# TRÍCIUM V ZRÁŽKOVÝCH, POVRCHOVÝCH A PODZEMNÝCH VODÁCH DEMÄNOVSKEJ DOLINY

### TRITIUM IN PRECIPITATION, SURFACE WATERS AND GROUNDWATER IN THE DEMÄNOVSKÁ DOLINA VALLEY

#### Peter Malík, Juraj Michalko, Dagmar Haviarová, Anton Auxt

#### ABSTRACT

A total of 32 sampling sites for regular observation of tritium in Slovak water were established in the Demänovská dolina Cave system and its vicinity in 2011 and 2012. This monitoring, performed at approximately two monthly intervals, included the following water sources; precipitation, surface streams, groundwater in boreholes and springs, and the underground hydrological system with streams, lakes and dripping seepage in the cave system. The area extended from 800 m a. s. l. at the lowermost cave entrance to 2,024 m a. s. l. on Chopok Mt. at the top of the crystalline range. While high variation from 4.0 to 19.1 TU was established in precipitation <sup>3</sup>H, many similarities were noted in waters from the surface, the underground hydrological system, borehole groundwater and cave-system dripping seepage; where <sup>3</sup>H registered 1.5 to 15.9 TU in the entire non-precipitation dataset. No significant differences were observed in the following waters; (1) surface streams from the crystalline mountain range had median values of <sup>3</sup>H 8.3 TU; (2) smaller "autochthonous karstic" surface water streams formed in the valleys adjacent to the main karstic canyon recorded 9.3 TU median value; (3) waters running in the underground karstic system registered 8.7 TU and (4) stagnant waters in the underground karstic system lakes had 9.3 TU. Meanwhile, the groundwater in boreholes (7.4 TU) and springs (8.7 TU) registered slightly different values. The greatest difference was noted in autochthonous seepage waters which circulated slowly through the fissures. Although their <sup>3</sup>H TU median of 8.7 was quite similar, this water was isotopically enriched with  $\delta^{18}$ O -9.8 ‰ and  $\delta^{2}$ H -66.7.

#### **KEY WORDS**

Tritium, precipitation, surface water, groundwater, boreholes, Demänovská dolina Valley, Nízke Tatry Mts.

## KĽÚČOVÉ SLOVÁ

Trícium, zrážkové vody, povrchové vody, podzemná voda, vrty, Demänovská dolina, Nízke Tatry

# ÚVOD

Priaznivé prírodné podmienky dané geologickotektonickou stavbou severozápadných svahov Nízkych Tatier umožnili povrchovému toku Demänovky, Priečneho a Zadnej vody a ich bočným prítokom spolu s účinkami infiltrovaných atmosférických vôd vytvorenie Demänovského jaskynného systému (ďalej aj "DJS"). Rozvoj krasových foriem Demänovskej doliny je sústredený najmä do jej východnej (pravostrannej) časti, medzi Machnatou a Čiernou dolinou. Kras Demänovskej doliny je typom rozčleneného krasu v monoklinálnej štruktúre s dokonale vyvinutými jaskyňami riečneho pôvodu. Geologicky je budovaný strednotriasovými vápencami veporika (Biely ed., 1992;

Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, oddelenie hydrogeológie a geotermálnej energie, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava 11, peter.malik@geology.sk, juraj.michalko@geology.sk

#### Mgr. Dagmar Haviarová, PhD.

Správa slovenských jaskýň – ŠOP SR, Hodžova 11, 031 01 Liptovský Mikuláš, dagmar.haviarova@ssj.sk

RNDr. Anton Auxt

HES-Comgeo, spol. s r. o., Kostiviarska cesta 4, 974 01 Banská Bystrica, anton.auxt@hes-comgeo.sk

RNDr. Peter Malík, CSc., RNDr. Juraj Michalko, CSc.

Biely, Bezák Eds., 1997). Verejnosti je známy najmä dvoma sprístupnenými jaskyňami – Demänovskou ľadovou jaskyňou a Demänovskou jaskyňou slobody. Demänovská ľadová jaskyňa je známa minimálne od stredoveku, Demänovskú jaskyňu slobody objavil v roku 1921 Alois Král a počas prvej dekády po svojom objave niesla meno Chrám slobody (Herich, 2012). Celkovo až 10 jaskýň v tejto oblasti svojou dĺžkou presahuje 1000 m (Herich, Holúbek, 2015). Sú to Demänovská jaskyňa mieru (16 477 m), jaskyňa Štefanová (14 834 m), Demänovská jaskyňa slobody / Chrám slobody (11 117 m), Pustá jaskyňa (6214 m), jaskyňa Okno (2662 m), Demänovská ľadová jaskyňa (2174 m), Demänovská medvedia jaskyňa (1562 m), Suchá jaskyňa (1536 m), jaskyňa Vyvieranie + Vodná cesta (1354 m) a Jaskyňa trosiek / č. 27 (1177 m). Celkovú dĺžku všetkých Demänovských jaskýň udáva Herich a Holúbek (2015) na 63 574 m, dĺžku polygónových ťahov vlastného Demänovského jaskynného systému k dátumu máj 2015 stanovuje na 40 471 m s deniveláciou (výškovým rozpätím) 196 m. Spojenie jaskyne Štefanová (14 834 m) s Demänovským jaskynným systémom bolo doteraz overené len stopovacími skúškami (Haviarová, 2008). V prípade speleologického prepojenia by Demänovský jaskynný systém mohol presiahnuť dĺžku 50 km (Herich, 2012). Úcelený obraz o výnimočnom krase a jaskyniach Demänovskej doliny prezentuje nedávno vydaná monografia Bellu et al. (2014).

Dominantným drenážnym prvkom systému je krasová vyvieračka Vyvieranie v nadmorskej výške 799 m. Časť vôd tejto vyvieračky je zachytená do vodárenského zdroja slúžiaceho na hromadné zásobovanie obyvateľstva pitnou vodou. Ďalší záchyt (podzemný vodárenský zdroj) známy ako Dzúrov prameň, respektíve prameň Štôla, sa nachádza na ľavej strane doliny poniže Demänovskej ľadovej jaskyne (Auxt et al., 2012).

Demänovská dolina sa všeobecne považuje za ukážkovú lokalitu vzájomnej komunikácie povrchových a podzemných vôd pri vstupe povrchových vôd z nekrasovej do krasovej oblasti (Kullman, Hanzel, 1976; Droppa, Klaučo, 1985 a následne Méryová, 1990). Podľa Méryovej (1990) tu vyplýva zložitý režim a obeh podzemných vôd z komplikovanej geologickotektonickej stavby územia, keď sústredené výstupy sú podmienené eleváciou polopriepustných dolomitov spolu s kombinovanými účinkami zlomu V-Z smeru. Intenzívne hydrometrovacie práce v siedmich sériách v snahe postihnúť všetky hydrologické situácie realizovali v období rokov 2011 a 2012 na podzemnej i povrchovej Demänovke Auxt et al. (2012). Výsledky neskôr v odbornej tlači publikovali Malík et al. (2013a, 2013b) pre výsledky hydrometrických meraní a Malík et al. (2016) pre výsledky termometrických meraní. Z povrchových tokov vteká do Demänovky na SV

okraji Lúčok ako jej ľavostranný prítok Priečny potok, nižšie Zadná voda. Prvý ponor Zadnej vody je registrovaný v masíve Stodôlky (839 m n. m.). Podobne aj toky v bočných svahových dolinkách na východ od toku Demänovky (v Pustej, Machnatej, dol. Vyvieranie) i ďalších nižšie položených sa postupne strácajú do podzemných priestorov. Do povrchovej Demänovky dotekajú občasne len vody z dolinky Vyvieranie. Ponárajúce sa alochtónne a autochtónne vody sa krasovými cestami dostávajú do horninového prostredia, v ktorom erozívnymi účinkami vytvorili jaskynný systém. Komunikácia povrchových a podzemných vôd bola na viacerých miestach v Demänovskej doline potvrdená stopovacími skúškami, ktoré sa tu realizovali priebežne od 80. rokov minulého storočia. Ich podrobný prehl'ad prináša Bella et al. (2014).

V rámci realizácie prác projektu "Zlepšenie o Ramsarskú lokalitu – starostlivosti Jaskyne Demänovskej doliny", ktorý bol vypracovaný pracovníkmi Správy slovenských jaskýň na základe výzvy Operačného programu Životné prostredie (číslo výzvy OPZP-PO5-09-1) pre programové obdobie 2007 – 2013 spolufinancovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja a štátneho rozpočtu prebiehalo aj monitorovanie izotopového zloženia vôd v Demänovskej doline. Projekt, s ktorého realizáciou sa začalo v roku 2010 a ktorý bol ukončený v roku 2012, pozostával z dvoch hlavných aktivít; monitoringu ramsarskej lokality a zabezpečenia a spriechodnenia vchodov do jaskýň na lokalite. Hlavnou myšlienkou projektu bolo riešenie problematiky zlepšenia starostlivosti tejto ramsarskej lokality, ktorá si vyžaduje zvýšenú ochranu z hľadiska jej medzinárodného významu ako podzemnej mokrade, z hľadiska ochrany jaskýň v Demänovskej doline ako národných prírodných pamiatok a prírodných pamiatok, ako aj z pohľadu zabezpečenia ochrany krasových vôd využívaných ako zdroj pitnej vody pre Liptovský Mikuláš. Jedným z hlavných cieľov projektu bolo rozšíriť existujúce poznatky o hydrologických a hydrogeologických pomeroch v území, ktoré sú kľúčovými podkladmi pre ochranu jaskynných priestorov a ktoré mali slúžiť aj ako odborné argumenty k manažmentovým opatreniam zameraných na zachovanie priaznivého stavu lokality a pri odborných stanoviskách Správy slovenských jaskýň v rámci územných a stavebných správnych. konaniach spojených s touto lokalitou.

Nosnou časťou projektu bola aktivita "Monitoring ramsarskej lokality", ktorá pozostávala z viacerých špecifických hydrogeologických prác. Ich súčasťou bola realizácia geofyzikálnych meraní pomocou magnetometrie a geoelektrických metód v modifikáciách symetrického odporového profilovania a tzv. vertikálneho elektrického sondovania v priestore Lúčok, ktoré sú v Demänovskej doline považované za kontaktnú zónu medzi horninami kryštalinika a karbonátového mezozoika. Hydrogeologické pomery v tejto časti doliny zatiaľ neboli podrobne preskúmané. Aj preto sa v tejto časti územia realizovali 3 hydrogeologické vrty spolu s hydrodynamickými skúškami pre stanovenie hydraulických parametrov hydrogeologického prostredia. Pre účely stanovenia kvantifikovaných vzťahov pre vytvorenie zrážkovo-odtokového modelu a dlhodobé sledovanie vodného režimu v povodí Demänovky sa v rámci prvej fázy projektu vybudovalo 5 merných objektov na povrchových tokoch a 1 merný objekt v podzemí, na ktorých v čase od 15.10.2010 do 31. 08. 2012 prebiehali kontinuálne merania prietokov. Na tokoch povrchovej a podzemnej Demänovky a ich prítokoch bolo vykonaných 7 sérií úsekových hydrometrovaní počas rozličných vodných stavov. Pre identifikáciu smerov prúdenia podzemných vôd a vzájomných vzťahov medzi povrchovými a podzemnými vodami bolo na lokalite realizovaných 12 stopovacích skúšok za použitia biologického stopovača. Súčasťou monitorovacích prác bolo aj zisťovanie obsahov tzv. environmentálnych izotopov vo vodách povrchových a podzemných tokov, t. j.  $\delta^{18}\,O\;a\,\delta\,D$ stanovenie izotopového zloženia v zrážkových, povrchových a podzemných vodách, ako aj stanovenie objemovej aktivity trícia <sup>3</sup>H ktoré je rádioaktívnym izotopom vodíka vo vode tých istých vzoriek, čo je detailnejšie opísané v predmetnom článku.

### CHARAKTERISTIKA ODBEROVÝCH MIEST A METODIKA HODNOTENIA

Trícium (<sup>3</sup>H, T) je krátkožijúci rádioaktívny izotop vodíka s hmotnostným číslom 3, v jeho jadre sa okrem protónu nachádzajú dva neutróny. Ako taký je prirodzenou súčasťou molekuly vody, čo pri skúmaní vody umožňuje využívať jeho vlastnosti (podobne ako poznatky o  $\delta^2$ H a  $\delta^{18}$ O) pri charakterizovaní priebehu hydrologického cyklu. Vzhľadom na rádioaktivitu a krátky polčas rozpadu sa údaje o objemovej rádioaktivite trícia využívajú na odhad doby zdržania "veku" podzemnej vody, rýchlosti prúdenia, na riešenie problémov pri miešaní vôd i ako prirodzený (Clark, Fritz, 1997), ale aj umelý (Michalko et al., 2003) stopovač. V hydrosfére nachádzame trícium ktoré vzniklo prirodzenou cestou (kozmogénneho a geogénneho pôvodu) a významný podiel tvorí trícium vzniknuté v dôsledku aktivity človeka.

Hlavným zdrojom prirodzeného trícia v hydrosfére je trícium, ktoré vzniká vo vrchných vrstvách atmosféry reakciou atmosférického dusíka s rýchlymi neutrónmi kozmického žiarenia podľa reakcie:

$${}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \to {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{3}_{1}\mathrm{H} \tag{1}$$

Reakciou so vzdušným kyslíkom vytvára vodu:

 $^{3}\text{H} + \text{O}_{2} \rightarrow ^{3}\text{HO}_{2} \rightarrow ^{1}\text{H}^{3}\text{HO}$  (2)

Trícium sa rozpadá na <sup>3</sup>He s polčasom rozpadu 12,43 roka (Clark, Fritz, 1997), najnovšie Mook (2006) a Clark (2015) uvádzajú 12,32 roka. Objemová aktivita trícia sa udáva v tríciových jednotkách ("TU") kde 1 TU predstavuje 1 atóm trícia na 1018 atómov vodíka, používajú sa aj jednotky Bq·l<sup>-1</sup>. Prirodzené obsahy trícia v zrážkach sú nízke, uvádzajú sa v rozsahu od okolo 5 TU (Mook, 2006), po 5 - 10 TU (Kendall, Caldwell in Kendall, McDonnel, 1998). Prirodzená koncentrácia trícia v zrážkach predstavuje určitú rovnováhu medzi jeho produkciou a úbytkami a mení sa v čase i priestore. Vyššie obsahy trícia sú typické pre vyššie zemepisné šírky, severnú pologul'u a letné zrážky. Do úvahy je potrebné brať sezónne variácie, keďže prevažná časť podzemnej vody sa formuje zo zimných zrážok s nižšími obsahmi trícia (Mook, 2006). Úbytky trícia v zrážkach sú spôsobené jednak jeho prirodzeným rozpadom, ale hlavne vypadávaním zrážok – stratami <sup>3</sup>H nad oceánmi.

Pokusy s jadrovými (od 1945), ale najmä termonukleárnymi (od 1951) zbraňami mali za následok vysokú hladinu rýchlych neutrónov v atmosfére, a tak aj enormnú produkciu antropogénneho trícia, ktorého koncentrácia v zrážkach v rokoch 1952 - 1962 dosiahla 1000 až 10 000 TU svrcholom v lete 1963. Táto enormná produkcia bola ukončená zmluvou o testovaní atmosférických zbraní medzi ZSSR a USA a následnom obmedzení pokusov, čínske a francúzske pokusy trvali až do roku 1980. Koncentrácia trícia v atmosfére postupne klesá a v súčasnosti sa blíži odvtedv k prirodzeným hodnotám, hoci produkcia antropogénneho trícia je v dôsledku prevádzky jadrových reaktorov trvalá. Z globálneho hľadiska však ide o bodové zdroje, hoci lokálny vplyv môže byť vysoký. Vrchol z leta roku 1963 predstavuje významný marker.

Geogénne trícium je súčasťou prirodzených rozpadových radov U a Th, zdrojom trícia je tiež rozpad izotopu <sup>6</sup>Li. Takto vzniknuté trícium sa dostáva priamo do podzemnej vody, obvykle sa jeho koncentrácie pohybujú okolo 0,1 - 0,7 TU, v niektorých prípadoch uránových ložísk však môžu dosahovať až 250 TU (Clark, Fritz, 1997).

K datovaniu podzemnej vody na základe poznatkov o koncentrácii trícia možno pristúpiť (Clark, Fritz, 1997) viacerými spôsobmi – je možné sledovať postup vrcholu z roku 1963, vypočítať vek na základe zákona rádioaktívneho rozpadu z údajov o vstupujúcej a vystupujúcej vode, aplikovať exponenciálny model pre vstupujúcu vodu a vykonať analýzu časových sérií. Stanovenie obsahu trícia vo vodách napomáha aj pri riešení otázok rozdelenia tvorby podzemnej vody na jednotlivé ročné obdobia. Pre toto je nutné poznať koncentráciu trícia v infiltrujúcej vode. Pri kalkuláciách sa zdá byť logické vychádzať zo stredných ročných aktivít trícia vzťahovaných na ročné množstvo zrážok.

# PODZEMNÁ VODA, 22(1), 2016, 20 - 39

Proti tomu však stojí skutočnosť, že zrážky rôznych ročných období sa prejavujú veľmi odlišne pri tvorbe novej podzemnej vody. Ak sa predpokladá, že letné zrážky sa skoro úplne podľahnú evapotranspirácii, bolo by správne pri výpočtoch brať do úvahy len koncentrácie trícia v zrážkach september až marec. To znamená, že stredný obsah trícia v daždi je vyšší ako obsah trícia v podzemnej vode v príslušnom roku.

Treba poukázať aj na to, že vo vyšších polohách sú

straty odparovaním následkom nižších teplôt menšie ako v dolinách, a v prípade horských oblastí prispievajú k tvorbe podzemnej vody aj letné zrážky. Jedná sa tu o zložitú interakciu miestnych faktorov ako mikroklímu, topografiu či poľnohospodárske využitie krajiny. Pri hodnotení vplyvu zrážkových vôd na povrchové alebo podzemné vody treba brať do úvahy aj sezónne výkyvy. Maximálne obsahy trícia sú zvyčajne zaznamenávané v zrážkach v jarnom a letnom období.



**Obr. 1** Poloha odberných bodov z povrchových tokov, prameňov a podzemných vôd z hydrogeologických vrtov ako aj vôd podzemného hydrologického systému Demänovskej doliny **Fig. 1** Position of sampling points on the surface streams, springs, groundwater from boreholes and water of the Demänovská dolina Valley underground hydrological system



**Obr. 2** Poloha odberných bodov zrážkových vôd v oblasti Demänovskej doliny **Fig. 2** Position of precipitation sampling points in the Demänovská dolina Valley

Pre dôsledné stanovenie zmiešavacích pomerov zdrojových vôd v hydrologickom podzemnom systéme Demänovskej doliny sme sa snažili odobrať čím viac sérií vzoriek v rozličných obdobiach. Celkovo bolo takto odobratých sedem sérií odberov vzoriek vôd pri rozdielnych hydrologických situáciách. Spolu s odberom vzoriek z podzemných a povrchových tokov a prameňov boli vykonané aj odbery vzoriek zrážkových vôd v troch výškových úrovniach (Chopok – Luková – Lúčky), z ktorých tieto toky vznikajú a ktoré nesú záznam výškového rozdelenia týchto parametrov. Poloha odberných bodov z povrchových tokov, vôd podzemného hydrologického systému, prameňov a podzemných vôd z hydrogeologických vrtov je na obr. 1. Poloha odberných bodov zrážkových vôd je na obr. 2.

**Tab. 1** Odberové miesta a základné štatistické charakteristiky stanovení objemových aktivíť <sup>3</sup>H (TU) vzorkovaných vôd v oblasti Demänovskej doliny

**Tab. 1** Sampling places and basic statistical characteristics of detected <sup>3</sup>H volume activities (TU) of sampled waters in the Demänovská dolina Valley

č.	X (JTSK)	Y (JTSK)	Názov lokality	n	AVG	medián	σ	min	max
1	-382116,49	-1204034,74	Demänovka nad Lúčkami (objekt 5557)	7 9,6 8,9		8,9	1,7	7,5	12,8
2	-383650,04	-1201366,81	Demänovka nad objavným ponorom		8,8	8,0	2,9	5,6	13,7
3	-383696,76	-1201906,54	Demänovka nad sútokom so Zadnou vodou	7	9,3	8,8	2,1	6,4	13,0
4	-384328,66	-1202846,65	Zadná voda nad ponormi (Kožiarka – objekt 5577)	7+1	7,2	8,1	2,2	2,7	8,9
5	-383763,63	-1201892,37	Radový potok (objekt 5558)	7	6,7	6,9	2,5	3,0	10,6
6	-383685,84	-1200834,57	Demänovka nad vyvieračkou (objekt 5579)	7	7,8	8,0	2,2	3,7	11,2
7	-383641,00	-1200854,32	vyvieračka Vyvieranie (objekt 5583)	7	7,3	8,4	3,0	1,5	10,2
8	-382528,64	-1202791,41	prítok v doline Machnaté (nad ponorením)	5	9,6	9,3	1,2	8,6	11,8
9	-383203,04	-1202288,14	prítok v doline Pustá (nad ponorením)	7	9,3	8,1	2,0	7,3	12,6
10	-383602,87	-1200842,72	prítok z dolinky nad Vyvieraním	7	9,0	9,1	1,7	6,0	11,3
11	-383172,41	-1201741,99	chrlič 1 DJS – priesak v Janáčkovom dóme	7	8,5	8,5	2,1	5,7	12,2
12	-383453,76	-1201281,48	chrlič 2 (DJS) – Mramorové riečisko – priesak	7	9,3	10,2	2,4	4,9	12,2
13	-383463,76	-1200210,90	Prameň pod dolinkou Okno	7	7,5	9,0	3,2	2,5	11,2
14	-383020,72	2 -1200140,78 Vodný tok v Demänovskej jaskyni mieru (zadná časť) 7 9,0 9,1		2,2	6,6	12,9			
15	-382985,34	-1202441,39 Achátový dóm v Pustej jaskyni – podzemný tok		7	8,4	9,7	2,5	5,1	11,4
16	-383104,03	-1201994,30	Pekelný dóm DJS – podzemný tok		7,1	6,2	2,1	5,5	10,9
17	-383547,21	-1201317,57	Mramorové riečisko DJS – podzemný tok medzi 6. a 7. sifónom	7	7,7	8,4	2,1	4,6	10,0
18	-383251,63	-1200205,28	Prítok v dolinke Okno	6	9,4	9,7	1,4	7,5	11,3
19	-383504,09	-1202396,56	Jaskyňa Štefanová – staré časti	7+1	8,3	8,5	1,8	6,2	11,0
20	-383192,19	-1201759,70	ľavostranný prítok Demänovky z Demänovskej medvedej jaskyne (DJS)	7	8,4	8,7	1,0	7,3	9,8
21	-383337,40	-1201397,41	Tok Podzemné prepadanie (DJS)	7	8,0	8,2	1,5	5,8	9,6
22	-383568,50	-1201545,97	Údolná jaskyňa	7	8,4	9,0	1,8	5,9	10,5
23	-383153,84	-1201261,16	Veľké jazero / Těsnohlídko (DJS)	7	7,9	7,5	2,2	5,2	10,7
24	-383225,20	-1202118,56	Jaskyňa Štefanová – odtokový sifón	7	8,5	9,0	1,8	6,0	10,5
25	-383219,37	-1203557,77	Priečny potok nad ponormi (objekt 5 568)	7	7,9	8,4	2,5	3,0	10,9
26	-383088,93	-1200088,67	Demänovská jaskyňa mieru – jama	5	11,1	10,9	3,7	5,9	15,9
27	-383117,90	-1200335,61	Demänovská jaskyňa mieru – priesak	7+1	8,7	8,0	2,6	6,2	13,4
28	-382948,47	-1203362,03	Lúčky – Vrt 1	7	7,4	7,4	1,7	5,0	10,1
29	-382432,02	-1203864,30	Lúčky – Vrt 3	7	7,3	8,1	2,6	3,1	10,6
33	-383035,20	-1200610,69	Jaskyňa Okno – priesak	2	11,1	11,1	1,7	9,9	12,4
34	-383397,37	-1200990,13	Demänovská jaskyňa mieru – Koliba – priesak	3	7,9	9,3	4,3	3,2	11,3
35	-383402,70	-1200882,78	Demänovská jaskyňa mieru – tok pri chodníku	3	8,3	9,8	4,7	3,0	12,1
30	-383650,45	-1207748,51	zrážky Chopok (2000 m n.m.)	17	9,3	8,4	3,7	4,0	18,0
31	-383589,89	-1206650,65	zrážky Luková (1650 m n.m.)	11	10,5	11,0	2,7	6,3	15,2
32	-384132,12	-1205068,81	zrážky Jasná (1150 m n.m.)	11	11,2	11,4	4,4	6,0	19,1
CELKOVE:				245+3	8,7	8,7	2,7	1,5	19,1

Vysvetlivky: n – počet vzoriek; AVG – aritmetický priemer;  $\sigma$  – smerodajná odchýlka

Explanations: n – number of samples; AVG – average;  $\sigma$  – standard deviation

	· · · · · ·						
Číslo	Séria č. 1	Séria č. 2	Séria č. 3	Séria č. 4	Séria č. 5	Séria č. 6	Séria č. 7
objektu	(1314.12.2010)	(24.2.2011)	(46.4.2011)	(3031.5.2011)	(23.8.2011)	(1920.9.2011)	(46.6.2012)
1	$8,8 \pm 1,6$	$7,\!45 \pm 1,\!6$	$8,\!89 \pm 1,\!69$	$8,72 \pm 2,03$	$10,41 \pm 1,86$	$9,82 \pm 1,94$	$12,78 \pm 1,43$
2	$6,26 \pm 1,69$	$7,95 \pm 1,77$	$5,\!58 \pm 1,\!69$	$7,7 \pm 2,03$	$13,71 \pm 1,94$	$9,14 \pm 1,94$	$11,34 \pm 1,52$
3	$10,92 \pm 1,6$	$8,\!29 \pm 1,\!77$	$8,8\pm1,\!69$	$8,\!89 \pm 2,\!03$	$6,\!43 \pm 1,\!94$	$13,03 \pm 1,94$	$8,8 \pm 1,43$
4	< 5,42	$8,12 \pm 1,77$	$5,\!84 \pm 1,\!77$	$7,7 \pm 2,03$	$8,89 \pm 1,94$	$8,\!29 \pm 1,\!94$	$8,63 \pm 1,43$
5	$4,57 \pm 1,6$	$2,96 \pm 1,69$	$7{,}36 \pm 1{,}69$	$6{,}85 \pm 1{,}94$	$10,58 \pm 1,77$	$6{,}35 \pm 1{,}86$	$8,\!38\pm1,\!35$
6	$8,04 \pm 1,69$	$3,72 \pm 1,86$	$7,11 \pm 1,6$	$8,8 \pm 1,94$	$7,\!45 \pm 1,\!86$	$11,\!17 \pm 1,\!94$	$7,95 \pm 1,43$
7	$6,85 \pm 1,69$	< 2,96	$9,39 \pm 1,6$	$8,\!97 \pm 2,\!03$	$6,09 \pm 1,94$	$10,24 \pm 1,94$	$8,\!38\pm1,\!35$
8	-	-	$8,63 \pm 1,69$	$11,76 \pm 2,03$	$9,39 \pm 1,86$	9,31 ± 1,94	$8,97 \pm 1,43$
9	$7,28 \pm 1,69$	$12,61 \pm 2,11$	$9,73 \pm 1,69$	$8,12 \pm 1,6$	$11,34 \pm 1,86$	$7,79 \pm 1,86$	$7,95 \pm 1,43$
10	$6,01 \pm 1,52$	$11,34 \pm 2,11$	$10,16 \pm 1,69$	$9,14 \pm 1,69$	8,89 ± 1,86	$9,39 \pm 1,86$	$7,87 \pm 1,43$
11	$9,65 \pm 1,69$	$9,14 \pm 2,2$	$12,19 \pm 1,52$	$5,\!67 \pm 2,\!79$	$8,46 \pm 1,77$	$6,94 \pm 2,03$	$7,53 \pm 1,43$
12	$4,91 \pm 1,6$	$8,72 \pm 2,2$	$12,19 \pm 1,52$	$10,16 \pm 2,79$	$7,79 \pm 1,77$	$10,\!41 \pm 2,\!11$	$10,66 \pm 1,43$
13	$5,5 \pm 1,69$	8,97 ± 2,11	$9,99 \pm 1,43$	$2,54 \pm 2,11$	9,31 ± 1,86	$11,17 \pm 1,94$	$4,91 \pm 1,43$
14	$7,28 \pm 1,69$	$12,87 \pm 1,77$	$10,\!49 \pm 1,\!52$	$7,53 \pm 2,96$	$9,06 \pm 1,86$	$9,22 \pm 1,43$	$6,6 \pm 1,94$
15	$6,09 \pm 1,6$	$9,82 \pm 1,77$	$11,\!43 \pm 1,\!43$	$9,\!65 \pm 2,\!96$	$5,08 \pm 1,69$	$6,51 \pm 1,43$	$10,\!24 \pm 1,\!35$
16	$5,5 \pm 1,52$	$10{,}92\pm1{,}69$	$8,8\pm1,35$	$5,5 \pm 2,7$	$7,02 \pm 1,77$	$6{,}18 \pm 1{,}35$	$5,75 \pm 1,52$
17	$8,\!89 \pm 1,\!69$	$9{,}99 \pm 1{,}77$	$9,73 \pm 1,43$	$4,57 \pm 2,2$	$7,\!28 \pm 1,\!77$	$8,\!38 \pm 1,\!43$	$5,24 \pm 1,43$
18	$10,16 \pm 1,69$	-	$11,\!34\pm1,\!52$	$7,53 \pm 2,96$	$9,99 \pm 1,77$	$8,21 \pm 1,43$	$9{,}39 \pm 1{,}43$
19	$6,18 \pm 1,52$	$8,46 \pm 1,77$	$11 \pm 1,43$	$9,22 \pm 2,96$	$9,31 \pm 1,77$	$7,53 \pm 1,27$	$6,\!18 \pm 1,\!43$
20	$7,28 \pm 1,6$	$9,82 \pm 1,77$	$9,06 \pm 1,43$	$7,\!79\pm2,\!96$	$7,36 \pm 1,77$	$8,\!97 \pm 1,\!43$	$8,72 \pm 1,43$
21	$9,\!39 \pm 1,\!69$	$8,8\pm1,\!69$	$9,56 \pm 1,52$	$6,\!26 \pm 2,\!96$	$8,12 \pm 1,86$	$8,21 \pm 1,43$	$5,84 \pm 1,52$
22	$6,94 \pm 1,69$	$8,\!97 \pm 1,\!69$	$10{,}49\pm1{,}52$	$10,07 \pm 3,04$	$5,92 \pm 1,86$	$6,85 \pm 1,35$	$9,65 \pm 1,52$
23	$5,24 \pm 1,6$	$10,\!66 \pm 1,\!77$	$8,97 \pm 1,52$	$10,\!49 \pm 2,\!96$	$7,53 \pm 1,77$	$6{,}18 \pm 1{,}35$	$6,26 \pm 1,43$
24	$6,01 \pm 1,6$	$10,\!33\pm1,\!69$	$6,\!43 \pm 1,\!77$	$8,21 \pm 1,69$	$9,06 \pm 1,94$	$10,\!49 \pm 2,\!03$	$8,\!97\pm3,\!72$
25	$7,28 \pm 1,69$	$9,\!39 \pm 2,\!03$	$9,06 \pm 1,86$	$8,\!38 \pm 1,\!69$	$10,92 \pm 1,69$	$6{,}94 \pm 2{,}03$	< 6,10
26	$5,92 \pm 1,6$	$10,92 \pm 2,11$	_	$9,\!65 \pm 1,\!77$	$15,91 \pm 1,86$	$12,95 \pm 2,03$	_
27	$6,\!18 \pm 1,\!6$	$13,\!37 \pm 2,\!2$	$6,\!68 \pm 1,\!77$	$7,95 \pm 1,6$	$6,94 \pm 1,86$	$10,\!58 \pm 2,\!03$	$9,22 \pm 3,72$
28	$7,36 \pm 1,77$	$8,72 \pm 2,11$	$6,09 \pm 1,86$	$7,45 \pm 1,69$	$10,07 \pm 1,86$	$4,99 \pm 1,94$	$7,02 \pm 3,72$
29	$8,72 \pm 1,77$	$10,58 \pm 2,11$	$5,41 \pm 1,77$	$8,12 \pm 1,69$	$9,31 \pm 1,77$	$6,18 \pm 1,94$	< 6,18
33	_	_	_		$9,9 \pm 1,86$	$12,36 \pm 2,03$	
34		_	=		$11,34 \pm 2,03$	$9,31 \pm 2,03$	< 6,36
35	_	_	_	_	$12.1 \pm 1.94$	$9.82 \pm 2.03$	< 6.10

**Tab. 2** Výsledky stanovení objemových aktivít <sup>3</sup>H (TU) vzorkovaných vôd v oblasti Demänovskej doliny (okrem zrážok) **Tab. 2** Results of detected <sup>3</sup>H volume activities in (TU) of sampled waters in the Demänovská dolina Valley (precipitation waters not included)

Tab. 3 Výsledky stanovení objemových aktivít <sup>3</sup> H (TU) vzorkovaných zrážkových vôd v oblasti Demänovskej dolin	ıy
Tab. 3 Results of detected <sup>3</sup> H volume activities (TU) of sampled precipitation waters in the Demänovská dolina Val	ley

Číslo série	Dátum odberu	30 – Chopok	31 – Luková	32 – Jasná			
1	19.1.2011	$4,74 \pm 1,77$	$7,19 \pm 1,77$	$6,01 \pm 1,69$			
2	4.2.2011	$7,19 \pm 1,77$	$7,62 \pm 1,77$	$7,95 \pm 1,77$			
3	1.3.2011	$8,38 \pm 2,2$	$9,31 \pm 2,2$	$11,43 \pm 2,2$			
4	4.4.2011	$7,11 \pm 1,77$	$10,75 \pm 1,77$	$6,09 \pm 1,77$			
5	2.5.2011	$9,56 \pm 1,86$	$12,19 \pm 2,03$	$15,\!24 \pm 1,\!86$			
6	31.5.2011	$17,95 \pm 2,03$	$15,15 \pm 2,03$	$19,05 \pm 2,2$			
7	28.6.2011	$13,54 \pm 1,77$	$11,34 \pm 1,77$	$15,49 \pm 1,69$			
8	29.7.2011	$12,27 \pm 1,94$	$11 \pm 1,94$	$9,9 \pm 2,03$			
9	30.8.2011	$9,39 \pm 1,94$	$11,26 \pm 1,86$	$12,87 \pm 2,03$			
10	22.9.2011	$6,6 \pm 1,43$	$6,26 \pm 1,43$	$6,35 \pm 1,43$			
11	17.10.2011	$10,41 \pm 2,11$	-	-			
12	14.11.2011	$3,97 \pm 2,03$	-	-			
13	10.1.2012	$6,09 \pm 1,69$	-	-			
14	15.3.2012	$7,19 \pm 3,97$	-	-			
15	19.9.2011	$7,95 \pm 1,6$	-	—			
16	13.12.2010	$11,68 \pm 2,03$	-	-			
17	6.6.2012	$14.81 \pm 1.52$	$13,37 \pm 1,52$	$13.2 \pm 1.52$			

Vzorky vody pre stanovenie objemovej aktivity trícia boli odoberané v siedmich sériách v období od 13. 12. 2010 do 06. 06. 2012. Boli odoberané vody z 11 povrchových tokov (vzorky č. 1; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 9; 10; 18 a 25 v tabul'ke č. 1), z dvoch prameňov (vzorky č. 7 a 13) a 19 vzorkovaných miest bolo z vôd podzemného hvdrologického svstému (vzorkv č. 11: 12: 14; 15; 16; 17; 19; 20; 21; 22; 23; 24; 26; 27; 28; 29; 33; 34 a 35). Zrážkové vody boli monitorované v hustejšej frekvencii z troch odberných miest zrážkových vôd (vzorky č. 30; 31 a 32; tab. 1), boli odoberané ako kumulované vzorky za obdobie medzi jednotlivými dňami odberu. Vzorky boli teda odoberané v približne mesačnom cykle (spolu 17 odberov), treba však spresniť, že vzorky v období medzi 20. 10. 2011 a 15. 05. 2012 boli odoberané iba na najvyššej stanici Chopok a iba záverečná, 17. séria odberov opäť zahrnula aj ďalšie dve nižšie položené odberné miesta (Lukovú a Jasnú). Spolu bolo na stanovenie objemových aktivít trícia (3H) odobratých 248 vzoriek (z toho 3 vzorky boli kontrolné) z 35 zdrojov vrátane troch zrážkomerných staníc (Chopok / Luková / Jasná). Základné štatistické charakteristiky (n - počty odobratých vzoriek z každého zdroja, min - minimálna a max - maximálna stanovená hodnota, medián, AVG – aritmetický priemer a σ – veľkosť smerodajnej odchýlky) stanovení objemových aktivít <sup>3</sup>H v tríciových jednotkách sú uvedené v tab. 1. V tab. 2 a tab. 3 sú uvedené výsledky meraní na jednotlivých odberných miestach.

Z hľadiska hydrológie a hydrogeológie je <sup>3</sup>H ideálny stopovač, prítomný vo všetkých fázach kolobehu vody, pretože pre šírenie trícia v podzemných a povrchových vodách nie sú známe žiadne sorpčné alebo iné záchytné bariéry, ako je to v prípade iných rádionuklidov, kde sa pri ich eliminácii účinne zapájajú rôzne fyzikálne, chemické a biologické javy. Detekcia trícia je sťažená nízkou energiou emitovaného beta-žiarenia ( $E_{\beta,max}$  = 18,6 keV). Dolet beta-častíc v látkovom prostredí je taký malý, že merať ich je možné iba špeciálnymi detekčnými metódami za použitia špeciálnych detektorov. Je nutné používať internú metódu detekcie, pri ktorej sa vzorka vloží priamo do pracovného objemu detektora. Všetky analýzy trícia boli preto realizované v rádiochemickom laboratóriu Národného referenčného laboratória pre oblasť vôd na Slovensku (ďalej aj "NRL") Výskumného ústavu vodného hospodárstva (VÚVH), ktoré využíva metódu elektrolytického zakoncentrovania. Objemová aktivita <sup>3</sup>H bola stanovovaná na kvapalinovom scintilačnom spektrometri TRICARB 2900TR od výrobcu Canberra Packard po predchádzajúcom elektronickom nabohatení (zakoncentrovaní) vzorky. Použitá metóda elektrolytického zakoncentrovania bola založená princípe na selektívneho izotopického obohacovania: mierne silnejšie väzby molekúl HTO v porovnaní s molekulami obyčajnej vody H<sub>2</sub>O alebo ťažkej vody HDO sú

elektrickým prúdom v oveľa menšej miere rozkladané na ióny vodíka a kyslíka. Konštantný elektrický prúd bol aplikovaný na elektrolytické bunky, v ktorých sa nachádzala vzorka vody so zásaditým prídavkom. Počas 7 až 14 dní prebiehajúcej elektrolýzy bol objem vody redukovaný na 8 až 5 % z pôvodného objemu vzorky. V dôsledku izotopickej frakcionácie ostávalo vo zvyškovej vode približne 90 % trícia a zakoncentrovaná vzorka bola následne čistená destiláciou. Uvedená metóda elektrolytického nabohacovania je na oddelení rádiochémie VÚVH používaná od konca 70. rokov 20. storočia, pričom sa na tento účel sa používa prístroj VITUKI NP 3050, slúžiaci na reguláciu prívodu prúdu k bunkám elektrolyzéra. Elektrolýza tu nastáva pri rovnomernej hustote prúdu podľa vopred určeného programu. Meranie aktivít trícia bolo realizované kvapalinovým scintilačnym spektrometrom TRICARB 2900TR, kedy sa vzorky pred meraním vo vialkách zmiešavali v pomere 1:1 so scintilačným koktailom UltimaGold LLT.

Stanovenie objemových aktivít rádioaktívneho izotopu vodíka – trícia (<sup>3</sup>H) bolo realizované pre stanovenie relatívneho veku vody. Dlhšia izolácia vôd od povrchu vedie k znižovaniu obsahu trícia vo vode, naopak, zvýšený obsah môže signalizovať dobré prepojenie s povrchovou vodou. Nakoľko sú však tieto vzťahy komplikované prítomnosťou rozličných zložiek vôd, infiltrovaných alebo vytváraných v rozličných obdobiach, bol namiesto jednorazového odberu zvolený odber vzoriek vo viacerých sériách v dlhšom období.

### VÝSLEDKY A DISKUSIA

Pre celý súbor vzoriek (n = 245+3) sa veľkosti obsahu trícia <sup>3</sup>H pohybovali v rozsahu od 1,5 TU až po 19,1 TU. Aritmetický priemer obsahu <sup>3</sup>H celého súboru mal veľkosť 8,7 TU, a rovnakú hodnotu mal aj medián (8,7 TU), keď veľkosť smerodajnej odchýlky bola 2,7 TU.

V prípade zrážok (n = 39) bola aj pre objemové aktivity trícia potvrdená vyššia variabilita hodnôt od 4,0 TU po 19,1 TU s priemerom 10,2 TU a mediánom hodnôt 9,9 TU. Súbor zrážkových vôd mal najvyššiu hodnotu smerodajnej odchýlky (3,7 TU), kým pre ostatné vyčlenené skupiny vôd sa tieto hodnoty pohybovali od 1,6 TU do 2,9 TU a pre všetky "nezrážkové" vody bola zistená veľkosť smerodajnej odchýlky 2,3 TU. Priebeh objemovej aktivity <sup>3</sup>H zrážkových vôd zo staníc Chopok, Luková a Jasná v čase (obr. 3) ukazuje vplyv sezónnosti pre všetky tri odberové miesta (č. 30 - Chopok; č. 31 - Luková a č. 32 – Jasná). V zimných mesiacoch sa objemová aktivita trícia pohybovala v menších hodnotách cca od 4,0 do 8,0 TU a v letných mesiacoch sa zvyčajne pohybovala zhruba medzi 10,0 a 20,0 TU (v období

medzi októbrom 2011 a júnom 2012 bola pozorovaná iba stanica Chopok).

Ak skúmame objemové aktivity trícia v skupine vzoriek z veľkých povrchových tokov (vzorkovacie miesta č. 1 – Demänovka nad Lúčkami (objekt 5557); č. 2 – Demänovka nad objavným ponorom; č. 3 – Demänovka nad sútokom so Zadnou vodou; č. 4 -Zadná voda nad ponormi (Kožiarka - objekt 5577); č. 5 - Radový potok (objekt 5558); č. 6 - Demänovka nad vyvieračkou (objekt 5579); a č. 25 - Priečny potok nad ponormi (objekt 5568) s celkovým počtom odberov n = 49, zisťujeme, že obsahy <sup>3</sup>H dané aritmetickými priemermi (8,2 vs. 8,4 TU) a mediánmi hodnôt (8,3 vs. 8,7 TU) boli mierne nižšie než dané obsahu pre všetky "nezrážkové" vody. Oproti vodám menších prítokov Demänovky mali vody veľkých povrchových tokov o 1,02, resp. 1,13 TU (medián / aritmetický priemer) nižší obsah trícia oproti priesakovým vodám v jaskynných priestoroch o 0,68, resp. 0,52 TU nižší. Naopak, vody veľkých povrchových tokov mali vyšší obsah trícia oproti podzemným vodám vo vrtoch a prameňoch o 0,51 resp. 0,78 TU, pričom vody vo vrtoch boli ešte "staršie" a mali obsah <sup>3</sup>H nižší o 0,89 resp. 0,80 TU. Zaujímavá je však veľká podobnosť priemerných obsahov trícia vo vodách tokov podzemného hydrologického systému Demänovskej doliny, keď sa ich stredné hodnoty zo všetkých sérií odberov odlišovali iba o 0,17 resp. 0,04 TU. Z pohľadu jednotlivých odoberaných zdrojov bol obsah trícia najvyšší na vzorkovanom mieste č. 1 (Demänovka nad Lúčkami; objekt 5557) a najnižší na vzorkovanom mieste č. 5 (Radový potok; objekt 5558). V zostupnom poradí môžeme jednotlivé vzorkované veľké povrchové toky zoradiť podľa mediánových hodnôt objemovej aktivity trícia nasledovne: č. 1 - Demänovka nad Lúčkami (objekt 5557 – 8,9 TU) > č. 3 – Demänovka nad sútokom so Zadnou vodou (8,8 TU) > č. 25 -Priečny potok nad ponormi (objekt 5568 – 8,4 TU) > č. 4 – Zadná voda nad ponormi (Kožiarka – objekt 5577 – 8,1 TU) > č. 2 – Demänovka nad objavným ponorom (8,0 TU) > č. 6 – Demänovka nad vyvieračkou (objekt 5579 - 8,0 TU) > č. 5 - Radový potok (objekt 5558 -6,9 TU).

Podľa aritmetických priemerov obsahu <sup>3</sup>H môžeme veľké povrchové toky zoradiť nasledovne: č. 1 – Demänovka nad Lúčkami (objekt 5557 – 9,6 TU) > č. 3 – Demänovka nad sútokom so Zadnou vodou (9,3 TU) > č. 2 – Demänovka nad objavným ponorom (8,9 TU) > č. 25 – Priečny potok nad ponormi (objekt 5568 – 7,9 TU) > č. 6 – Demänovka nad vyvieračkou (objekt 5 579 – 7,8 TU) > č. 4 – Zadná voda nad ponormi (Kožiarka – objekt 5 577 – 7,2 TU) > č. 5 – Radový potok (objekt 5558 – 6,7 TU).

Obsahy trícia v jednotlivých veľkých povrchových tokoch v čase (obr. 4) však navzájom príliš nekorelujú, priebeh hodnôt nameraných na jednotlivých tokoch je veľmi kolísavý a ich vzájomný rozdiel sa v čase veľmi premenlivý. Ako už bolo konštatované, frekvencia odberov vzoriek v cca 2-mesačných cykloch s 9-mesačným časovým rozdielom poslednej série odberov zjavne nestačí na vystihnutie ich vzájomných špecifických rozdielov, keď každý monitorovaný tok má zjavne výrazne rozdielny kvantitatívne-kvalitatívny režim.

Pre skupinu vzoriek z menších prítokov Demänovky (vzorkovacie miesta č. 8 – prítok v doline Machnaté (nad ponorením); č. 9 – prítok v doline Pustá (nad ponorením); č. 10 – prítok z dolinky nad Vyvieraním a č. 18 – tok v dolinke Okno s celkovým počtom odberov n = 25 je aritmetický priemer a medián obsahov <sup>3</sup>H (zhodne 9,3 TU) druhý najvyšší hneď za zrážkovými vodami a najvyšší spomedzi všetkých súborov "nezrážkových" vôd. Oproti vodám zrážok majú menšie prítoky Demänovky priemerne o 0,59, resp. 0,91 TU (medián / aritmetický priemer) nižší obsah trícia, ale v pomere k ďalším typom vôd sú menšie toky obohatené o objemovú aktivitu <sup>3</sup>H priemerne o 0,60 až 1,93 TU. Rozsah hodnôt obsahu trícia sa tu pohybuje v rozmedzí od 6,0 po 12,6 TU.

Skupina vzoriek z menších prítokov Demänovky bola na objemovú aktivitu <sup>3</sup>H najviac priemerne obohatená v porovnaní s podzemnými vodami hvdrogeologických vrtov V-1 a V-3 Lúčky (medián bol o 1,91 TU a aritmetický prieme o resp. 1,93 TU vyšší). Ak sa súbor podzemných vôd rozšíri o pramene (Vyvieranie a pod vyústením dolinky Okno - odberové miesta č. 7 a 13), je tento rozdiel miernejší (1,52 TU, resp. 1,90 TU), čo svedčí o mierne vyššom stupni prepojenia podzemných vôd vystupujúcich v prameňoch s atmosférickými vodami. Toky v podzemnom hydrologickom systéme Demänovskej doliny sú od skupiny vzoriek z menších prítokov Demänovky o 0,85 resp. 1,09 TU ochudobnenejšie, podobne ako vody veľkých povrchových tokov (tie majú priemerne o 1,02, resp. 1,13 TU menej), čím sú si oba typy (veľké povrchové i jaskynné toky) dĺžkou obehu pravdepodobne dosť podobné. Priesakové vody v jaskynných priestoroch majú priemerné rozdiely obsahu trícia 0,34 TU, resp. 0,60 TU, čím sa zo všetkých vyčlenených skupín vzorkovaných vôd najviac približujú skupine vzoriek z menších prítokov Demänovky.

Jednotlivé odoberané zdroje skupiny vzoriek z menších prítokov Demänovky môžeme zoradiť podľa priemerných obsahov trícia daných mediánmi hodnôt od najvyššieho po najnižší v nasledovnom zostupnom poradí: č. 18 – Dolinka Okno (9,7 TU) > č. 8 – prítok v doline Machnaté (nad ponorením – 9,3 TU) > č. 10 – prítok z dolinky nad Vyvieraním (9,1 TU) > č. 9 – prítok v doline Pustá (nad ponorením – 8,1 TU). Podľa aritmetických priemerov obsahu <sup>3</sup>H môžeme menšie prítoky Demänovky zoradiť nasledovne: č. 8 – prítok

v doline Machnaté (nad ponorením – 9,6 TU) > č. 18 – Dolinka Okno (9,4 TU) > č. 9 – prítok v doline Pustá (nad ponorením – 9,3 TU) > č. 10 – prítok z dolinky nad Vyvieraním (9,0 TU). Pri oboch poradiach je zjavné, že na prvých dvoch miestach vystupujú vždy v navzájom prehodenom poradí vzorkovacie lokality č. 8 a 18 (prítok v doline Machnaté a dolinke Okno), kým na posledných dvoch miestach vzorkovacie lokality č. 9 a 10 (prítok v doline Pustá a prítok z dolinky nad Vyvieraním).



**Obr. 3** Časový priebeh objemovej aktivity <sup>3</sup>H (TU) zrážkových vôd zo staníc Chopok, Luková a Jasná **Fig. 3** Temporal changes in tritium volume activity <sup>3</sup>H (TU) at Chopok, Luková and Jasná precipitation sampling points



**Obr. 4** Časový priebeh objemovej aktivity <sup>3</sup>H (TU) v skupine vzoriek z veľkých povrchových tokov: Demänovka nad Lúčkami (objekt 5557); Demänovka nad objavným ponorom; Demänovka nad sútokom so Zadnou vodou; Zadná voda nad ponormi (Koziarka – objekt 5577); Radový potok (objekt 5558); Demänovka nad vyvieračkou (objekt 5579); Priečny potok nad ponormi (objekt 5568)

**Fig. 4** Temporal changes in tritium volume activity <sup>3</sup>H (TU) at large surface stream sampling points on the Demänovka nad Lúčkami (object 5557); Demänovka nad objavným ponorom; Demänovka nad sútokom so Zadnou vodou; Zadná voda nad ponormi (Koziarka – object 5577); Radový potok (object 5558); Demänovka nad vyvieračkou (object 5579); Priečny potok nad ponormi (object 5568)



**Obr. 5** Časový priebeh objemovej aktivity <sup>3</sup>H (TU) v skupine vzoriek vôd menších prítokov Demänovky: prítok v doline Machnaté (nad ponorením); prítok v doline Pustá (nad ponorením); prítok z dolinky nad Vyvieraním; prítok z dolinky Okno) **Fig. 5** Temporal changes in tritium volume activity <sup>3</sup>H (TU) on small surface streams tributary sampling points of the Machnatá dolina Valley and Pustá dolina Valley tributaries above their disappearance, and on the Vyvieranie Valley and Okno Valley tributaries



**Obr. 6** Časový priebeh objemovej aktivity <sup>3</sup>H (TU) v skupine vzoriek vôd podzemného hydrologického systému Demänovky: Vodný tok v Demänovskej jaskyni mieru (zadná časť); Achátový dóm v Pustej jaskyni – podzemný tok; Pekelný dóm – podzemný tok; Mramorové riečisko – podzemný tok medzi 6. a 7. sifónom; jaskyňa Štefanová – staré časti; DJS – ľavostranný prítok Demänovky z Demänovskej medvedej jaskyne; Podzemné prepadanie – DJS; Údolná jaskyňa; jaskyňa Štefanová – odtokový sifón; Demänovská jaskyňa mieru – Koliba; Demänovská jaskyňa mieru – tok pri chodníku

**Fig. 6** Temporal changes in tritium volume activity <sup>3</sup>H (TU) on sampling points in the Demänovská dolina Valley underground hydrologic system: stream in the Demänovská jaskyňa mieru Cave (rear parts); Achátový Dome in the Pustá jaskyňa Cave – underground stream; Pekelný Dome – underground stream; Mramorové riečisko – underground stream between the 6<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> siphon; Štefanová Cave – old parts; left tributary of Demänovka Stream from the Demänovská jaskyňa Cave; Podzemné prepadanie; Údolná jaskyňa Cave; Štefanová Cave – outflow siphon; Demänovská jaskyňa mieru Cave – Koliba part; Demänovská jaskyňa mieru Cave – stream near the pathway

Časový priebeh obsahov trícia v jednotlivých menších prítokov Demänovky je tiež (obr. 5) rozličný, jednotlivé lokálne minimá a maximá sú v individuálnych tokoch časovo rozdielne, a nízka frekvencia odberov vzoriek nepostačuje na vystihnutie vzájomných špecifických rozdielov ich kvantitatívne-kvalitatívneho režimu, aj keď sú tu badateľné náznaky vplyvu sezónnych výkyvov v objemových aktivitách <sup>3</sup>H. Najviac sa z tohto súboru vymyká prítok v doline Machnaté (č. 8), vzájomná podobnosť časového priebehu obsahov trícia u ostatných menších prítokov Demänovky je o dosť väčšia (obr. 5).

O tokoch podzemného hydrologického systému Demänovky (odberové miesta č. 14 - vodný tok v jaskyni mier (zadná časť); 15 - podzemný tok v Achátovom dóme v Pustej jaskyni; č. 16 – podzemný tok v Pekelnom dóme Demänovskej jaskyne slobody (DJS); č. 17 – podzemný tok v Mramorovom riečisku medzi 6. a 7. sifónom (DJS); č. 19 - tok v jaskyni Štefanová ("staré časti"); č. 20 – DJS – ľavostranný prítok Demänovky z Demänovskej medvedej jaskyne; č. 21 - Podzemné prepadanie - DJS; č. 22 - tok v Údolnej jaskyni; č. 24 – odtokový sifón v jaskyni Štefanová; č. 34 – Demänovská jaskyňa mieru – Koliba a č. 35 – Demänovská jaskyňa mieru – tok pri chodníku, s celkovým počtom odberov n = 69 možno povedať, že ie priemernou z hľadiska objemových aktivít trícia – je menší než pre zrážkové vody, menšie prítoky Demänovky a vody podzemných jazerných akumulácií, ale väčší než pre veľké povrchové toky a podzemné vody vrtov. Veľmi podobný je skupine vzoriek z podzemných vôd prameňov. Toky podzemného hydrologického systému Demänovky charakterizuje aritmetický priemer obsahov <sup>3</sup>H o veľkosti 8,2 TU a medián obsahov <sup>3</sup>H o veľkosti 8,7 TU. Rozsah hodnôt obsahu trícia sa tu pohybuje v rozmedzí od 3,0 po 12,9 TU.

Na rozdiel od skupiny vzoriek z podzemného hydrologického systému Demänovky je skupina zrážkových vôd charakterizovaná menším obsahom trícia (medián o 1,19 TU a aritmetický priemer o 2,00 TU nižší), podobne aj voči skupine vôd menších prítokov Demänovky (o 0,59, resp. 1,09 TU), ale aj vôd stagnujúcich v podzemných akumuláciách, ktoré sa obsahom trícia na menšie toky veľmi podobajú (rozdiel 0,59 / 1,02 TU). Vyšší od tokov podzemného hydrologického systému je aj priemerný obsah trícia v priesakových vodách toho istého systému (!) – priemerne o 0,42, resp. 0,83 TU. Veľmi podobný je však obsah trícia vo veľkých povrchových tokoch Demänovskej doliny (nepatrný rozdiel mediánových a priemerných hodnôt: 0,42 TU / 0,03 TU). Od podzemných vôd hydrogeologických vrtov V-1 a V-3 sa skupina vzoriek z podzemného hydrologického systému Demänovky líši najviac v rámci všetkých "nezrážkových" vôd: podzemné vody vo vrtoch majú

priemerne o 1,31 TU, resp. 0,84 TU nižší obsah trícia, čo charakterizuje relatívne kratší obeh a časovo bližší kontakt s atmosférickými vodami v prípade prúdiacich jaskynných vôd oproti podzemným vodám vo vrtoch. Obdobne, aj keď nie s takým kontrastom, môže byť charakterizovaný rozdiel medzi skupinou vzoriek podzemného hydrologického systému Demänovky a podzemnými vodami prameňov (v prameni pri dolinke Okno totiž možno registrovať aj opačný vzťah).

Jednotlivé toky podzemného hydrologického systému Demänovky sa podľa mediánov hodnôt obsahov trícia zoraďujú v nasledovnom zostupnom poradí: č. 35 - Demänovská jaskyňa mieru - tok pri chodníku (9,8 TU) > č. 15 – Achátový dóm v Pustej jaskyni – podzemný tok (9,7 TU) > č. 14 – Vodný tokv Demänovskej jaskyni mieru (zadná časť – 9,1 TU) > č. 22 – Údolná jaskyňa (9,0 TU) > č. 24 – jaskyňa Štefanová – odtokový sifón (9,0 TU) > č. 20 - DJS – ľavostranný prítok Demänovky z Demänovskej medvedej jaskyne (8,7 TU) > č. 19 – jaskyňa Štefanová – staré časti (8,5 TU) > č. 17 – Mramorové riečisko – podzemný tok medzi 6. a 7. sifónom (8,4 TU) > č. 21 -Podzemné prepadanie – DJS (8,2 TU) > č. 16 – Pekelný dóm - podzemný tok (6,2 TU).

Podľa aritmetických priemerov obsahu  $^{3}H$ zoraďujeme toky podzemného hydrologického systému v inom poradí: č 14 – Vodný tok v jaskyni mier (zadná časť – 9,0 TU) > č. 24 – jaskyňa Štefanová – odtokový sifón (8,5 TU) > č. 20 – DJS – ľavostranný prítok Demänovky z Demänovskej medvedej jaskyne (8,4 TU) > č. 22 – Údolná jaskyňa (8,4 TU) > č. 15 – Achátový dóm v Pustej jaskyni – podzemný tok (8,4 TU) > č. 35 – Demänovská jaskyňa mieru – tok pri chodníku (8,3 TU) > č. 19 – jaskyňa Štefanová – staré časti (8,3 TU) > č. 21 – Podzemné prepadanie – DJS (8,0 TU) > č. 34 – Demänovská jaskyňa mieru – Koliba (8,0 TU) > č. 17 – Mramorové riečisko - podzemný tok medzi 6. a 7. sifónom  $(7,7 \text{ TU}) > \check{c}$ . 16 – Pekelný dóm – podzemný tok (7,1 TU).

Najväčší kontrast predstavuje rozdiel mediánových hodnôt a hodnôt aritmetického priemeru objemovej aktivity trícia v prípade podzemného toku v Achátovom dóme v Pustej jaskyni, čo je dané pomerne vysokou variabilitou obsah <sup>3</sup>H v porovnaní s inými analogickými zdrojmi. Pod ním sa nachádzajúci Pekelný dóm v Demänovskej jaskyni slobody má však tok s priemerne najnižším obsahom trícia, a odberové miesta nachádzajúce sa na podzemnej Demänovke pod ním "nasledujú tento nízky obsah od konca" - aj keď priemerné obsahy trícia mierne stúpajú od Pekelného dómu ku toku v Podzemnom prepadaní (pravdepodobný vplyv prítoku Demänovky z Demänovskej medvedej jaskyne s vyšším obsahom <sup>3</sup>H), v toku v Mramorovom riečisku zas klesajú (azda vplyv povrchového toku Demänovky - vz. č. 2 - s priemerným obsahom trícia 8,0 TU / 8,9 TU). Z uvedeného vyplýva, že medzi

tokom v Achátovom dóme v Pustej jaskyni a tokom v Pekelnom dóme v Demänovskej jaskyni slobody sa musí primiešavať voda s nízkym obsahom trícia (a izotopicky ľahšia – pozri Auxt et al., 2012). Voda v "starých častiach" jaskyne Štefanová (lokalita č. 19) vykazuje nízke obsahy trícia a podobnosť dĺžky zdržania vôd s tokom podzemnej Demänovky. Tok v odtokovom sifóne jaskyne Štefanová a tok v Údolnej jaskyni (odberové miesta č. 24 a 22) majú relatívne vyššie obsahy trícia a pravdepodobne aktívnejší obeh s kratšou dobou zdržania. Najrýchlejší obeh má ale pravdepodobne vodný tok v zadnej časti Demänovskej jaskyne mieru (č. 14), ktorý systematicky vykazuje najvyššie stredné hodnoty obsahu trícia. Zaujímavý je

ale vyšší obsah trícia aj v ďalších tokoch Demänovskej jaskyne mieru (Koliba a pri chodníku, vzorky č. 34 a 35). Vzájomný pomer obsahov trícia v čase pre

jednotlivé toky podzemného hydrologického systému Demänovky je kolísavý (obr. 6), s časovo rozdielnym dosahovaním lokálnych miním a maxím v jednotlivých tokoch. Frekvencia odberov vzoriek nepostačuje na zistenie vzájomného posunu hodnôt a nájdenie rozdielov a podobností v ich kvantitatívnekvalitatívnom režime.

Ak skúmame zvlášť skupinu vzoriek podzemných v hydrogeologických vrtoch a prameňoch vôd (vzorkovacie miesta č. 1 – 28 – Lúčky – Vrt 1; č. 29 – Lúčky - Vrt 3; č. 13 - Prameň pod dolinkou Okno a č. 7 vyvieračka Vyvieranie (objekt 5 583) s celkovým počtom odberov n = 28 môžeme konštatovať, že sa jedná o vody, ktoré boli priemerne najdlhšie odrezané od kontaktu s atmosférickými zrážkami, v dôsledku čoho majú najnižšie obsahy trícia spomedzi všetkých skupín vzoriek. Podzemné vody tak môžu byť charakterizované aritmetickým priemerom obsahov <sup>3</sup>H o veľkosti 7,4 TU a mediánom obsahov <sup>3</sup>H o veľkosti 7.8 TU. Rozsah hodnôt obsahu trícia bol zistený medzi 1,5 TU až 11,2 TU. Oproti vodám jaskynných tokov podzemného hydrologického systému Demänovskej doliny boli podzemné vody vrtov a prameňov priemerne o 0,68, resp. 0,82 TU (medián / aritmetický priemer) chudobnejšie na trícium, oproti veľkým povrchovým tokom v doline boli chudobnejšie o 0,51, resp. 0,78 TU, oproti priesakovým vodám v jaskyniach chudobnejšie o 1,19 TU / 1,30 TU, oproti vodám menších prítokov Demänovky mali priemerne o 1,52 TU / 1,90 TU menšiu obiemovú aktivitu trícia, a voči zrážkovým vodám dokonca o 2,81 TU / 2,12 TU menej <sup>3</sup>H. Ak medzi sebou navzájom v rámci jednej skupiny podzemných vôd porovnávame výsledky z prameňov a vrtov, konštatujeme, že podzemné vody vo vrtoch (V-1 a V-3 na lokalite Lúčky) majú objemovú aktivitu trícia nižšiu o 0,89 TU / 0,02 TU.

Jednotlivé vzorkované zdroje podzemných vôd môžeme podľa mediánov hodnôt obsahov trícia zoradiť

v nasledovnom zostupnom poradí: č. 13 – Prameň pod dolinkou Okno (9,0 TU) > č. 7 – vyvieračka Vyvieranie (objekt 5 583 – 8,4 TU) > č. 29 – Lúčky – Vrt 3 (8,1 TU) > č. 28 – Lúčky – Vrt 1 (7,4 TU).

Toto poradie sa pri skúmaní hodnôt aritmetických priemerov mierne zmení tak, že sa vyvieračka Vyvieranie ocitne spolu s vrtom V-1 až na poslednom mieste v dôsledku veľmi nízkeho obsahu trícia vo vzorke z februára 2011. Zostupné poradie podľa aritmetického priemeru hodnôt objemovej aktivity <sup>3</sup>H bude teda nasledovné: č. 13 – Prameň pod dolinkou Okno (7,5 TU) > č. 28 – Lúčky – Vrt 1 (7,4 TU) > č. 29 – Lúčky – Vrt 3 (7,3 TU) > č. 7 – vyvieračka Vyvieranie (objekt 5 583 – 7,3 TU).

Vzájomný pomer obsahov trícia v čase je pre jednotlivé zdroje podzemných vôd (vrty / pramene) premenlivý (obr. 7), s rozdielnymi stúpajúcimi a klesajúcimi úsekmi, keď podobnosť časového chodu objemových aktivít <sup>3</sup>H môžeme pozorovať len v prípade dvojice hydrogeologických vrtov V-1 a V-3. Hustota odberov vzoriek tak neumožňuje analýzu časových vzťahov a prípadných posunov lokálnych miním a maxím pre zistenie času retardácie / doby zdržania sa vôd v podzemí pre individuálne zdroje.

Prekvapenie predstavujú priesakové vodv v jaskynných priestoroch, ktoré sú – napriek prítomnosti až neprirodzene ťažších stabilných izotopov – relatívne bohaté na objemovú aktivitu trícia. Ide o odberové miesta č. 11 - chrlič 1 DJS - priesak v Janáčkovom dóme; č. 12 - chrlič 2 (DJS) - Mramorové riečisko priesak; č. 27 - priesak v Demänovskej jaskyni mieru; č. 33 – priesak v jaskyni Okno. Celkový počet odberov n = 23, vzorky z odberného miesta č. 33 boli totiž odoberané len v rámci posledných sérií odberov. Menej trícia vykazuje táto skupina vôd len oproti vodám zrážok a podzemných jazierok (priemerne o 0,76 /1,18 TU, 0,17 /0,20 TU resp. ak uvažujeme medián / aritmetický priemer), ako aj voči skupine vzoriek z menších prítokov Demänovky (má o 0,17 /0,27 TU nižší obsah trícia). Naopak, obohatenie priesakových vôd z jaskynných priestorov o objemovú aktivitu <sup>3</sup>H je badateľné voči jaskynným tokom (tie majú priemerne menej <sup>3</sup>H o 0,42 / 0,83 TU), voči veľkým tokom Demänovskej doliny (majú menej o 0,85 / 0,86 TU), ale najväčší rozdiel v priemernom obohatení tríciom je v porovnaní s podzemnými vodami hydrogeologických vrtov V-1 a V-3 Lúčky (ktoré majú medián hodnôt o 1.74 TU a aritmetický priemer o resp. 1.66 TU menší). Rozsah hodnôt obsahu trícia sa v priesakových vodách jaskynných priestorov tu pohybuje v rozmedzí od 4,9 po 13,4 TU, medián má veľkosť 9,1 TU a aritmetický priemer hodnôt 9,0 TU. Priesakové vody v jaskynných priestoroch sa zo všetkých vyčlenených skupín vzorkovaných vôd najviac približujú skupinám vzoriek z menších prítokov Demänovky a vzoriek z jazier v jaskynnom systéme.



**Obr.** 7 Časový priebeh objemovej aktivity <sup>3</sup>H (TU) v skupine vzoriek podzemných vôd: vyvieračka Vyvieranie (objekt 5583); Prameň pod dolinkou Okno; Lúčky – Vrt 1; Lúčky – Vrt 3

**Fig. 7** Temporal changes in tritium volume activity <sup>3</sup>H (TU) on the groundwater sampling point group: Vyvieranie spring (object 5583); spring under the Okno Valley; Lúčky – Vrt 1 borehole; Lúčky – Vrt 3 borehole



**Obr. 8** Časový priebeh objemovej aktivity <sup>3</sup>H (TU) v skupine vzoriek vôd označovaných ako "priesakové" vody: chrlič 1 – priesak v Janáčkovom dóme (DJS); chrlič 2 – Mramorové riečisko – priesak (DJS); Demänovská jaskyňa mieru – priesak; Demänovská jaskyňa mieru – Koliba – priesak; Jaskyňa Okno – priesak

**Fig. 8** Temporal changes in tritium volume activity <sup>3</sup>H (TU) on the sampling point group marked as "seepage" waters: chrlič 1 – dripping in the Janáčkov Dome (DJS); chrlič 2 – dripping in the Mramorové riečisko part (DJS); Demänovská jaskyňa mieru Cave - seepage; Demänovská jaskyňa mieru Cave – Koliba part – seepage; jaskyňa Okno Cave – seepage



**Obr. 9** Časový priebeh objemovej aktivity <sup>3</sup>H (TU) v skupine akumulovaných vôd v jazierkach: Veľké jazero / Těsnohlídko (DJS); Demänovská jaskyňa mieru – jama

**Fig. 9** Temporal changes in tritium volume activity <sup>3</sup>H (TU) on the sampling point group of waters accumulated in the underground lakes: Veľké jazero / Těsnohlídko (DJS); Demänovská jaskyňa mieru Cave – jama / hole



**Obr. 10** Zhodný priebeh časových zmien objemových aktivít <sup>3</sup>H (TU) vzoriek vôd z podzemných jaskynných tokov v Achátovom dóme v Pustej jaskyni (č. 15) a v Údolnej jaskyni (č. 22)

**Fig. 10** Similar temporal changes in tritium volume activity <sup>3</sup>H (TU) on the sampling points on underground streams in Achátový Dome of the Pustá jaskyňa Cave (No. 15) and Údolná jaskyňa Cave (No. 22)

Jednotlivé odoberané zdroje skupiny vzoriek priesakové vody v jaskynných priestoroch môžeme zoradiť podľa priemerných obsahov trícia daných mediánmi hodnôt od najvyššieho po najnižší v nasledovnom zostupnom poradí: č. 33 – Jaskyňa Okno (11,1 TU) > č. 12 – chrlič 2 – Mramorové riečisko – priesak (DJS – 10,2 TU) > č. 11 – chrlič 1 – priesak v Janáčkovom dóme (DJS – 8,5 TU) > č. 27 – Demänovská jaskyňa mieru – priesak (8,0 TU). Podľa aritmetických priemerov obsahu <sup>3</sup>H môžeme tieto vzorkované lokality zoradiť v mierne pozmenenom poradí: č. 33 – Jaskyňa Okno (11,1 TU) > č. 12 – chrlič 2 – Mramorové riečisko – priesak (DJS – 9,3 TU) > č. 27 - Demänovská jaskyňa mieru – priesak (8,7 TU) > č. 11 – chrlič 1 – priesak v Janáčkovom dóme (DJS – 8,5 TU).

Vzhľadom na zistené obsahy trícia, priesaky v jaskyni Okno poukazujú na tesné svoje prepojenie so zrážkovými vodami alebo vodami menších bočných prítokov. Hoci prítomnosť na dané prostredia neprirodzene ťažších stabilných izotopov kyslíka a vodíka by mala nasvedčovať azda o pomalom, v každom prípade inom spôsobe obehu v horninovom prostredí, relatívne vysoké objemové aktivity trícia zrejme vysvetľujú pôvod veľkej časti vôd označovaných ako "priesakové", v procesoch kondenzácie tej istej vody v jaskynných priestoroch.

Časový priebeh obsahov trícia v skupiny vzoriek označovaných ako "priesakové" vody takisto nie je jednotný (obr. 8), na rozdiel od iných skupín vzoriek vôd je tu vplyv sezónnych výkyvov trícia charakteristický pre zrážkové vody menej badateľný. Aj tu však môžeme konštatovať, že nízka frekvencia odberov vzoriek nepostačuje vystihnutie na rozdielov špecifických ich režimu objemových aktivít <sup>3</sup>H.

v jazierkach Skupina vôd akumulovaných podzemného hydrologického systému Demänovskej doliny má len dva členy – odberné miesta: č. 23 – Veľké jazero / Těsnohlídko (DJS) a č. 26 - Demänovská jaskyňa mieru - jama. K dispozícii bolo len 12 vzoriek, 7 z Veľkého jazera / Těsnohlídka a 5 z jamy v Demänovskej jaskyni mieru). Po zrážkach a vodách menších prítokov sú však najbohatšie na <sup>3</sup>H – obsahujú ho o mierne viac ako priesakové vody, aj keď obe jazierka sú bez viditeľného prítoku a odtoku. Vody akumulované v jazierkach podzemného hydrologického systému Demänovskej doliny môžu byť charakterizované aritmetickým priemerom obsahov <sup>3</sup>H o veľkosti 9,2 TU a mediánom obsahov <sup>3</sup>H o veľkosti 9,3 TU, rozsah hodnôt obsahu trícia bol zistený medzi 5,2 TU až 15,9 TU. Oproti vodám zrážok vodám mali vody v jazierkach o 0,59 TU / 0,98 TU menej <sup>3</sup>H, a s vodami menších prítokov Demänovky si boli takmer navlas podobné (rozdiel bol 0,00 TU / 0,07 TU). O trochu menej trícia (o 0,17 TU / 0,20 TU) potom obsahujú priesakové vody, kým vody jaskynných tokov podzemného hydrologického systému Demänovskej doliny sú už priemerne o 0,59, resp. 1,02 TU (medián / aritmetický priemer) chudobnejšie na trícium. Za nimi nasledujú veľké povrchové toky s ešte menším priemerným obsahom trícia (o 1,02 TU / 1,06 TU), a rozdiel je najkontrastnejší medzi jazerami a vodami vo vrtoch – 1,91 TU / 1,86 TU v prospech vyššieho obsahu vo vodách jazierok, resp. stagnujúcich akumulácií vôd v jaskvnných priestoroch. Vodv na lokalite č. 23 – Veľké jazero / Těsnohlídko (DJS) majú medián tríciovej aktivity 7,5 TU a jej aritmetický priemer 7,9 TU (rozsah hodnôt 5,2 až 10,7 TU). Lokalita č. 26 – Demänovská jaskyňa mieru - jama mala v piatich vzorkách zistený obsah trícia 5,9 až 15,9 TU (medián 10,9 TU; priemer 11,1 TU). Rozdiely sú tu teda dosť veľké a môžeme konštatovať, že vzhľadom na zistenú objemovú aktivitu

<sup>3</sup>H je Veľké jazero / Těsnohlídko v Demänovskej jaskyni slobody voči atmosférickým zrážkam izolovanejším vodným telesom tvoreným akumulovanými vodami. Rozdiel časového priebehu hodnôt je pre obe lokality dosť výrazný (obr. 9).

Priebeh časových zmien objemových aktivít trícia pre jednotlivé vzorkovacie miesta môže napovedať o analogickom spôsobe obehu vôd v prostredí. Podobne môžeme (pokiaľ nám to len frekvencia odberu vzoriek umožňuje) hodnotiť aj potenciálny časový posun lokálnych miním a maxím obsahu trícia oproti tríciovému zloženiu zdrojových zrážkových vôd, ktoré vykazuje nezanedbateľné sezónne rozdiely.

S mimoriadne zhodným priebehom časových zmien objemových aktivít <sup>3</sup>H sa stretáme napríklad v prípade vzoriek odberaných z podzemných jaskynných tokov v Achátovom dóme v Pustej jaskyni (č. 15) a v Údolnej jaskyni (č. 22; obr. 10). Podobne je tomu v prípade vzoriek vôd z priesaku - chrliča 1 v Janáčkovom dóme (DJS, lokalita č. 11) a v toku dolinky Okno (lokalita č. 18). Vzájomne podobný je priebeh obsahu trícia v čase v prípade podzemného toku medzi 6. a 7. sifónom (Mramorové riečisko) v DJS (lokalita č. 17) a tokom v Podzemnom prepadaní (DJS, lokalita č. 21), teda vzoriek z jedného toku len mierne poznačenom vstupom vôd iného zloženia. Zaujímavý je analogický priebeh obsahu trícia v čase v prípade Demänovky nad objavným ponorom (č. 2) a jamou v Demänovskej jaskyni mieru (č. 26). Analogický priebeh obsahu <sup>3</sup>H bol zistený medzi menším povrchovým prítokom v doline Pustá (nad ponorením; č. 9) a podzemným tokom v Pekelnom dóme Demänovskej jaskyne slobody (č. 16) a medzi povrchovým tokom Demänovky nad vyvieračkou (objekt 5579, č. 6) a vyvieračkou Vyvieranie (objekt 5583; č. 7).

Časový posun obsahu trícia cca o 60 dní oproti zrážkam zo staníc Chopok, Luková a Jasná naznačujú (obr. 11) povrchové toky Demänovka nad objavným ponorom (č. 2), Radový potok (objekt 5558; č. 5) a Priečny potok nad ponormi (objekt 5568; č. 25). Jedná sa o umelo realizovaný "časový posun späť" daných sérií vzorkovania a pri danej časovej hustote vzoriek nie je možné sa jednoznačne vyjadriť o platnosti takéhoto vzťahu, ktorý nie je viditeľný v prípadoch iných povrchových tokov. Napríklad v prípade 60-dňového časového posunu obsahu trícia v podzemných vodách vrtov V-1 a V-3 na Lúčkach oproti zrážkam staníc Chopok, Luková a Jasná (obr. 12) nevieme vzhľadom na rozdielny (nízky) obsah <sup>3</sup>H vo vrtoch a jestvujúce druhé lokálne maximum v predchádzajúcom období jednoznačne posúdiť, či daná lokálne minimá odpovedajú zrážkam infiltrovaným v roku 2011 alebo sa jedná o prejav piestového efektu a príchodu na trícium bohatších vôd z iného obdobia.



**Obr. 11** Zdanlivý časový posun obsahu trícia cca o 60 dní vo vodách povrchových tokov Demänovka nad objavným ponorom (č. 2), Radový potok (objekt 5558; č. 5) a Priečny potok nad ponormi (objekt 5568; č. 25) oproti obsahu trícia v zrážkach zo staníc Chopok, Luková a Jasná)

**Fig. 11** Apparent time lag of tritium content of approximately 60 days in the surface waters of Demänovka Stream (above the Objavný ponor, No. 2), Radový potok Stream (object 5558; No. 5) and Priečny potok Stream above the swallow holes (object 5568; No. 25) vs. tritium content in precipitation at the Chopok, Luková and Jasná stations





**Fig. 12** Apparent time lag of tritium content of approximately 60 days in the groundwater of V-1 and V-3 boreholes on the Lúčky site (No. 28 and 25) vs. tritium content in precipitation at the Chopok, Luková and Jasná stations

### ZÁVER

Pre celý súbor vzoriek (n = 245+3) sa veľkosti obsahu trícia <sup>3</sup>H pohybovali v rozsahu od 1,5 TU až po 19,1 TU. Aritmetický priemer obsahu <sup>3</sup>H celého súboru mal veľkosť 8,7 TU, a rovnakú hodnotu mal aj medián (8,7 TU), keď veľkosť smerodajnej odchýlky bola 2,7 TU. V prípade zrážok bol pre objemové aktivity trícia potvrdený najvyšší obsah s priemerom 10,2 TU a mediánom hodnôt 9,9 TU, ale aj vyššia variabilita hodnôt od 4,0 TU po 19,1 TU.

Pre skupinu vzoriek z menších prítokov povrchovej Demänovky boli priemerné obsahy <sup>3</sup>H (9,3 TU) druhé najvyššie hneď za zrážkovými vodami a najvyššie spomedzi všetkých súborov "nezrážkových" vôd. Zaujímavá je pomerne veľká rozdielnosť priemerných obsahov trícia vo vodách tokov podzemného hydrologického systému Demänovskej doliny. Jednotlivé toky podzemného hydrologického systému Demänovky sa podľa mediánov hodnôt obsahov trícia zoraďujú v zostupnom poradí: č. 35 - Demänovská jaskyňa mieru - tok pri chodníku > č. 15 - Achátový dóm v Pustej jaskyni – podzemný tok > č. 14 – Vodný tok v Demänovskej jaskyni mieru (zadná časť) > č. 22 -Údolná jaskyňa > č. 24 - jaskyňa Štefanová – odtokový sifón > č. 20 – DJS – ľavostranný prítok Demänovky z Demänovskej medvedej jaskyne > č. 19 – jaskyňa Štefanová – staré časti > č. 17 – Mramorové riečisko – podzemný tok medzi 6. a 7. sifónom > č. 21 -Podzemné prepadanie – DJS > č. 16 – Pekelný dóm – podzemný tok.

Priemerné obsahy trícia v podzemnom toku Demänovky mierne stúpajú v Demänovskej jaskyni slobody od Pekelného dómu k Podzemnému prepadaniu (pravdepodobný vplyv prítoku Demänovkv z Demänovskej medvedej jaskyne s vyšším obsahom <sup>3</sup>H), v Mramorovom riečisku zas klesajú (vplyv povrchového toku Demänovky?). Z obsahu trícia vo vodách tiež vyplýva, že medzi tokom v Achátovom dóme v Pustej jaskyni a tokom v Pekelnom dóme v Demänovskej jaskyni slobody sa musí primiešavať voda s nízkym obsahom trícia (a zároveň podľa  $\delta^{18}$ O ľahšia; Auxt et al., 2012). Voda v "starých častiach" jaskyne Štefanová vykazuje nízke obsahy trícia a podobnosť dĺžky zdržania vôd s tokom podzemnej Demänovky. Tok v odtokovom sifóne jaskyne Štefanová a tok v Údolnej jaskyni majú relatívne vyššie obsahy trícia a pravdepodobne aktívnejší obeh s kratšou dobou zdržania. Najrýchlejší obeh majú ale pravdepodobne vodné toky v Demänovskej jaskyni mieru – "pri chodníku" (č. 35) i "v zadnej časti" (č. 14) ktoré systematicky vykazujú vysoké stredné hodnoty obsahu trícia.

Pri skupine vzoriek podzemných vôd v hydrogeologických vrtoch a prameňoch sa jedná o vody, ktoré boli priemerne najdlhšie odrezané od kontaktu

s atmosférickými zrážkami, v dôsledku čoho majú najnižšie obsahy trícia spomedzi všetkých skupín Podzemné vody charakterizované vzoriek. sú aritmetickým priemerom obsahov <sup>3</sup>H o veľkosti 7,4 TU a mediánom obsahov <sup>3</sup>H o veľkosti 7,8 TU. Naopak, vodv akumulované v jazierkach podzemného hydrologického systému Demänovskej doliny sú po zrážkach a vodách menších prítokov relatívne najbohatšie na 3H. Sú však medzi nimi rozdiely, Veľké jazero / Těsnohlídko (č. 23) má nízke obsahy trícia a je pravdepodobne izolovanejšie, kým jama v Demänovskej jaskyni mieru (č. 26) mala oveľa viac <sup>3</sup>H a javila tak veľkú afinitu k zrážkovým vodám.

"priesakové" Prekvapenie predstavujú vody v jaskynných priestoroch aj z hľadiska ich objemovej aktivity trícia, keď sú - napriek prítomnosti až neprirodzene ťažších stabilných izotopov - na trícium relatívne bohaté a zo všetkých vyčlenených skupín vzorkovaných vôd najviac približujú skupine vzoriek z menších prítokov povrchovej Demänovky. Hoci prítomnosť na dané prostredia neprirodzene ťažších stabilných izotopov kyslíka a vodíka (Auxt et al., 2012; Malík et al., 2013b) by mala nasvedčovať azda o pomalom, v každom prípade inom spôsobe obehu v horninovom prostredí, relatívne vysoké objemové aktivity trícia zrejme vysvetľujú pôvod veľkej časti vôd označovaných ako "priesakové", v procesoch kondenzácie tej istej vody v jaskynných priestoroch.

Vzájomný pomer obsahov trícia v čase pre individuálne zdroje podzemných vôd býva veľmi premenlivý, s rozdielnymi stúpajúcimi a klesajúcimi úsekmi, pretože hustota odberov vzoriek neumožňuje analýzu časových vzťahov a prípadných posunov lokálnych miním a maxím pre zistenie času retardácie / doby zdržania sa vôd v podzemí pre individuálne zdroje. Priebeh časových zmien objemových aktivít môže trícia pre jednotlivé vzorkovacie miesta napovedať o analogickom spôsobe obehu vôd v prostredí, s akým sa stretáme vo viacerých prípadoch (tok v Achátovom dóme v Pustej jaskyni / tok v Údolnej jaskyni; chrlič 1 v Janáčkovom dóme (DJS) / tok v dolinke Okno; Demänovky nad objavným ponorom / jama v Demänovskej jaskyni mieru; prítokom v doline Pustá (nad ponorením) / podzemný tok v Pekelnom dóme Demänovskej jaskyne slobody; Demänovky nad vyvieračkou / vyvieračkou Vyvieranie). Pri danej časovej hustote vzoriek nie je možné sa jednoznačne vyjadriť k časovému posunu obsahu <sup>3</sup>H v jednotlivých zdanlivo aj korelujúcich zdrojoch. Najdôležitejším zistením však je, že všetky analyzované typy vôd majú veľmi podobné obsahy trícia, čo je znakom toho, že obeh podzemných i povrchových vôd v Demänovskej doline, ako aj vôd podzemného hydrologického systému Demänovských jaskýň je vzájomne na seba veľmi intenzívne prepojený a pravdepodobne aj veľmi rýchly.

# POĎAKOVANIE

Prezentované výsledky výskumu obsahu trícia vo vodách v oblasti Demänovskej doliny mohli uzrieť svetlo sveta vďaka projektu "Zlepšenie starostlivosti o Ramsarskú lokalitu – Jaskyne Demänovskej doliny", ktorý bol realizovaný Správou slovenských jaskýň na základe výzvy Operačného programu Životné prostredie (číslo výzvy OPZP-PO5-09-1) pre programové obdobie 2007-2013 a spolufinancovaný z Európskeho fondu PODZEMNÁ VODA, 22(1), 2016, 20 - 39

regionálneho rozvoja a štátneho rozpočtu. Metodicky vychádzalo riešenie problematiky z aktivity 3.5 "Stanovenie kvantitatívnych parametrov prirodzených výstupov podzemných vôd v priestore a čase" projektu Integrovaný systém pre simuláciu odtokových procesov (ISSOP; ITMS kód 26220220066), ktorú v rokoch 2010 až 2013 riešil Štátny geologický ústav Dionýza Štúra (ŠGÚDŠ) na základe podpory Agentúry Ministerstva školstva SR pre štrukturálne fondy EÚ (ASFEU).

#### LITERATÚRA

- AUXT, A., MALÍK, P., KLAČANOVÁ, Z., PRISTAŠ, P., FILO, J., ŠUCHOVÁ, M., GRETSCH, J., GREGOR, M., BOTTLIK, F., MIKITA, S., PAŽICKÁ, A., BUČEK, S., ČERNÁK, R., NAGY, A., MICHALKO, J., MAGLAY, J., MÁŠA, B., ŠVASTA, J., DANKO, D. 2012: Doplnkový hydrogeologický prieskum a monitoring ramsarskej lokality – jaskyne Demänovskej doliny. Manuskript – archív Geofondu ŠGÚDŠ Bratislava, arch. č. 91991, 181 s.
- BELLA, P., HAVIAROVÁ, D., KOVÁČ, Ľ., LALKOVIČ, M., SABOL, M., SOJÁK, M., STRUHÁR, V., VIŠŇOVSKÁ, Z., ZELINKA, J. 2014: Jaskyne Demänovskej doliny. Štátna ochrana prírody SR, Správa slovenských jaskýň, Liptovský Mikuláš. ISBN 978-80-89310-72-2, AEPress s.r.o. Bratislava, 200 s.
- BIELY, A. (Ed.), BEŇUŠKA, P., BEZÁK, V., BUJNOVSKÝ, A., HALOUZKA, R., IVANIČKA, J., KOHÚT, M., KLINEC, A., LUKÁČIK, E., MAGLAY, J., MIKO, O., PULEC, M., PUTIŠ, M., VOZÁR, J. 1992: Geologická mapa Nízkych Tatier 1: 50 000, GÚDŠ, Bratislava, list mapy
- BIELY, A., BEZÁK, V. (Eds.), BIELY, A., BUJNOVSKÝ, A., VOZÁROVÁ, A., KLINEC, A., MIKO, O., HALOUZKA, R., VOZÁR, J., BEŇUŠKA, P., BEZÁK, V., HANZEL, V., KUBEŠ, P., LIŠČÁK, P., LUKÁČIK, E., MAGLAY, J., MOLÁK, B., PULEC, M., PUTIŠ, M., SLAVKAY, M. 1997: Vysvetlivky ku geologickej mape Nízkych Tatier 1: 50 000. GS SR, Vydavateľstvo Dionýza Štúra, Bratislava, 232 s.
- CLARK, I. 2015: Groundwater Geochemistry and Isotopes. Boca Raton, London, New York, CRC Press, Taylor and Francis group. 437 p. ISBN 978-1-4665-9173-8.
- CLARK, I., FRITZ, P. 1997: Environmental isotopes in hydrogeology. Boca Raton-New York, Lewis publishers. 328 p. ISBN 1-56670-249-6.
- DROPPA, V., KLAUČO, S. 1985: Mezozoikum SZ svahov Nízkych Tatier hydrogeologický prieskum. Etapová správa čiastkovej úlohy za rok 1984. IGHP Žilina závod Bratislava. Manuskript archív Geofondu ŠGÚDŠ Bratislava, arch. č. 65527, 73 s.
- HAVIAROVÁ, D. 2008: Nové poznatky k hydrografii jaskyne Štefanová (Nízke Tatry, Demänovská dolina). Aragonit. ISSN 1335-213X, 2008, roč. 13, č. 2, s. 20-23.
- HERICH, P. 2012: Poznámky k mapám jaskýň Demänovskej doliny. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti. ISSN 1335-5023, 2012, roč. XLIII, č. 1, s. 46-52.
- HERICH, P., HOLÚBEK, P. 2015: Nad tabuľkami jaskýň Demänovskej doliny. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti. ISSN 1335-5023, 2015, roč. XLVI, č. 3, s. 9-10.
- KENDALL, C., McDONNEL, J.J, (Eds.) 1998: Isotope Tracers in Catchment Hydrology. Elsevier Science BV, Amsterdam, second impression 2000. 839 p. ISBN 044450155.
- KULLMAN, E., HANZEL, V. 1976: Hydrogeologický výskum mezozoika SZ svahov Nízkych Tatier. Čiastková záverečná správa. Manuskript archív Geofondu Štátneho geologického ústavu Dionýza Štúra, Bratislava, arch. č. 38600, 116 s.
- MALÍK, P., HAVIAROVÁ, D., GREGOR, M., ŠVASTA, J., BOTTLÍK, F., ČERNÁK, R., MIKITA, S., PAŽICKÁ, A., AUXT, A. 2013a: Demänovská dolina: vzťah povrchových a podzemných vôd. *Aragonit.* ISSN 1335-213X, 2013, roč. 18, č. 2, s. 3-14.
- MALÍK, P., HAVIAROVÁ, D., GROLMUSOVÁ, Z., VEIS, P., MICHALKO, J. 2013b: Výsledky monitorovania izotopového zloženia vôd v podzemnom hydrologickom systéme Demänovskej doliny. Abstrakty 9. vedeckej konferencie Výskum, využívanie a ochrana jaskýň, Liptovská Sielnica, 23. – 26. 9. 2013. Aragonit. ISSN 1335-213X, 2013, roč. 18, č. 1, s. 56-58.
- MALÍK, P., HAVIAROVÁ, D., ŠVASTA, J., GREGOR, M., ČERNÁK, R., PAŽICKÁ, A., AUXT, A. 2016: Výsledky termometrických a rezistivimetrických meraní na podzemných a povrchových tokoch Demänovskej doliny. *Slovenský kras-Acta Carsologica Slovaca*. ISSN 0560-31375, 2016, roč. 4, č. 1, s. 33-52.
- MÉRYOVÁ, E. 1990: Mezozoikum SZ svahov Nízkych Tatier. Vyhľadávací hydrogeologický prieskum. Záverečná správa. Manuskript – archív INGEO Žilina.
- MICHALKO, J., AUXT, A., ČERNÁK, R., HYČKO, M., MALÍK, P., ŠVASTA, J., 2003: Estimation of the origin and groundwater flow directions in the area influenced by the construction of the highway tunnel Višňové, northern Slovakia. RMZ - Materials and geoenvironment. ISSN 0035-9645, 2003, vol. 50, no.1, p. 233-235.
- MOOK, W.G. 2006: Introduction to isotope hydrology. London, Taylor&Francis Group. 226 p. ISBN10 0-415-38197-5.

#### SUMMARY

Sampling areas for regular observation of tritium water levels were demarcated in the Slovak Demänovská dolina Cave system and its vicinity in 2011 – 2012. This system was formed by the Demänovka River under the eastern slopes of the Demänovská dolina Valley in Middle Triassic dark-grey Guttenstein limestones, and it is currently the longest speleologically interconnected karst system in Slovakia with 40.471 km length (Fig. 1). The most important caves – Demänovská jaskyňa slobody/Cave of Liberty (11,117 m) and Demänovská l'adová jaskyňa/Demänovská Ice Cave (2,174 m) are open to the public. They are also legally protected because the surrounding popular Jasná ski resort is rapidly developing and continuously creating environmental threats to the underground karst system, and to the area in general. The Demänovská jaskyňa slobody/Cave of Liberty of Liberty is considered the most beautiful cave in the system because it is the most morphologically variegated part of the Demänovský Cave System; developed over six levels by the ancient ponor inflows of the Demänovka River. It's reported length is 11,117 m; with elevation 196 m and the underground portion of the Demänovka watercourse flowing through the lowest floor of the Cave of Liberty. There are also the Demänovka river springs in the non-karstic granitic area of the main ridge of the Nízke Tatry Mts. at 2,000 m a. s. 1., and although the river's northward flow is partly sinking into underground around the Lúčky area, this resurfaces at the massive Vyvieranie/Springing karst stemming point.

The observed area varies in altitude from 800 m a. s. l. at the lowermost cave entrance to 2,024 m in Chopok Mt. at the top of the crystalline range; and our tritium monitoring network of 32 sampling sites was established for 2-monthly observation to improve knowledge of the Demänovský Cave System's hydrological and hydrogeological settings. Precipitation, surface streams, groundwater in boreholes and springs, and waters of the underground hydrological system including streams, lakes and dripping seepage in the cave system were sampled in this research. Tritium analyses were performed in the radiochemical laboratory of the National Reference Laboratory for the water sector in Slovakia (NRL) at the Water Research Institute (VÚVH/WRI). The <sup>3</sup>H volume activity was then determined by liquid scintillation spectrometer Tricarb 2900TR from Canberra Packard after previous electronic enrichment.

Results highlighted: (1) high <sup>3</sup>H variation in precipitation from 4.0 to 19.1 TU and (2) many similarities existed in waters from the surface, boreholes and springs (groundwater) and waters in the underground hydrological system, counting streams, underground lakes and cave dripping seepage. The entire "non-precipitation" dataset returned <sup>3</sup>H TU values from 1.5 to 15.9, and no significant differences were observed between the following: (1) the <sup>3</sup>H median 8.3 TU in surface streams running from the crystalline mountain range; (2) the median 9.3 TU in the smaller "autochthonous karstic" surface water streams formed in the adjacent valleys of the main karstic canyon; (3) 8.7 TU in running waters in the underground karstic system and (4) 9.3 TU in stagnant underground karstic lakes. However, slight differences were noted in borehole groundwater which recorded 7.4 TU and in spring groundwater with 8.7 TU. In conclusion, although the autochthonous seepage waters with their slow circulation through the fissures registered similar 8.7 TU <sup>3</sup>H median, these were isotopically enriched with  $\delta^{18}O$  (-9.8 ‰ and  $\delta^{2}H$  -66.7) as found by Auxt et al. (2012).

The most important finding, however, is that all of the types of sampled water types have very similar levels of tritium content: that means that the circulation of groundwater and surface water in the Demänovská dolina Valley, as well as waters of the underground hydrological system in the caves here is very closely related to each other and probably very fast.