

# Využití stopovačů pro studium proudění, původu a vývoje chemického složení vody pramene (Sv. Vojtěch, česká křídlová pánev)

Use of tracers for study of flow, origin and evolution of chemical composition of spring water (Sv. Vojtěch, Bohemian Cretaceous Basin)

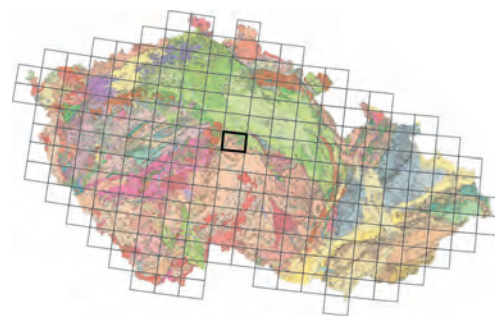
Jiří BRUTHANS<sup>1,2</sup> – ZDENKA CHURÁČKOVÁ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, Albertov 6, 128 43 Praha 2; bruthans@natur.cuni.cz

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

**Key words:** spring, mean residence time, isotope, chemistry, Bohemian Cretaceous Basin

**Abstract:** Spring Sv. Vojtěch was studied using wide spectra of tracers. In the past Sv. Vojtěch spring was important water supply for Kutná Hora town since 1495 till 20 th century. Flow rate, temperature, conductivity, chemistry and oxygen isotopic composition was studied in spring water and also in water from sinkholes in spring catchment. Tritium activity, SF<sub>6</sub> and freon 113 was studied in spring water as well. Two fundamentally different types of porosity may be distinguished in spring catchment: 1) water stored in matrix porosity (intergranular and fracture porosity) has volume about 3 milion m<sup>3</sup> and mean residence time about 23 years; 2) Karst conduits, which are draining matrix porosity have volume about 1200 m<sup>3</sup> and mean residence time 6–20 hours depending on flow



(13-32 Kolín)

rate. Maximum flow velocity in karst conduits is 15 km/day. Spring is fed by two water sources: 1) Diffused recharge (autochthonous and allochthonous) and by 2) concentrated recharge from artificial drainage tubes drained to sinkholes. Second source accounts for 0–66% of total spring yield depending on water stage. First water source has higher concentrations of all ions except nitrates. Direct runoff (event water) component is negligible even during high flow rate.

Svatý Vojtěch je příkladem pramene se slavnou historií a ne-slavným koncem. Pramen hrál od středověku až po 20. století rozhodující úlohu v zásobování Kutné Hory pitnou vodou (Lipský 1990). Kvůli znehodnocení pitné vody dusičnany a bakteriálním znečištěním se voda pramene po téměř pěti stech letech přestala využívat.

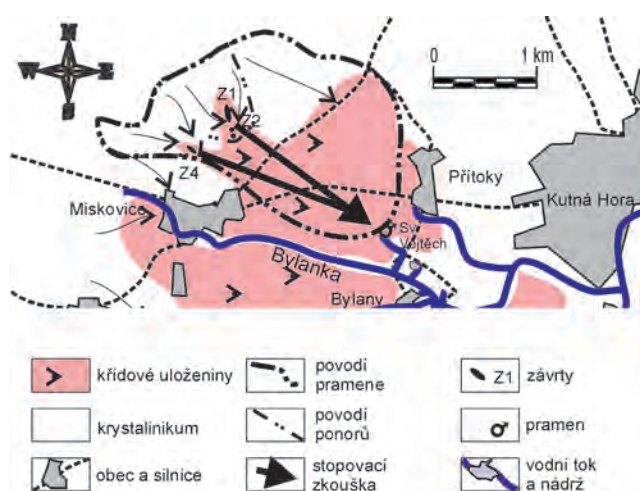
V povodí pramene bylo v uplynulých deseti letech provedeno velké množství měření a analýz, na jejichž základě je možné charakterizovat typy pórozy, určit jejich objem a rychlosti proudění, jakož i popsat zdroje vody a chemických látek v prameni a jejich časové změny.

## Přírodní poměry

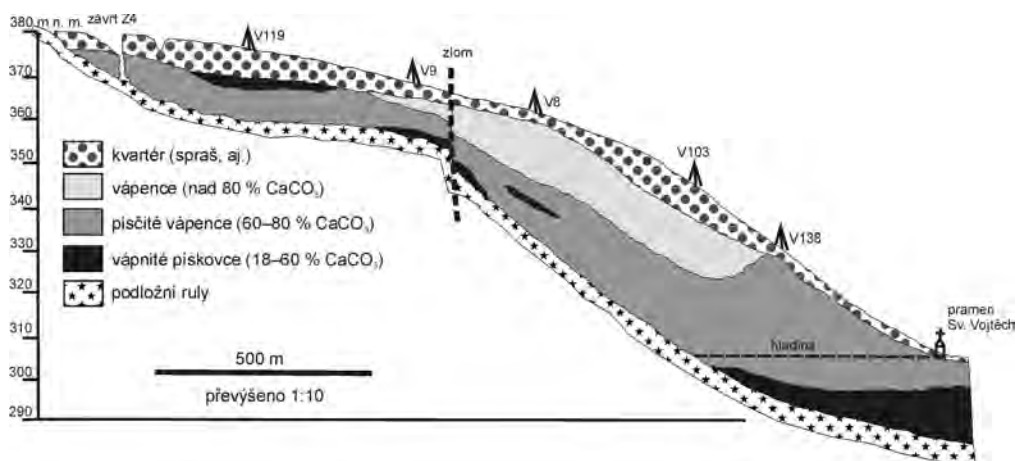
Povodí pramene Sv. Vojtěch je na intenzivně zemědělsky obdělávaných pozemcích s vysokou bonitou půdy; lesy se zde nevyskytují vůbec, nepatrná část povodí pramene je zastavěná (část Miskovic).

Území tvoří horniny křídlového stáří o mocnosti až 30 m, uložené na rulách a migmatitech kutnohorského krystalinika. Báze křídly upadá od Miskovic k východu (Hašlar 1973) se spádem mezi 2 a 10 %. Místy jsou ruly hluboce zvětralé

kaolinickým zvětráváním předkřídlového stáří. Důležitou skutečností jsou výchozy rul, zaznamenané na mnoha místech od Miskovic (Hušpauer 2000) přes dno údolí Bylanky po Bylany (Schmidt 1961). Údolí Bylanky tak dělí křídlové vápence na



Obr. 1. Mapa povodí pramene Sv. Vojtěch. Geologie převzata ze Schmidta (1961) a Schwartze a Lochmanna (1966).



Obr. 2. Geologický řez od závrťů k prameni Sv. Vojtěch. Řez přímo prochází vrtem V119. Ostatní vrty jsou do vzdálenosti 100 m od řezu. Sestaveno na základě vrťů dokumentovaných Hašlarem (1973).

dva s vysokou pravděpodobností izolované výskyty. U velké většiny vrtných profilů lze sledovat v křídových sedimentech postupný nárůst vápnité složky do nadloží. Při bázi se obvykle nachází kaolinické písky a pískovce (místy v podstatě nezpevněné), směrem do nadloží přechází až do vápenců (obr. 2). I v nich se nachází místy nezpevněné polohy (Hašlar 1973). Písčitost roste od Z a S směrem k Bylanům, dále k V pak písčité sedimentace karbonátovou prakticky zcela nahrazuje (Hašlar 1973). Právě přechod do pískovců může být příčinou lokalizace pramene Sv. Vojtěch. Další možností může být výchoz rul v této oblasti (Schwartz – Lochmann 1966).

Severně od obce Miskovice se nachází skupina čtyř závrťů. Morfologie závrťů byla již v minulosti detailně popsal Lipský (1990) a jeho číselné značení závrťů je použito i v této práci. Do závrťů Z1, Z2 a Z4 byly svedeny zatrubněné drenáže z polí. Zatímco povrchový odtok z polí byl sledován pouze za nejvyšších vodních stavů do závrťů Z1 a ani za té situace se nepodílel více než 25 % na celkovém množství vody mizící do závrťů, celkový přítok z drenáží do všech závrťů dosahoval až  $22 \text{ l.s}^{-1}$  (14.1.2011). Většinu roku jsou však závrty (ústí drenáží) suché.

Hladina podzemní vody ve vrtech byla obvykle zastižena při bázi křídových sedimentů, s výjimkou oblasti u Bylan, kde koresponduje s nadmořskou výškou pramene Sv. Vojtěch (obr. 2). V některých případech je zakleslá až do zvětralých podložních rul (Hašlar 1973). Specifický podzemní odtok dosahuje  $1\text{--}2 \text{ l.s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  (Krásný et al. 1982).

## Metodika

Průtok byl měřen metodou ředění (details viz Kopáč 2007). Hodnoty  $\delta^{18}\text{O}$  byly měřeny v laboratoři ČVUT s odchylkou  $\pm 0,04\text{--}0,15 \%$  pro interval spolehlivosti 95 %. Aktivita tritia byla měřena po elektrolytickém obohacení na kapalínovém scintilačním spektrometru Tri Carb 3170 na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze, obsah  $\text{SF}_6$  byl měřen pomocí plynové chromatografie (GC – ECD Spurenstoff laborator, Německo). Chemismus vody byl analyzován v laboratořích geologických ústavů PIFUK a v laboratoři České geologické služby pomocí FAAS, ICP-OES a HPLC.

## Základní informace o prameni

Při průměrné vydatnosti pramene  $4,3 \text{ l.s}^{-1}$  (režimní měření ČHMÚ z let 1968 až 1971) a při výše uvedeném specifickém odtoku dosahuje plocha povodí pramene okolo  $2\text{--}3 \text{ km}^2$ . Z toho zhruba polovinu povodí tvoří ruly a polovinu křídové vápence a pískovce. Povodí pramene lze omezit na území s. od údolí Bylanky a z. od Přítok (obr. 1).

Vydatnost pramene Sv. Vojtěch kolísala během sledování mezi  $2,6$  a  $54 \text{ l.s}^{-1}$ . Za průměrných a nízkých vodních stavů je teplota pramene stálá a pohybuje se okolo  $9,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Za maximálních průtoků po tání sněhu teplota pramene klesá až o  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Opakované stopovací zkoušky ze závrťů u Miskovic doložily, že voda z nich odtéká do pramene Sv. Vojtěch. Návratnost stopovače okolo 100 % dokazuje, že pramen Sv. Vojtěch je jediným místem, kde voda ze závrťů vyvěrá. Za vysokých vodních stavů, kdy se pramen výrazně zakaluje a klesá jeho teplota, dorazí voda ze závrťů do Sv. Vojtěcha již za pouhých pět hodin. Stopovací zkoušky vykazovaly velmi nízkou disperzivitou ve srovnání s jinými oblastmi v Česku (Pecletovo číslo až 740). Je tak zřejmé, že průlinová pórozita se při proudění v kanálu od závrťů k prameni výrazněji neuplatňuje.

Z geologické situace (sklon podloží, hladiny ve vrtech) a provedených stopovacích zkoušek (vysoká rychlost proudění a malý objem kanálu) vyplývá, že voda do pramene proudí ve formě volného toku buď v krasovém kanálu, nebo v kanálu vymletém v bazálních pískách a zvětralých rulách. Zvodnění kolektoru se vyskytuje pouze v posledních 500 m před pramenem.

## Doba zdržení vody

V oblastech, kde se vyskytují silně propustné zóny (vodivá tektonika, krasové kanály) je vhodné rozlišovat dvě diametrálně odlišné kategorie pórozity (Bruthans 2006):

1. výrazně propustné zóny, v tomto případě krasové kanály, a
2. pórozitu puklin a průlin (vše mimo krasových kanálů), dále „základní pórozita“.

V krasových oblastech v ČR se obvykle většina vody infiltruje ze srážek nejprve do prostředí se základní pórozitou,

odkud je následně zcela drénována do krasových kanálů a jimi do pramene (Bruthans 2006).

Charakter, objem a rychlost proudění v krasových kanálech lze nejlépe zkoumat pomocí stopovacích zkoušek, kdy je stopovač injektován přímo do začátku krasového kanálu (do ponoru) a vzorkován na ústí krasového kanálu (pramene). Prostředí se základní pórozitou lze studovat pomocí přirozených stopovačů (jako jsou např. stabilní izotopy O, H, tritium, freony, SF<sub>6</sub>), které se do prostředí se základní pórozitou infiltrují spolu se srážkami. Protože vzorky na stanovení těchto látek se odebírají z pramene, je nutné odečíst vliv krasového kanálu, který vždy v konečné fázi prostředí se základní pórozitou drénuje.

Ze závrťů Z1 a Z4 bylo provedeno celkem 6 stopovacích zkoušek za různých vodních stavů. Vzdálenost mezi ponory a pramenem je po opravě na nepravidelný průběh podzemních dutin 3 km. Objem zatopené části krasových kanálů podle stopovacích zkoušek dosahuje 1200 m<sup>3</sup>. Střední doby zdržení vody v krasovém kanálu jsou nepřímo úměrné průtoku ztrácejícího se toku před ponorem v závrťu Z4: od šesti hodin při 4 l.s<sup>-1</sup> po 20 hodin při 0,3 l.s<sup>-1</sup>. Maximální rychlost proudění tak v krasových kanálech dosahuje za nejvyšších průtoků až 15 km za den (18 cm.s<sup>-1</sup>).

Z pramene byly opakovaně odebrány vzorky na stanovení aktivity tritia. Tritiová aktivita klesala z 22,6 ± 1,4 TU v roce 2001, přes 18,9 ± 1,5 TU v roce 2003 na 10,2 ± 0,2 TU v roce 2010. Modelováním v programu FLOW (Maloszewski – Zuber 1996) byla získána dobrá shoda mezi modelem a skutečnými aktivitami tritia pouze pro disperzní model D 0,1 a střední dobou zdržení vody pramene 23 let. Obsah rozpuštěného SF<sub>6</sub> (1,8 ± 0,2 fmol.l<sup>-1</sup>) a freonu 113 (0,5 ± 0,1 pmol.l<sup>-1</sup>), vzorkovaných v prosinci 2003, odpovídá střední době zdržení 5 a 10–15 let (Bruthans 2006). Protože ale voda v krasovém kanálu proudí ve formě volného toku, je pravděpodobné, že doba zdržení na základě těchto dvou plynných stopovačů bude výrazně podceněna vzhledem ke kontaminaci obou plynů ze současné atmosféry.

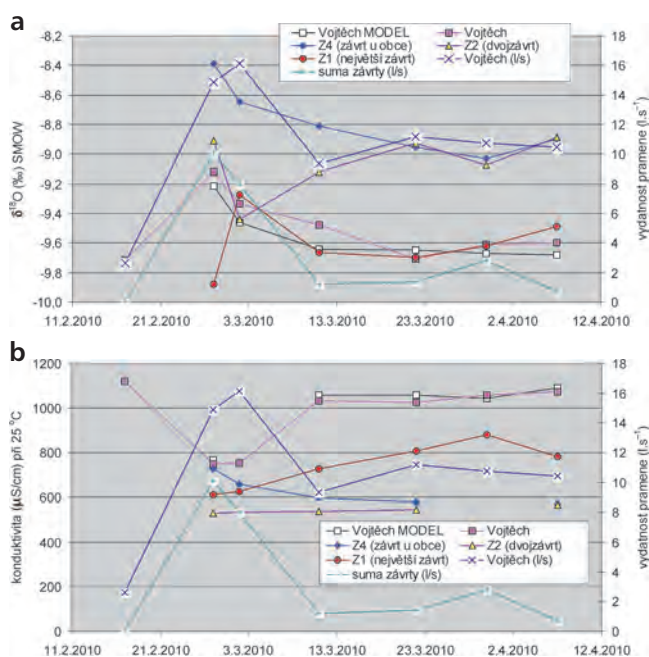
V letech 2001–2003 se hodnoty δ<sup>18</sup>O deseti vzorků odebraných v různých ročních obdobích pohybovaly mezi -9,4 až -9,8 ‰, po výrazném tání sněhu s maximem průtoků pramene 43 l.s<sup>-1</sup> vystoupila hodnota δ<sup>18</sup>O na -9 ‰. Podle hodnot δ<sup>18</sup>O dosahuje podíl vody s dobou zdržení v řádu prvních měsíců za nižších vodních stavů pouhých 5 %. Detailní odběry v roce 2010 a 2011 za výrazného tání sněhu ukazují tab. 1 a obr. 3. Ani v těchto případech nedošlo k většímu kolísání, což vylučuje významnější působení přímé infiltrace tající vody nebo složek s dobou zdržení v řádu prvních měsíců v prameni.

Střední doba zdržení vody v povodí pramene (prostředí se základní pórozitou + krasové kanály) je tedy okolo 23 let, což je o 4 řády více než střední doba zdržení v krasových kanálech zjištěná vyhodnocením stopovacích zkoušek (6–20 hodin). Jinými slovy, v prostředí se základní pórozitou tráví voda v průměru 99,99 % času, pouze zbylých 0,01 % celkové doby připadá na krasový kanál. Vynásobením střední doby zdržení a průměrného průtoků pramene 4,3 l.s<sup>-1</sup> (porovnáni ČHMÚ z let 1968–1971) vychází objem vody v povodí pramene na 3,1 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Krasové kanály (1200 m<sup>3</sup>)

Tabulka 1. Hodnoty δ<sup>18</sup>O v říjnu 2010 a během tání v roce 2011 (‰ SMOW)

	Vojtěch (l.s <sup>-1</sup> )	Vojtěch	Z4	Z2	Z1	sněh
3.10.2010	6*	-9,6	-9,1	-9,2	-9,5	
14.1.2011	54	-10,0	-9,7	-10,4	-10,7	-18,0
3.2.2011	35	-9,7	-9,4	-9,4	-9,8	
19.1.2011	49	-9,6	-9,4	-9,5	-9,8	
11.2.2011	32	-9,7				

\*vydatnost pramene byla stanovena kvalifikovaným odhadem (jinak měřena)



Obr. 3. Průběh hodnot δ<sup>18</sup>O (a) a konduktivity (b) v prameni a v drenážích vyústěných do závrťů. Pro srovnání i modelové hodnoty získané z rovnic 1 a 2. Hodnota δ<sup>18</sup>O sněhu dne 17.2.2010 byla -16,1 ‰ SMOW.

tedy zabírají jen 0,04 % celkové zatopené pórozity v povodí pramene. Zdržení vody v prostředí se základní pórozitou je zřejmě vázáno na rozpadavé partie kaolinických pískovců a zvětralé ruly v podloží křídly. Samotné vápence jsou na většině území nezvodnělé díky dostatečné propustnosti a výraznému sklonu podložních hornin. Většina povodí pramene by se tak dala označit za území stoku. Značnou dobu zdržení lze očekávat též v mocných sprašových pokryvech v nenasycené zóně (na polovině území dosahuje mocnost spraší 5–10 m, ve zbytku území okolo 2 m).

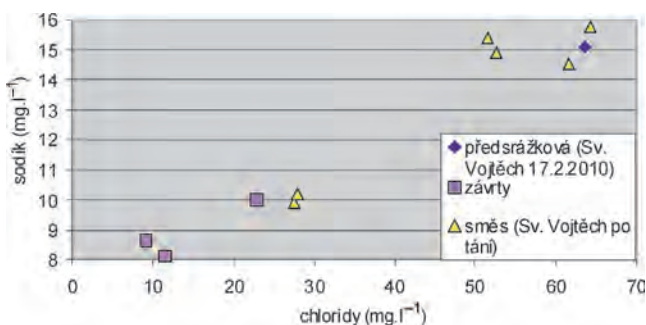
### Obsah jednotlivých typů vody v prameni při výrazném tání sněhu

Lze očekávat, že po tání nebo výrazné srážce může být v prameni přítomno několik různých typů vod:

1. voda z ponorů,

Tabulka 2. Pearsonův koeficient korelace mezi vydatností pramene nebo podílem vody z ponorů na vydatnosti pramene a fyzikálními, chemickými a izotopovými parametry

parametr	podíl vody z ponorů na vydatnosti pramene (%)	vydatnost pramene (rok 2010 i 2011)	vydatnost pramene mezi 17.2 a 7.4.2010
n (počet)	10	10	7
konduktivita	-0,95	+0,08	-0,84
teplota vody	-0,56	-0,65	-0,55
izotopy kyslíku	+0,84	-0,16	+0,72
dusičnany	+0,74	+0,04	+0,51
chloridy	-0,93	+0,05	-0,83
sířany	-0,81	+0,36	-0,77
hydrogenkarbonáty	-0,88	-0,48	-0,89
kalcium	-0,90	-0,08	-0,81
hořčík	-0,82	+0,26	-0,71
sodík	-0,88	+0,05	-0,73
draslík	-0,64	-0,69	-0,82
stroncium	-0,93	-0,35	-0,76
křemík	-0,89	-0,33	-0,73



Obr. 4. Vztah mezi koncentrací chloridů a sodíku pro závrtů a pramen Sv. Vojtěch v roce 2010. Chemické složení vody pramene po tání sněhu v roce 2010 lze vyjádřit jako směs předsrážkové vody a vody ze závrtů.

2. přímá infiltrace srážkové vody z deště nebo tajícího sněhu, infiltrující se mimo ponory,

3. předsrážková voda z prostředí se základní pórozitou.

Aby bylo možné ve vodě z pramene tyto složky rozlišit a kvantifikovat, byly při celkem sedmi měřicích akcích mezi 17. únorem a 7. dubnem 2010 měřeny vydatnost pramene a průtok vody v ponorech, konduktivita a teplota vody a odebírány vzorky na  $\delta^{18}\text{O}$ , zčásti i na chemické složení. Dne 17. února činila vydatnost pramene pouze 2,6 l.s<sup>-1</sup>, všechny ponory byly suché, takže veškerou vydatnost pramene tvořila předsrážková voda (ve smyslu následného tání). Po výrazném tání dne 27.2.2010 se zvýšila vydatnost pramene na 15 l.s<sup>-1</sup>. Do ponorů v té době vtékalo celkem 10 l.s<sup>-1</sup>, takže podíl vody z ponorů na vydatnosti pramene dosáhl 66 %.

Během tání nedošlo ani ve vodě z pramene, ani ve vodě z drenáží ústících v závrttech k výraznému poklesu hodnot

$\delta^{18}\text{O}$  (maximální pokles u závrtu Z4 byl 0,6 ‰). Izotopové složení sněhu (-16,1 ‰  $\delta^{18}\text{O}$ ) bylo přitom dostatečně kontrastní. Je tak zřejmé, že jak v prameni, tak i ve vodě v závrttech výrazně převažovala předsrážková voda, která podle izotopového složení byla tvořena vodou částečně infiltrovanou během předchozího léta a podzimu. Z výše uvedeného a z obr. 3a je zřejmé, že voda z ponorů je svým izotopovým složením daleko bližší vodě pramene, než vodě z tajícího sněhu. Výrazné utlumení kolísání  $\delta^{18}\text{O}$  ve vodě ze závrtů i během této výrazné infiltrační události ukazuje, že voda v ponorech má nezanedbatelnou dobu zdržení z hlediska přirozených stopovačů ( $\delta^{18}\text{O}$ ) a v okamžiku vstupu do ponorů má tedy výrazně nenulové stáří.

Pomocí modelu byla testována možnost, že po tání sněhu je voda pramene tvořena pouze směsí vody předsrážkové a vody z drenáží zaústěných do ponorů. Modelová konduktivita (a též izotopové složení) byla počítána pro každé datum odběru ze vzorců:

$$C_{\text{pram}} = (Q_{Z1} \cdot C_{Z1} + Q_{Z2} \cdot C_{Z2} + Q_{Z4} \cdot C_{Z4} + Q_{\text{zbýv}} \cdot C_{\text{předsr}}) / Q_{\text{pram}} \quad (1)$$

$$Q_{\text{zbýv}} = Q_{\text{pram}} - (Q_{Z1} + Q_{Z2} + Q_{Z4}), \quad (2)$$

kde:  $Q_Z$  a  $C_Z$  jsou průtoky a konduktivita (nebo izotopové složení) jednotlivých závrtů Z1, Z2 a Z4;  $Q_{\text{zbýv}}$  je rozdíl mezi průtokem pramene a celkovým průtokem ze závrtů;  $Q_{\text{pram}}$  je vydatnost pramene;  $C_{\text{předsr}}$  je konduktivita nebo izotopové složení vody pramene z 17.2.2010, tj. před táním sněhu;  $C_{\text{pram}}$  je konduktivita nebo izotopové složení vody pramene z odběru po tání.

Jak modelová konduktivita, tak i modelová hodnota  $\delta^{18}\text{O}$  je velmi blízká naměřeným hodnotám obou veličin (obr. 3a, b), což ukazuje, že chemické a izotopové složení pramene je směsí čtyř složek: přítoku ze tří závrtů a předsrážkové vody. Zastoupení přímé infiltrace srážkové vody je tedy zanedbatelné.

## Chemické složení vody

Chemické složení a fyzikální parametry vody pramene byly sledovány za tří různých situací:

a) za nízkého vodního stavu, kdy byly závrtů suché (např. 17.2.2010),

b) za stavu, kdy byl vysoký průtok toků z drenáží mizících v ponorech (celkem 10 l.s<sup>-1</sup>), avšak velmi nízký odtok z prostředí se základní pórozitou (5 l.s<sup>-1</sup>), přelom únor/březen 2010,

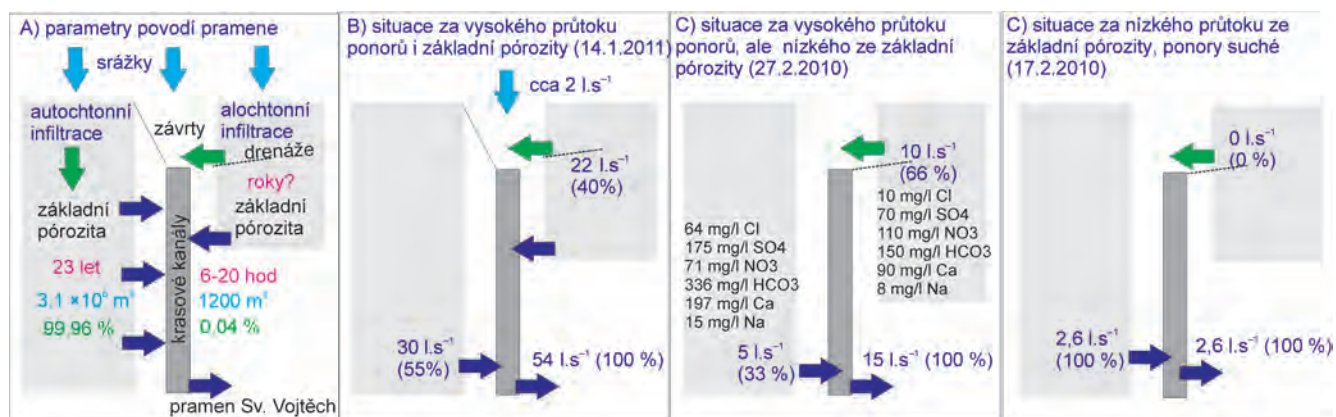
c) vysoký průtok na ponorech (23 l.s<sup>-1</sup>) i z prostředí se základní pórozitou (32 l.s<sup>-1</sup>), leden 2011.

Pro jednotlivé srážko-odtokové situace platí, že s rostoucí vydatností pramene klesá koncentrace všech rozpuštěných látek s výjimkou dusičnanů, klesá konduktivita a teplota vody (tab. 2). Protože však nositelem nízké konduktivity (nízké mineralizace) je voda z ponorů, dosáhl pramen nejnižší mineralizace nikoli za nejvyššího změřeného průtoku 54 l.s<sup>-1</sup>,

Tabulka 3. Vybrané chemické analýzy charakterizující vodu z pramene za různých vodních stavů a vodu z drenáží vyústěných do závrtů

objekt	datum	Q (l.s <sup>-1</sup> )	pon.(%)	Cl <sup>-</sup> [mg.l <sup>-1</sup> ]	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> [mg.l <sup>-1</sup> ]	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg.l <sup>-1</sup> ]	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> [mg.l <sup>-1</sup> ]	Ca <sup>2+</sup> [mg.l <sup>-1</sup> ]	Mg <sup>2+</sup> [mg.l <sup>-1</sup> ]	Na <sup>+</sup> [mg.l <sup>-1</sup> ]	K <sup>+</sup> [mg.l <sup>-1</sup> ]	Sr <sup>2+</sup> [mg.l <sup>-1</sup> ]	Si [mg.l <sup>-1</sup> ]
Sv. Vojtěch	17.2.2010	2,6	0%	64	175	71	336	197	17	15	1,5	0,5	6,7
Sv. Vojtěch	27.2.2010	14,9	68%	28	102	96	210	120	13	10	1,1	0,3	4,5
Sv. Vojtěch	2.3.2010	16,1	50%	28	105	84	213	123	13	10	1,0	0,3	4,7
Sv. Vojtěch	11.3.2010	9,3	13%	64	161	80	282	175	17	16	1,3	0,5	6,0
Sv. Vojtěch	22.3.2010	11,2	13%	52	152	64	290	184	17	15	1,4	0,5	6,7
Sv. Vojtěch	27.3.2010	10,7	26%	53	167	63	303	192	18	15	1,4	0,5	6,8
Sv. Vojtěch	7.4.2010	10,4	7%	62	186	74	303	184	17	15	1,4	0,5	6,5
Sv. Vojtěch	14.1.2011	54	43%	47	165	77	207	148	16	14	1,1	0,3	5,0
Sv. Vojtěch	19.1.2011	49,3	14%	65	202	73	275	177	19	16	1,1	0,4	5,8
Sv. Vojtěch	8.2.2011	34,3	7%	62	212	72	275	219	20	15	1,2	0,5	6,6
Z1 hl. tok	27.2.2010	2,2		23	74	27	212	93	14	10	2,5	0,2	3,0
Z1 hl. tok	14.1.2011	7*		24	112	75	207	145	13	11	1,3	0,2	4,0
Z1 do šachty	14.1.2011	3*		13	70	100	153	93	12	9	2,5	0,2	5,7
Z2	2.3.2010	4*		12	76	121	78	72	12	8	0,8	0,2	4,7
Z2	14.1.2011	8,2		9	75	60		93	11	7	0,6	0,2	5,8
Z4	27.2.2010	2,8		9	56	108	239	124	14	9	0,6	0,2	3,2
Z4	14.1.2011	4,1		11	75	88	214	110	12	9	0,9	0,2	5,6

\*vydatnost pramene byla stanovena kvalifikovaným odhadem (jinak měřena); pon. (%) – podíl vody z ponorů na vydatnosti pramene; Z1 do šachty – tok vtékající do jícnu propásky v závrtu Z1; Z1 hl. tok. – hlavní tok přitékající do závrtu Z1



Obr. 5. Model zdrojů vody v prameni na základě získaných dat. Světle modré šipky – srážková voda, tmavě modré šipky – podzemní voda, zelené šipky – půdní voda. Fialové střední doby zdržení podzemní vody, světle modře objem pórozity v povodí pramene, zelené zastoupení různých typů pórozity v povodí pramene.

ale za stavu, kdy sice průtok pramene dosáhl maxima jen 15 l.s<sup>-1</sup>, ale ve vodě pramene byl vůbec nejvyšší zaznamenaný podíl vody z ponorů (okolo 66 %), viz tab. 3. Z tabulky 2 je zřejmé, že existuje těsná korelace mezi podílem vody z ponorů a koncentrací různých iontů v prameni. Voda vtékající do závrtů z různých drenáží se vzájemně neliší obsahy síranů, sodíku, hořčíku, křemíku a stroncia. Výrazněji se v jednotlivých závrtích liší obsahy vápníku, hydrogenukarbonátů a chloridů. Velmi výrazné rozdíly mezi jednotlivými drenážemi jsou pak v obsahu draslíku a dusičnanů (tab. 3). Pro dvojice chloridy-sodík (obr. 4) nebo sírany-stroncium lze vykreslit grafy, kde chemické složení pramene padá na mísičnou linii mezi 1. vodou ze závrtů a 2. předsrážkovou vodou.

## Závěry

V povodí pramene lze rozlišovat dva diametrálně odlišné typy pórozity:

1. prostředí se základní pórozitou (průliny a pukliny) má objem vody zhruba 3 000 000 m<sup>3</sup> a voda v ní tráví okolo 23 let;

2. krasové kanály, které drénují prostředí se základní pórozitou, mají objem okolo 1200 m<sup>3</sup> a voda v nich tráví v závislosti na vodním stavu 6–20 hodin.

Maximální rychlost proudění v krasových kanálech dosahuje za nejvyšších průtoků až 15 km/den. Pramen je dotován dvěma zdroji vod: vodou z rozptýlené infiltrace (autochtonní

i alochtonní) a vodou z drenážních rour zaústěných do závrťů, které odvodňují půdní zónu alochtonní infiltrace. Podíl vody z drenáže dosahuje 0–66 % celkové vydatnosti pramene v závislosti na vodním stavu (obr. 5). Vody prvního zdroje mají vyšší koncentrace všech iontů s výjimkou dusičnanů.

*Poděkování. Analýzy byly provedeny v rámci projektů MSM0021620855 a VaV SP/2e1/153/07. RNDr. J. Šantrůčkovi děkuji za cenné kritické připomínky k rukopisu. Za pomoc s terénním měřením patří poděkování Jakubu Šindelářovi, Zdeňce Slabé, Janu Soukupovi, Heleně Vysoké a Petru Mikušovi.*

## 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 s. – Přírodověd. fak. Univ. Karl. v Praze.
- HAŠLAR, O. (1973): Závěrečná zpráva Kutnohorsko II. – 64 s. Geindustria, n.p. Praha, P25676.
- HUŠPAUER, M. (2000): Miskovice, dům pečovatelské služby. – 12 s. Geoservis Kutná Hora, P101412.
- KOPÁČ, J. (2007): Měření průtoku pomocí stopovačů: NaCl a měření konduktivity. Diplom. práce, 79 s. – Přírodověd. fak. Univ. Karl. v Praze.
- KRÁSNÝ, J. – KNĚŽEK, M. – ŠUBOVÁ, A. – DAŇKOVÁ, H. – MATUŠKA, M. – HANZEL, V. (1982): Mapa odtoku podzemní vody ČSSR. – 52 s. Čes. hydrometeorol. úst., Praha.
- LIPSKÝ, Z. (1990): Miskovické pseudozávrty. – Bohemia cent. 19, 7–21.
- 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.
- SCHMIDT, K. (1961): Kutnohorsko vápence. – 31 s. Geol. průzk. n.p. Praha, P12874.
- SCHWARTZ, R. – LOCHMANN, Z. (1966): Krasové jevy v cenomanských vápencích mezi Miskovicemi a Malešovem u Kutné Hory. – Čs. Kras. 18, 63–68.