopovače / tracer recovery (%)	46,7	49,4	25,9	56,1

mimo ponor až do řeky Jizery, aby se zabránilo infiltraci vody do ponorů a systém kanálů se co nejvíce vydrénoval. K tomuto stavu periodicky dochází samovolně, když vodovodní štola jímá veškerou vodu a vysychá tak i ponor Pod Myšinou (J. Mertlík, úst. sděl.). Přítok povrchové vody do ponoru byl přerušen na 8 hodin. Poté byla fólie odstraněna a okamžitě injektován stopovač do vody, která začala vnikat do ponoru. Zkouška Z4 proběhla stejně jako první dvě zkoušky, ale opět s asi polovičním průtokem na ponoru oproti zkouškám Z1 a Z2 vlivem nižšího vodního stavu v potoce, ze kterého voda do systému vtéká (31.3.2014; viz. tab.1).

## Výsledky

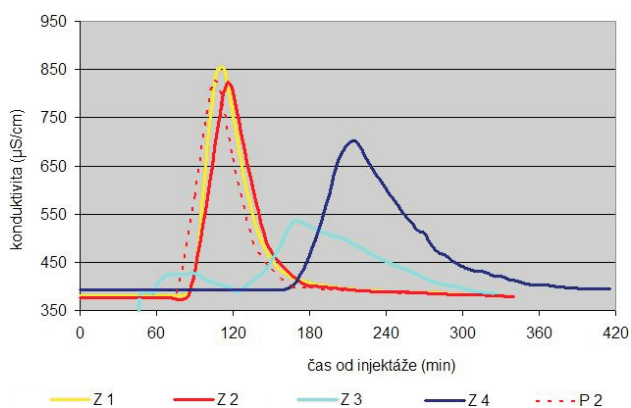
Množství vody tekoucí z pozorovaného systému do skupiny menších vývěrů se během zkoušek pohybovalo v rozmezí 23–70 % celkového množství vody, která do systému při ponoru pronikala a v hlavním vývěru Pod Myšinou vytékala. Zde je vhodné zmínit, že vývěr Pod Myšinou je nejvýše situovaný (asi 2 m nad hladinou řeky), takže odvádí jen tu část vody ze systému, pro kterou kapacitně nestačí drobné vývěry a průsaky na břehu řeky. Je pravděpodobné, že vydatnost menších vývěrů se mění po říčních povodních díky erozi a naopak vlivem ukládání sedimentu na břehu řeky. Mezi těmito menšími vývěry a hlavním vývěrem Pod Myšinou bylo při zkoušce Z2 naměřeno zpoždění objevení stopovače cca 10 minut (znázorněno na obr. 4). Následující výsledky, zobrazené v tab. 1 a na obr. 3 a 4, jsou vztaženy jen k hlavnímu vývěru Pod Myšinou, protože během ostatních zkoušek byl k dispozici pouze manuální konduktometr GLF 100 (Greisinger, Německo) a drobné vývěry na břehu řeky nemohly být sledovány v dostatečném časovém rozlišení.

Zkoušky Z1 a Z2 poskytly velmi podobné výsledky. K prvnímu objevení stopovače ve vývěru Pod Myšinou do-



Obr. 3. Závislost mezi střední dobou zdržení stopovače a průtokem v systému. Zkouška Z3 není zobrazena, protože probíhala za proměnlivého průtoku a měla jiný charakter než ostatní zkoušky / Fig. 3. Dependence of mean residence time on the flow rate. Test Z3 is not displayed. It took place during variable flow conditions and had a different character than the other tests.

šlo po 87, resp. 85 minutách, maximální koncentrace stopovače nastala po 112, resp. 115 minutách a poté konduktivita prudce klesala. Mohlo by jít o přímou lineární závislost (obr. 3), ovšem nárůst střední doby zdržení se zvýšením průtoku u zkoušky Z2 tomu nenasvědčuje. Maximální rychlost proudění se pohybuje mezi 130–350 m/h, střední rychlost proudění 90–160 m/h a odhadovaný objem zatopených částí systému je na základě výsledků z programu Qtracer 12–23 m<sup>3</sup>. S rostoucím průtokem systémem se



Obr. 4. Srovnání průnikových křivek ze všech stopovacích zkoušek měřených ve vývěru Pod Myšinou (označené Z s pořadovým číslem zkoušky). Je dobře patrné, že průniková křivka P2, představující měření na skupině malých vývěrů na břehu řeky, se objevuje asi o 10 minut dříve než ve vývěru Pod Myšinou. Při zkoušce Z3 označuje první objevení křivky okamžik, kdy se v jímce vývěru Pod Myšinou objevila voda / Fig. 4. Comparison of breakthrough curves from all tracer tests. P2 represents a measurement from small springs on the river bank. It is clearly seen, that the P2 breakthrough curve appears about 10 minutes earlier than Z2 from the main spring Pod Myšinou. Z3 curve starts, when water appears in the main spring Pod Myšinou.

mírně zvyšovala disperzivita (1,7–2,5), naopak Pecletovo číslo klesalo (232–138).

Zkouška Z3 poskytla díky svému charakteru jiný průběh průnikové křivky než ostatní zkoušky. Voda se ve vývěru Pod Myšinou objevila v malém průtoku v řádu desetin l/s po 47 minutách s nepatrným nárůstem konduktivity na hodnotu 427  $\mu\text{S}/\text{cm}$  oproti pozadí a po 30 minutách začala klesat. Přibližně ve stejnou dobu došlo k nárůstu průtoku na původní hodnotu 1,2 l/s, který byl následován nárůstem konduktivity k druhému, vyššímu maximu v hodnotě 533  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Křivka je proti ostatním zkouškám výrazně plošší, hodnoty konduktivity jsou nižší a návratnost stopovače dosahuje jen 26 %, což je s největší pravděpodobností dáno zvýšeným zachytem značné části stopovače v nenasycené zóně v jemných sedimentech v okolí ponoru při jejich syčení vodou. Bimodální charakter křivky naznačuje, že se v systému může nacházet rozdělení, kdy voda proudí nejprve kratším kanálem s malým objemem, proto jsou průtok i plocha pod křivkou konduktivity nejprve malé. Druhý, vyšší vrchol konduktivity pak představuje průchod stopovače kanálem s větším průtočným profilem i objemem. Za daného průtoku byl časový rozdíl mezi prvním objevením stopovače na vývěru Pod Myšinou a zvýšením průtoku 32 minut, což odpovídá přibližně 2,3  $\text{m}^3$  vody, tedy objemu vody ve větším kanálu v úseku rozdělení. Jak navrhuji Vojtěchovská et al. (2010), objemy spočítané pro celý systém během jednotlivých zkoušek platí pro střední dobu zdržení, vztaženou k okamžiku, kdy je návratnost stopovače 50 %.

Zkouška Z4 proběhla za nižších průtoků. Je patrné, že všechny časy se prodloužily. Maximální hodnoty konduktivity jsou nižší, což je způsobeno větším rozptylem stopovače vzhledem k jeho delší době zdržení v systému (křivka je širší).

## Závěr

Výsledky provedených stopovacích zkoušek jsou dalším důkazem o velké rychlosti proudění vody v jizerském souvrství v oblasti turnovského krasu a dokazují existenci krasových kanálů i na levém břehu řeky Jizery severně od Turnova. Rychlosti jsou srovnatelné s výsledky předchozích stopovacích zkoušek v okolí (např. Bruthans et al. 2011).

Lokalita je vzhledem k malým vzdálenostem mezi ponorem a vývěry a krátké době zdržení vody v podzemí vhodná pro opakované zkoušky a testování metodiky stopovacích zkoušek.

*Poděkování. Chtěl bych poděkovat J. Čurdovi a J. Kadlecovi za velmi podnětné kritické připomínky, které výrazně vylepšily kvalitu textu. J. Mertlíkovi děkuji za upozornění na tuto lokalitu a J. Bruthansovi za pomoc při vyhodnocení výsledků.*

## Literatura

- BRUTHANS, J. (2006): Využití přirozených stopovačů (18O; 3H, freony; SF6) a dalších metod pro zhodnocení doby zdržení vod a charakteru proudění v krasových oblastech ČR). Doktor. disert. práce, 207 str. – Přírodověd. fak. Univ. Karl. v Praze. Praha.
- BRUTHANS, J. – MIKUŠ, P. – SOUKUP, J. – SVĚTLÍK, D. – KAMAS, J. – ZEMAN, O. (2011): Sebeorganizace proudění a porozity v české křídové pánvi: výsledky stopovacích zkoušek a dalších metod. – Zpr. geol. Výzk. v Roce 2010, 233–238.
- BRUTHANS, J. – ZEMAN, O. – VYSOKÁ, H. (2001): Geologie a hydrogeologie Bartošovy pece a okolí. – Speleofórum, 39–44. Praha.
- FIELD, M. (2002): The Qtracer2 Program for Tracer-Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other Hydrologic Systems. – U.S. Env. Protect. Agency, Office Research Develop., Nat. Center Env. Assessment, Washington Office, Washington, DC, EPA/600/R-02/001.
- CHÁB, J. – STRÁNÍK, Z. – ELIÁŠ, M. (2007): Geologická mapa České republiky 1 : 500 000. – Čes. geol. služba. Praha.
- KRÁSNÝ, J. et al. (2012): Podzemní vody České republiky: regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod. – 1143 str. Čes. geol. služba. Praha.
- PADĚRA, M. (2014): Opakované stopovací zkoušky za různých hydraulických podmínek. Bakalářská práce. – Přírodověd. fak. Univ. Karl. v Praze. Praha.
- RAPPRIČH, V., ed. (2013): Základní geologická mapa České republiky 1 : 25 000 s Vysvětlivkami, 03-324 Turnov. – 176 str. Čes. geol. služba. Praha.
- VOJTĚCHOVSKA, A. – BRUTHANS, J. – KREJCA, F. (2010): Comparison of conduit volumes obtained from direct measurements and artificial tracer tests. – J. Cave Karst Studies 72, 3, 156–160.