

## Charakter proudění a střední doba zdržení vody v nenasurované zóně krasu (Ochozská jeskyně, Moravský kras)

### Flow and mean residence time in karst unsaturated zone (Ochoz Cave, Moravian Karst)

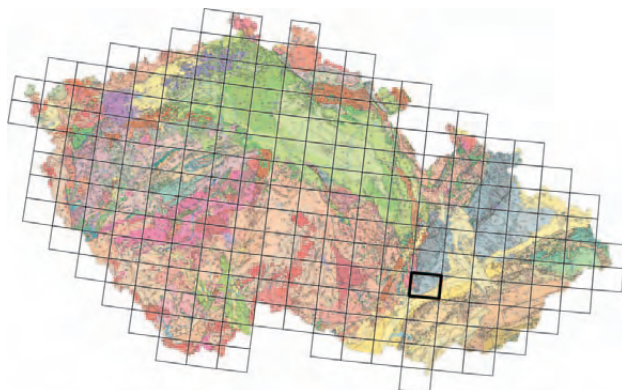
HELENA VYSOKÁ<sup>1,2</sup> – JIŘÍ KAMAS<sup>1</sup> – JIŘÍ BRUTHANS<sup>1</sup> – ZDENKA CHURÁČKOVÁ<sup>1</sup> – MILAN JEŽ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, Albertov 6, 128 43 Praha 2

<sup>2</sup> Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1

<sup>3</sup> Marie Hübnerové 36, 621 00 Brno

(24-41 Vyškov)



**Key words:** *unsaturated zone, residence time, karst, cave seepage, CFC, SF<sub>6</sub>, tritium*

**Abstract:** Flow pattern and residence time in karst unsaturated zone (epikarst) was studied (Ochoz Cave, Moravian Karst, Czech Republic) by means of environmental tracers – <sup>18</sup>O, <sup>3</sup>H, CFC and SF<sub>6</sub>, tracer test, logging of conductivity, discharge, etc. Mean residence time in unsaturated zone is 5–20 years, while in soil zone the residence time is few months. Autochthonous karst springs show similar mean residence time as unsaturated zone seepage. Studied karst unsaturated zone thus probably presents dominant reservoir in whole karst aquifer. Conceptual model of karst unsaturated zone at locality is presented.

Charakter proudění, geochemické procesy a střední doba zdržení v nenasurované zóně jsou v současné době ve světě intenzivně studovány. Nenasurovaná zóna a epikras mají zásadní vliv na geochemické procesy utvářející skapové vody a jejich studium umožňuje přispět k poznání paleoklimatu, paleohydrologie a k ochraně jeskyní a krasových kolektorů před antropogenní kontaminací.

Cílem studia bylo získat poznatky o době zdržení vody a charakteru proudění v nenasurované zóně a srovnat dobu zdržení v nenasurované a satureované zóně.

#### Studované objekty

Pro studium byl vybrán Moravský kras, kde je díky existenci mnoha desítek kilometrů subhorizontálních jeskynních chodeb dobrý přístup na bázi nenasurované zóny krasu. Nenasurovaná zóna byla studována v Ochozské jeskyni v jižní části Moravského krasu (mezi obcemi Ochoz u Brna

a Hostěnice). V jeskyni vyvinuté v devonských vápencích (vilémovické souvrství) dosahuje mocnost nenasurované zóny nad studovanými místy až 70 m. Půdní pokryv nad jeskyní tvoří rendziny o mocnostech 10–50 cm. Území nad jeskyní pokrývá dubo-habrový les. Roční úhrn srážek činí 620 mm. V jeskyni byly na přirozené stopovače vzorkovány především tři skapy: Kužel s relativně stálým průtokem během roku, Beránek aktivně protékající jen za vysokých vodních stavů a E, resp. E2 s variabilním průtokem, protékající po část roku, resp. celoročně.

Studium nenasurované zóny nad Ochozskou jeskyní má dlouhou tradici (např. Himmel 1993; Bruthans et al. 2004; Vysoká et al. 2006 a Kamas 2008).

Pro srovnání byly vzorkovány i autochtonní toky a vývěry v jeskyních i na povrchu Moravského krasu (Konstantní přítok v Amatérské jeskyni; Stará řeka a Kašna v Rudickém propadání a pramen Kaprálka u vývěrů Říčky). Tyto objekty drénují satureovanou zónu a doba zdržení by tak měla být součtem dob zdržení v nenasurované a satureované zóně.

#### Metodika

Na povrchu nad Ochozskou jeskyní bylo do půdy umístěno celkem sedm gravitačních lyzimetrů, a to do hloubek 0, 10, 15 a 60 cm pod povrchem terénu (dále v textu značeno L10, L60). Byl měřen objem infiltrované vody, její pH, konduktivita, teplota, odebírány vzorky na analýzu  $\delta^{18}\text{O}$  (H<sub>2</sub>O). Do jednoho z lyzimetrů byla umístěna tlaková a teplotní čidla s dataloggerem, zaznamenávající v intervalu 30 minut výšku hladiny a teplotu vody infiltrované do půdy. Na základě těchto dat lze určit časové zpoždění mezi infiltrací srážkových vod do půdy a hydraulickou reakcí skapů.

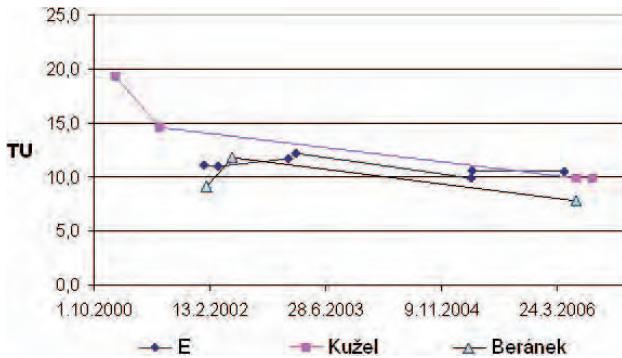
Na skapovém místě E (později E2) probíhalo automatické měření a záznam konduktivity, teploty a průtoku ve skapové vodě bez přístupu vzduchu s krokem 20 minut.

Na srážkoměrné stanici v blízkých Hostěnicích byl denně sledován srážkový úhrn a odebírány vzorky na analýzu  $\delta^{18}\text{O}$  (H<sub>2</sub>O) (slévaný měsíční úhrn).

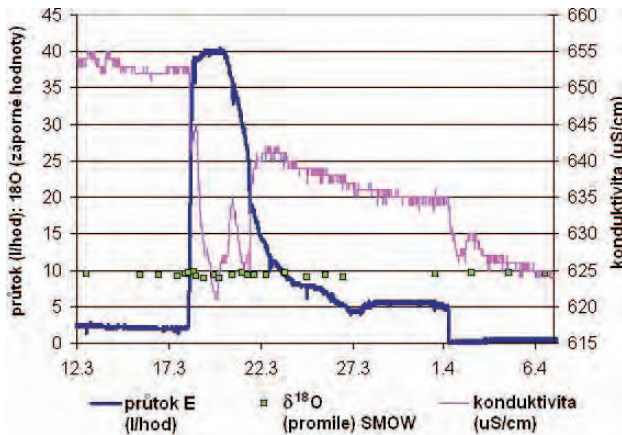
V lednu 2007 byla realizována stopovací zkouška skrze nenasurovanou zónu za použití čtyř fluorescentních stopovačů. Stopovače byly injektovány do jam vykopaných na bázi půdy a zality celkem 60–80 l vody (detaily viz Kamas 2008).

V jeskyni bylo umístěno automatické vzorkovací zařízení ZKZ 1.0, vyvinuté O. Zemanem a J. Kukačkou z PŘF UK ve spolupráci s firmou Narex SAT s.r.o., jež v intervalu třiceti hodin odebíralo vzorky z šesti skapových míst

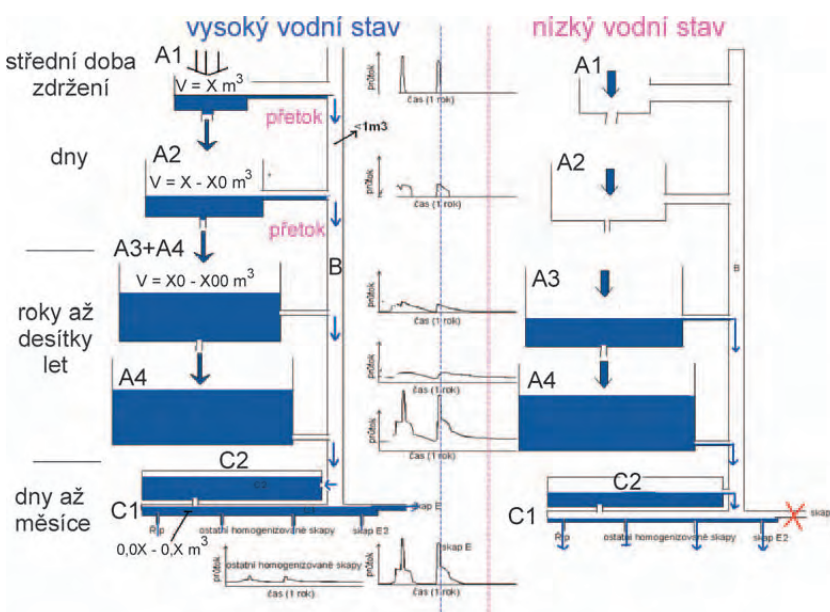
najednou. Manuálně bylo jednou měsíčně vzorkováno dalších 40 skapových míst v jeskyni a byl sledován průtok. K detekci stopovačů byla využita metoda fluorescenční spektrofotometrie – synchroscan (Käss et al. 1998). Analýzu vzorků provedl J. Kamas na fluorimetru Perkin Elmer 750–10S na PřF UK.



Obr. 1. Průběh tritia na skapových místech E, Kužel a Beránek v období 2000–2006.



Obr. 2. Konduktivita, průtok a  $\delta^{18}\text{O}$  na skapovém místě E při velkém tání v roce 2005.



Obr. 3. Model proudění nesaturovanou zónou za vysokého a nízkého vodního stavu.

Pro určení střední doby zdržení byly použity přirozené stopovače: tritium, kyslík [ $\delta^{18}\text{O}$  ( $\text{H}_2\text{O}$ )], freony – 11 ( $\text{CFCl}_3$ ), 12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ), 113 ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$ ) a  $\text{SF}_6$ . Odběr vzorků na freony a  $\text{SF}_6$  proběhl podle metodiky Oстера et al. (1996), jejich obsah byl měřen pomocí plynové chromatografie (GC – ECD Spurenstofflabor, Německo). K výpočtu obsahu freonů a  $\text{SF}_6$  v infiltrované vodě byly užity atmosférické koncentrace přístupné na NOAA (detailed viz Bruthans 2006). Vzorky na analýzu tritia byly odebírány v nepravidelných intervalech v letech 2001 až 2008. Aktivita tritia byla měřena po elektrolytickém nabohacení na kapalinovém scintilačním spektrometru Tri Carb 3170 na PřF UK. Hodnoty  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) změřil F. Buzek na spektrometru Mat Finnigan v laboratoři ČGS. Pro modelování střední doby zdržení pomocí tritia a freonů byl použit program FLOW PC (Maloszewski – Zuber 1996).

## Výsledky a diskuse

Na základě modelování poklesových trendů tritia od roku 2001 do 2008 (obr. 1) vyšla střední doba zdržení molekul vody pro skapové místo E 10–15 let (exponenciální model). Doba zdržení pro další skapová místa vyšla následovně: Kužel 17–20 let, Beránek 5–10 let. Podle freonů a  $\text{SF}_6$  je doba zdržení na skapu E v rozmezí 3–19 let. U skapového místa E, jež bylo jako jediné vzorkováno na tritium i freony, lze z kombinace obou analýz a následného modelování stanovit výslednou dobu zdržení 10–15 let. Jak je zřejmé z relativně stálého signálu  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ve skapové vodě, ani po výrazných táních sněhu a srážkách nepřesahuje podíl přímé infiltrace v celkovém průtoku skapu 15 % (obr. 2). Hydraulická reakce se přitom nesaturovanou zónou šíří během několika desítek hodin, což vede k nárůstu průtoku skapů i o dva řády během prvních dní po srážce či tání.

Doba zdržení v půdě určená podle analýzy kolísání hodnot  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ) v čase nepřesáhla v hloubce 60 cm pod povrchem 8 měsíců a v hloubce 10 cm pod povrchem pak byla kratší než 1 měsíc. Z uvedeného je zřejmé, že zatímco v půdní zóně tráví molekuly vody jen několik měsíců, v epikrasu a hlubší části nesaturované zóny krasu je to 5–20 let.

V případě vývěřů ze saturované zóny byly doby zdržení podle freonů a  $\text{SF}_6$  následující: Konstantní přítok 10–15 let (Bruthans 2006); Stará řeka 13–17 let; Kaprálnka 16–22 let. V případě Kašny v Rudickém propadání vychází z poklesových trendů tritia doba zdržení 18–20 let. Doba zdržení v saturované + nesaturované zóně (vývěry) se tak zásadně neliší od doby zdržení v nesaturované zóně (skapy). Hlavní rezervoár vody v Moravském krasu tak paradoxně může ležet nad regionální hladinou pod-

zemní vody v epikrasu a zavěšených hladinách. Významný podíl epikrasu na celkových zásobách podzemních vod v krasu předpokládají i Perin et al. (2003).

Z průběhu koncentrace fluoresceinu při stopovací zkoušce v letech 2007 a 2008 na skapových místech vyplynulo, že k dotaci rezervoáru v epikrasu dochází jen po několik měsíců v roce. Po přítoku vody na bázi půdy (lyzimetr L15) se uranin objeví ve skapu E2 se zpožděním 25–50 hodin, maximální koncentrace uraninu na E2 nastává 2–4 dny po maximálním průtoku. Malý podíl vody (10 %?) tak sestupuje nesaturovanou zónou velmi rychle, stejně jako hydraulická odezva.

Na základě kombinace použitých metod (průběhy koncentrací přirozených a umělých stopovačů, konduktivity a průtoku skapu, modelování doby zdržení) byl sestaven model proudění skrze nesaturovanou zónu a epikras nad skapovým místem E. Model sestává z celkem šesti rezervoárů s různými objemy a dobami zdržení (viz obr 3.), ukazuje charakter proudění v nesaturované zóně za dvou různých vodních stavů. Průtočnost mezi rezervoáry směrem od povrchu dolů klesá, objem rezervoárů řádově stoupá, společným odtokem jsou přepadové cesty s velmi malým objemem vody. Konduktivita umožňuje určit velmi přesně příchod a dobu trvání přítoku málo mineralizované vody z půdy (A1). O existenci cest proudění, jež vedou vodu z půdy přímo do místa skapu bez většího zdržení (B), svědčí pokles konduktivity v závislosti na zvýšeném průtoku (snížení mineralizace vody díky přítoku malého množství málo mineralizované vody z povrchu). Pomocí uměle injektovaného stopovače sledovaného na několika místech lze usuzovat na aktivaci více druhů rezervoárů nad skapovým místem a mísení vody v nich. Rezervoár vody přímo nad stropem jeskyně (C1) je zavěšenou zvodní nad nepropustnými sintry.

## Závěr

Z výsledků dlouhodobého monitorování hodnot  $\delta^{18}\text{O}$  ( $\text{H}_2\text{O}$ ), aktivity tritia v krasových vodách, odběru freonů a  $\text{SF}_6$  a modelování (Flow PC) vyplývá, že střední doba zdržení v nesaturované zóně (epikrasu) nad Ochozskou jeskyní dosahuje 5–20 let. Naproti tomu v půdě je střední doba zdržení vody pouhých několik měsíců. Doba zdržení v saturované + nesaturované zóně (vývěry) se zásadně neliší od

doby zdržení v nesaturované zóně (skapy). Hlavní rezervoár vody v Moravském krasu tak paradoxně může ležet nad regionální hladinou podzemní vody. Významný podíl epikrasu na celkových zásobách podzemních vod v krasu předpokládají i Perin et al. (2003). Z kombinace výsledků použitých metod byl sestaven konceptuální model proudění skrze nesaturovanou zónu nad skapovým místem E v Ochozské jeskyni.

*Poděkování. Poděkování patří firmě Českomoravský cement, a.s., lom Mokrá, za poskytnutí finančních prostředků. Projekt byl podpořen z projektu GAUK 805 09 a z výzkumného záměru na Univerzitě Karlově v Praze MSM0021620855. Dále bychom chtěli velmi poděkovat členům ZO ČSS Královopolská a studentům a kolegům z Univerzity Karlovy za pomoc v terénu.*

## Literatura

- BRUTHANS, J. (2006): Využití přirozených stopovačů ( $^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{H}$ , freony,  $\text{SF}_6$ ) a dalších metod pro zhodnocení doby zdržení vod a charakteru proudění v krasových oblastech ČR. Disert. práce, 207 s. – Přírodověd. fak. Univ. Karl. Praha.
- BRUTHANS, J. – ZEMAN, O. – JEŽ, M. – HIMMEL, J. – BUZEK, F. – MELKOVÁ, J. – OSTER, H. – GERŠL, M. (2004): Využití přirozených stopovačů ( $^{18}\text{O}$ ,  $^3\text{H}$ , CFCs,  $\text{SF}_6$ ) pro studium proudění a doby zdržení skapových vod a krasových pramenů (Moravský kras). 3. národní speleologický kongres 8.–9.10.2004. Moravský kras. Sloup, 7–13. – Čes. speleol. společ.
- HIMMEL, J. (1993): Roční režim koroze vápenců vlivem infiltrujících srážek v zóně vertikální krasové cirkulace v Moravském krasu. – Speleofórum, 93, 67–72.
- KAMAS, J. (2008): Transport rozpuštěných látek v nesaturované zóně krasu: Studium stabilních izotopů a chemizmu. Diplom. práce. – Přírodověd. fak. Univ. Karl. Praha.
- KÄSS, W. – BEHRENS, H. – HIMMELSBACH, Th. – HÖTZL, H. – HUNKELER, D. – LEIBUNDGUT, C. H. – MOSER, H. – ROSSI, P. – SCHULTZ, H. D. – STOBER, I. – WERNER, A. (1998): Tracer technique in geohydrology. Balkema, Rotterdam, 581.
- MALOSZEWSKI, P. – ZUBER, A. (1996): Lumped parameter models for interpretation of environmental tracer data. In: Manual on mathematical models in isotope hydrology. IAEA-TECDOC-910:9-59. – Int. Atom. Energy Agency. Wien.
- OSTER, H. – SONNTAG, C. – MÜNNICH, K. O. (1996): Groundwater age dating with chlorofluorocarbons. – Water Res., 32, 10, 2989–3001.
- PERIN, J. – JEANNIN, P. Y. – ZWAHLEN, F. (2003): Epikarst storage in a karst aquifer: a conceptual model based on isotopic data, Milandre test site, Switzerland. – J. Hydrol., 279, 106–124.
- VYSOKÁ, H. – ZEMAN, O. – BRUTHANS, J. (2006): Studium skapových vod v Ochozské jeskyni: Překvapivě dlouhá doba zdržení v nesaturované zóně i za extrémních stavů. – Speleofórum, 93.