

- KOVARÍK, P. (1998): Studánky a prameny Čech, Moravy a Slezska. – Nakl. Lid. noviny. Praha.
- KRCHOV, P. (2006a): Císařská návštěva. In: M. TRYML (ed.): Kniha o Břevnově, 9–10. – Městská část Praha 6. Praha.
- KRCHOV, P. (2006b): Mezi námi v Břevnově II. – Břevnovan, časopis pro občany Prahy 6, 17, 5/6, 11. Praha.
- LUKEŠ, Z. (2001): Neznámý Plečník? Vstupní objekt vodovodní štolý. – Architekt, 47, 12, 57. Praha.
- MLADA, M. (2006): Hrst vzpomínek na starý Břevnov. In: M. TRYML (ed.): Kniha o Břevnově, 162–165. – Městská část Praha 6. Praha.
- MORÁVEK, J. (1954): Ke vzniku Hvězdy. – Umění, 2, 3, 199–211. Praha.
- PAVLANSKÝ, J. (1928): Vývoj zásobování vodou hlavního města Prahy od XV. století do konce roku 1927: Předneseno ve výtahu na VIII. sjezdu Plynárenského a vodárenského sdružení čl. v Praze r. 1927. Zvláštní otisk z odborného časopisu „Plyn a voda“, 8, 1–75. Nakl. Vodáren hlav. města Prahy. – Tisk Neubert, Pour a spol. Praha I, Bílkova 17. Praha.
- PODVOLECKÝ, F. (1934): Podzemní vody a prameny v okolí Prahy na území listu speciální mapy Praha – 3853. – St. úst. hydrod. hydrotechn. T. G. Masaryka. Praha – Podbaba.
- RUTH, F. (1903): Kronika královské Prahy, seš. 2, seš. 3. – Nakl. Pavla Korbra v Praze.
- ŘEPKA, L. (1985): Inženýrsko-geologické a základové poměry konventního traktu kláštera sv. Markéty v Praze 6 – Břevnově. – MS Staveb. geol. Praha.
- STREIT, J. (1960): Divy staré Prahy. – Nakl. Mladá fronta. Praha.
- ŠIMEK, R. (1959): Zpráva o inženýrsko-geologickém mapování části severozápadního území Prahy (list speciální mapy Praha-3953). – Zpr. geol. Výzk. v Roce 1959, 159–160. Praha.
- TRYML, M. ed. (2006a): Kniha o Břevnově. – Městská část Praha 6. Praha.
- UREŠ, E. (1987): Studánky Velké Prahy. – Portál – Zpravodaj dobrovolných aktivů st. památk. péče a ochrany přírody v Praze, 12, 32 (2/1987), 1–28.
- VÁVROVÁ, V. (1997): Voda pro Pražský hrad. In: J. JASEK et al.: Klenot města. Historický vývoj pražského vodárenství, 15–28. – VR-ateliér. Praha.
- VEGER, J. (1993): Prameny a vodovodní štolý na území Prahy. – Výzkum pro praxi, 23, 1–102. Výzk. úst. vodohospod. T. G. Masaryka. Praha.
- VOJÍŘ, V. (1995): Bludy o historickém podzemí „Václav Cílek – Podzemní Praha – 1995“. – <http://www.nautilus.cz>.
- WIRTH, Z. (1907): Soupis památek historických a uměleckých v Království českém od pravěku do počátku XIX. století, sv. XXVI. Politický okres Kladenský. – Čes. Akad. Vědy, Slovesn. Umění.
- ZÁRUBA, Q. (1948): Geologický podklad a základové poměry vnitřní Prahy. – Geotechnica, 5.
- ZAVŘEL, J. (2006): Krajinou opuk a pískovců. In: M. Tryml (ed.): Kniha o Břevnově, 30–33. – Městská část Praha 6. Praha.
- ZAVŘEL, J. ed. (2005): Před branami Velké Prahy. Obrazový průvodce územím Prahy 6 před rokem 1920. – Městská část Praha 6. Praha.

## DOBA ZDRŽENÍ PODZEMNÍ VODY V PROSTŘEDÍ HYDROGEOLOGICKÉHO MASIVU, V POVODÍ SE SYSTEMATICKOU DRENÁŽÍ

### Groundwater resident time in the catchment area with artificial drainage system in the crystalline rock environment

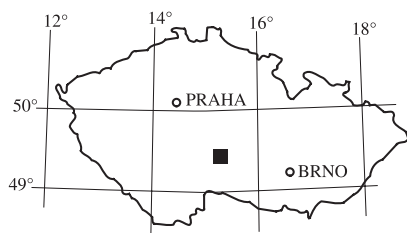
RENÁTA KADLECOVÁ<sup>1</sup> – FRANTIŠEK BUZEK<sup>1</sup> – JIŘÍ BRUTHANS<sup>2</sup> – ANTONÍN ZAJÍČEK<sup>3</sup> – TOMÁŠ KVÍTEK<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup> Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy, Albertov 6, 128 43 Praha 2

<sup>3</sup> Výzkumný ústav meliorací a ochrany půdy, v. v. i., Žabovřeská 250, 156 27 Praha 5

(23-14 Pelhřimov)



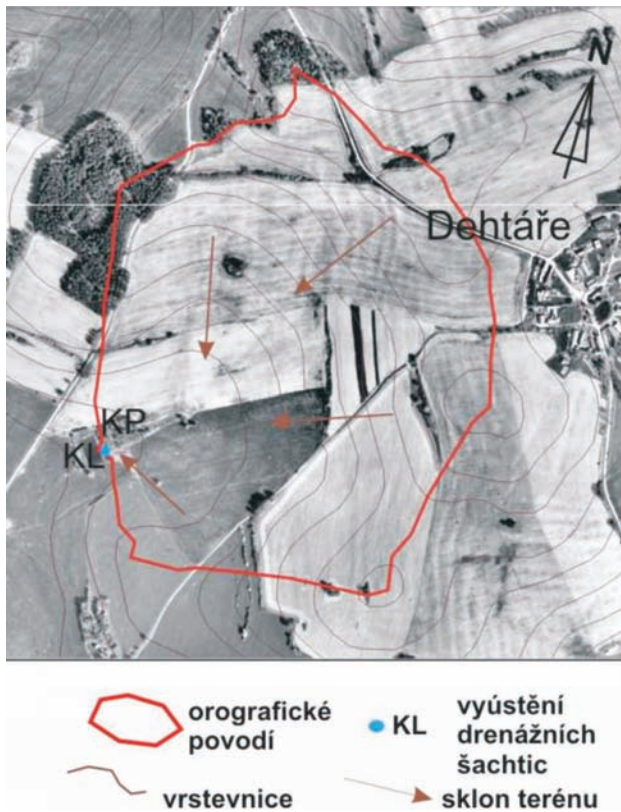
**Key words:** resident time, CFC, SF<sub>6</sub>, nitrate contamination, artificial drainage system

**Abstract:** In the Dehtáře catchment area with extensive agriculture exploitation a groundwater outflow and residence time were studied in 2004–2006. The area is located in crystalline rocks, with characteristic unconnected water saturated zone and local flow. The catchment area is characterized by 32.6 % weep drain. Nitrate concentration in groundwater together with CFCs, SF<sub>6</sub>, oxygen stable isotopes and tritium concentration were used to estimate the proportion of modern water in the supply artificial drainage system and wells. The artificial drainage system contains about 80 % groundwater with resident time 5–20 years and 10–20 % groundwater with resident time 5–13 months.

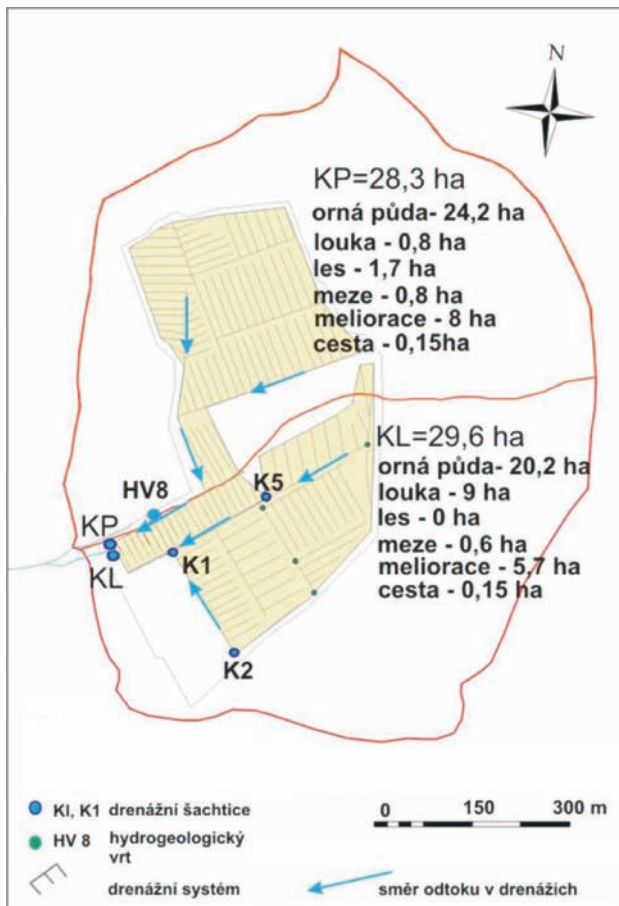
Tvorba odtoku, koncentrace nitrátů v drenážní vodě a průměrná doba zdržení podzemní vody v prostředí hydrogeologického masivu byly studovány v období 2004–2006 v zemědělsky obdělávaném povodí Dehtáře v Hořepnické pahorkatině v nadmořské výšce 497–549,8 m s typickým erozně denudačním reliéfem na migmatitech a pararulách. Studovaná lokalita se nachází 8,5 km sv. od Pelhřimova, mezi obcemi Dehtáře a Kojčice.

Podle klimatických poměrů (QUITT 1971) náleží studované území do mírně teplé oblasti MT 5 se srážkovým úhnnem ve vegetačním období 350–450 mm a mimovegetačním 250–300 mm. V uzávěru povodí pramení bezejmenný potok, který je pravostranným přítokem Želivky (1-02-09-02).

Povodí o rozloze 58,3 ha (obr. 1) je odvodněno systematickou drenáží na ploše 19 ha (32,6 % plochy povodí – obr. 2). Odvodňovací systémy byly v povodí vybudovány v roce 1977 v místech s trvalým a nebo občasným zamokřením. Rozchody sběrných drénů jsou 13 a 20 m s hloubkou uložení pod terénem 1,0 m, u svodných drénů 1,1 až max. 1,5 m. Systém je vyústěn do požární nádrže (bývalý rybník) pod uzávěrem studovaného povodí. Povodí je rozděleno včetně drenážních systémů na levou (KL) a pravou část (KP, obr. 2).



Obr. 1. Letecký snímek povodí Dehtáře.



Obr. 2. Situace systematické drenáže v povodí Dehtáře.

Tabulka 1. Koncentrace nitrátů ( $\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$ ) v podzemní vodě drenážních systémů za období 1/2003–9/2006

	K1	K2	K5	KL	KP
min.	29	48	58	25	33
max.	229	253	196	204	191
prům.	135	152	106	110	91
med.	143	152	105	112	93

### Metodika

Pro modelování tvorby odtoku byly v povodí Dehtáře v pravidelném intervalu 1krát měsíčně vzorkovány podzemní vody z drenážních šachtic KL, KP (v uzávěru povodí), K2, K1 a K5, a slévaný vzorek ze srážek ke stanovení stabilních izotopů  $^{18}\text{O}$  a  $^{15}\text{N}$ . Pracovníci Výzkumného ústavu meliorací a ochrany půdy, kteří dlouhodobě provádějí v povodí monitoring, sledují průtok drenážních vod v šachticích automatickými měřicími stanicemi, které zaznamenávají výšku hladiny, průtok, teplotu vody a teplotu vzduchu v šachticích.

Z naměřených hodnot  $\delta^{18}\text{O}$  (ekvibrace vody s oxidem uhličitým a jeho měřením na hmotnostním spektrometru Mat 251) ze srážek a odtoku v období 2004–2006 byla stanovena potenciální výše infiltrace (GRABCZAK et al. 1984) do podzemních vod a určen podíl infiltrace na odtoku. Detailní modelování odtoku bylo provedeno fitovacími modely (KENDALL – MC DONNELL 1998, MALOSZEWSKI – ZUBER 1982). Pro drenážované povodí se osvědčil model pístového toku s proměnnou složkou podzemní vody (85–90 % podzemní vody, zbytek krátkodobá složka odtoku).

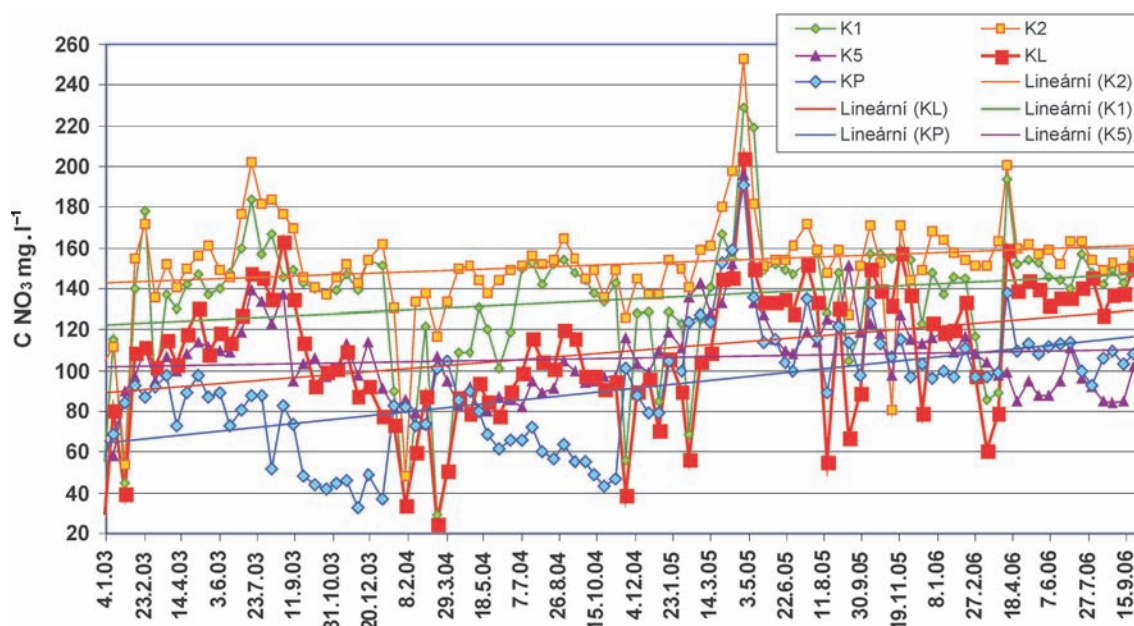
V roce 2006 byly v období nízkých úrovní hladin podzemní vody odebrány také vzorky podzemních vod z drenážních šachtic K2, K5 a vrtu HV8 na stanovení tritia, freonů 11 ( $\text{CFCl}_3$ ), 12 ( $\text{CF}_2\text{Cl}_2$ ) a 113 ( $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$ ) a  $\text{SF}_6$ . Vzorky pro stanovení freonů a  $\text{SF}_6$  byly odebrány podle metodiky OSTERA et al. (1996).

Místa odběru pro stanovení freonů ve vodách byla vybrána tak, aby nedocházelo k proudění vzduchu v místě odběru a tím k potenciální kontaminaci vnější atmosférou. Měření obsahu freonů a  $\text{SF}_6$  provedla Spurenstofflabor v Německu pomocí plynové chromatografie (GC-ECD). Tritium bylo po nabohacení elektrolýzou analyzováno na kapalinovém scintilačním spektrometru na PĚFUK Praha. Pro výpočet obsahu freonů a  $\text{SF}_6$  v infiltrované vodě byly použity atmosférické koncentrace z publikace PLUMMERA et al. (2006), k modelování střední doby zdržení program FLOW (MALOSZEWSKI – ZUBER 1996).

### Výsledky a diskuse

Variabilitu koncentrací nitrátů v podzemní vodě drenážních systémů (KL, KP, K1, K2 a K5) v období 1/2003–9/2006 v povodí Dehtáře ukazuje tab. 1 a časový vývoj koncentrací nitrátů v podzemní vodě drenážních systémů obr. 3.

Odlišné jsou obsahy  $\delta^{18}\text{O}$  ve vodě v K1 a K2 (obr. 4) i jejich reakce na změny. Odlišnost vyplývá z velikosti mikropovodí a drenážních systémů obou šachtic (K1 má mikro-



Obr. 3. Vývoj koncentrací nitrátů v drenážních šachticích KL, KP, K1, K2 a K5.

Tabulka 2. Výsledky stanovení freonů, SF<sub>6</sub> a tritia v podzemní vodě

vzorek	datum odběru	freon 12 pmol . l <sup>-1</sup>	±	freon 11 pmol . l <sup>-1</sup>	±	freon 113 pmol . l <sup>-1</sup>	±	SF <sub>6</sub> fmol . l <sup>-1</sup>	±	tritium TU	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg . l <sup>-1</sup>
HV 8	19. 10. 2006	0,5	0,2	0,2	0,1	0,01	0,05	1	0,2	–	1,2
K5	26. 10. 2006	2,6	0,2	4,6	0,5	–	–	2,2	0,3	9,65	105
K2	26. 10. 2006	2,6	0,2	5,1	0,5	0,46	0,05	1,7	0,2	11,4	184

(pmol . l<sup>-1</sup> . 10<sup>-12</sup> mol . l<sup>-1</sup>; fmol . l<sup>-1</sup> . 10<sup>-15</sup> mol . l<sup>-1</sup>; TU tritiová jednotka)

povodí 3,3 ha, K2 má pouze 1 drén a mikropovodí 2,3 ha), což ovlivňuje poměr zastoupení podzemní vody v drenážních systémech a vstupu z nenasycené zóny (podpovrchový odtok = rychlá složka odtoku) do drenáží a podzemní vody z nasyceného pásma (podzemní voda s. s. = pomalá složka odtoku). K infiltraci srážek dochází v celé ploše studovaného povodí a poměr infiltračních koeficientů je 2 : 3 v mimovegetačním a 1 : 3 ve vegetačním období.

Odhad průměrné doby zdržení srážek v jednotlivých odběrových místech je různý – od 5,5 měsíce pro levou stranu povodí po 13,3 měsíce pro pravou stranu povodí, 7 a 11 měsíců je pro drenážní šachtice K1 a K2. Do šachtice K2 vstupuje nejen podpovrchový odtok, ale i podzemní voda s. s. Zasažené srážky svým hydraulickým působením zvyšují odtok z povodí (obr. 5) se zpožděním 1–2 měsíců, ale do odtoku se dostávají se zpožděním cca 1 roku.

Při aplikování exponenciálního modelu vychází střední doba zdržení podzemní vody v šachtici K5 v rozmezí 5–20 let, pro šachtici K2 12–15 let. Delší dobu zdržení vykazala voda ve vrtu HV8, který je situován v ose povodí v oblasti přirozené drenáže podzemních vod – podle SF<sub>6</sub> je doba zdržení 30 let a podle freonů přes 100 let. Je zřejmé, že modelování založené na koncentracích SF<sub>6</sub> vede k výrazně nižším středním dobám zdržení, než je tomu v případě freonů. Odlišnost vyplývá z rozdílného chování stopovačů v podzemní vodě. Freony podléhají degradaci v silně anaerobním

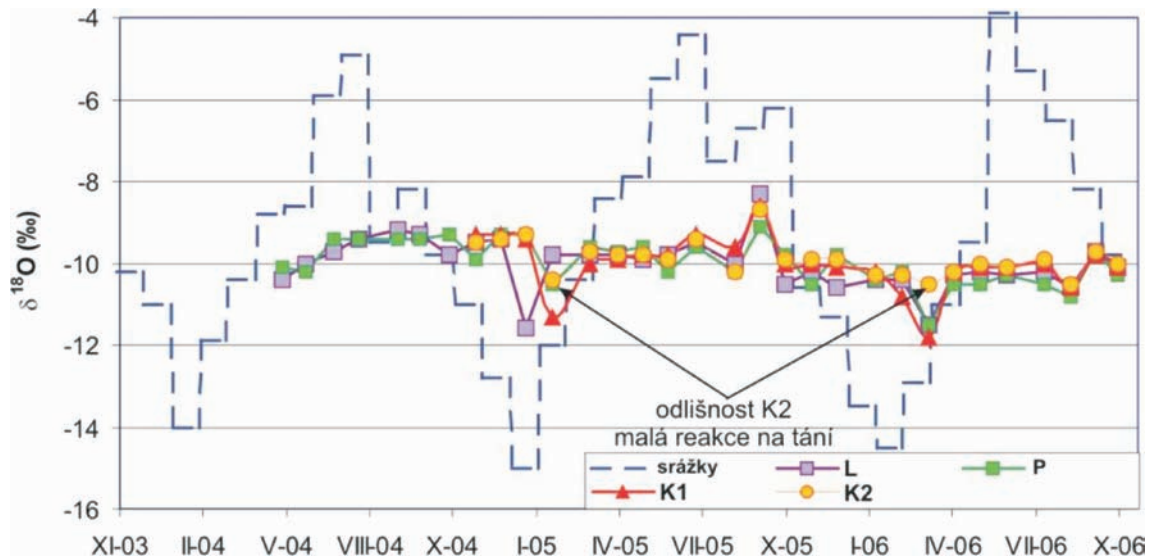
Tabulka 3. Interpretace výsledků

objekt	střední doba zdržení podle exponenciálního modelu (roky)			
	F12	F11	F113	SF6
HV 8	200	> 200	> 100	30
K5	15	20	–	5
K2	12	15	15	12

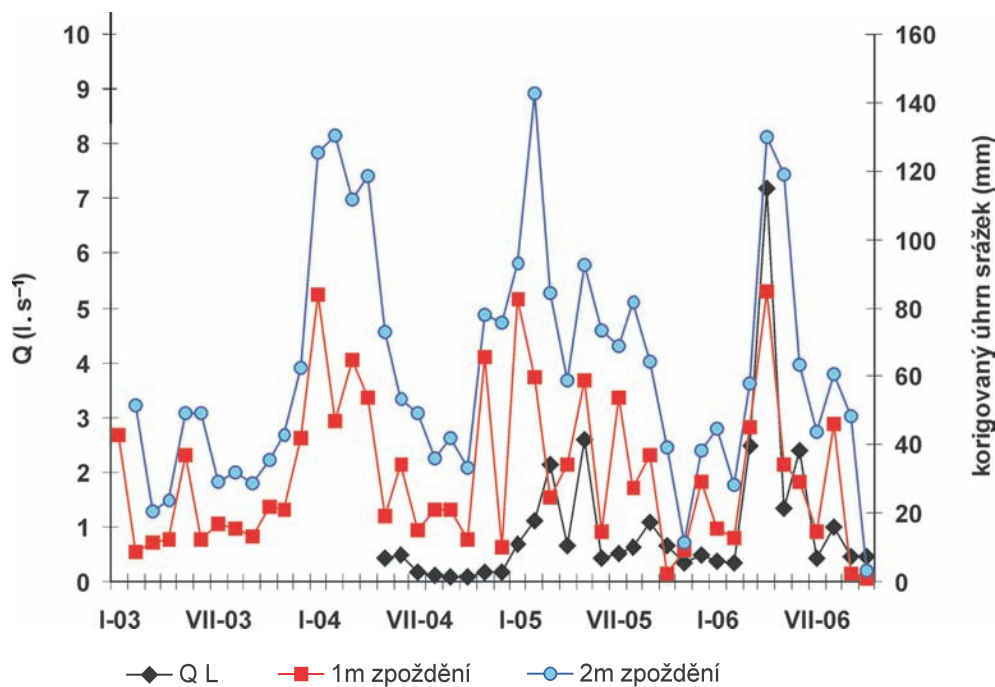
prostředí, což vede k nadhodnocení doby zdržení oproti realitě. Nejstabilnější je freon 12, naopak freon 11 se degraduje nejsnadněji (OSTER et al. 1996), SF<sub>6</sub> nedegraduje vůbec. Voda zachycovaná v drenážích neprošla anoxickými podmínkami, neboť obsahuje vysoké koncentrace dusičnanů (tab. 1). Naopak ve vrtu HV8 jsou koncentrace dusičnanů pod mezí detekce (1,2 mg . l<sup>-1</sup>), takže anoxické podmínky vyloučit nelze. Nízké koncentrace dusičnanů však lze vysvětlit i dlouhou dobou zdržení podzemní vody. SF<sub>6</sub> je více než freony náchylnější ke kontaminaci atmosférickým SF<sub>6</sub>, neboť jeho koncentrace v atmosféře velmi prudce stoupá. Tento proces povede k podcenění doby zdržení vody.

Z uvedeného je zřejmé, že v případě drenáží jsou pravděpodobnější data o době zdržení z freonů, tj. 12–20 let, s tím, že skutečná střední doba zdržení může být i vyšší (konta-





Obr. 4. Závislost  $\delta^{18}\text{O}$  srážek a odtoku na čase v povodí Dehtáře.



Obr. 5. Závislost průtoku v levé části povodí na čase v porovnání se sumou korigovaných srážek (modelově zpožděny o 1 a 2 měsíce).

minace povede k podcenění střední doby zdržení). Stanovené hodnoty tritria v drenážních šachticích K2 a K5 odpovídají současným hodnotám. V případě vrtu HV8 přesahuje střední doba zdržení 30 let. Bohužel vzorek na stanovení tritria z výše uvedeného vrtu nebyl odebrán.

## Závěr

- Zasažené srážky zvyšují odtok z povodí v prostředí hydrogeologického masivu se zpožděním 1–2 měsíců a jde o hydraulickou reakci.
- Infiltrované srážky se do drenážních systémů dostanou

nejdříve za 5,5 měsíce v levé části povodí, kde je orná půda na 85,5 % plochy, zatímco v pravé části povodí, kde je 68 % orné půdy v oblastech infiltrace a stoku, se srážka dostane do drenáží za 13,3 měsíce. Za 7 a 11 měsíců se srážky objeví v drenážních šachticích K1 s mikropovodím 3,3 ha a K2 s mikropovodím 2,2 ha, při hloubce uložení drenáží 1 až 1,5 m pod terénem.

- Střední doba zdržení vody v horninovém prostředí, která je zachycena systematickou drenáží, dosahuje v povodí Dehtáře podle exponenciálního modelu 12–20 let, v ose údolí, kde vyvěrá podzemní voda přirozeně, je doba zdržení 30 až 200 let. Zastoupení vody s dobou zdržení v řádu měsíců tvoří pouze 10–20% z celkové vydatnosti drenáží.

*Poděkování. Výsledky vznikly v rámci projektu QF 4062 „Ověření vlivu a rozsahu zatrávnění a zornění vybraných lokalit na dusičnanové zatížení povrchových a podzemních vod“ jako podklad pro opatření v Akčních programech, financovaného Národní agenturou pro výzkum v zemědělství a v rámci výzkumného záměru č. MSM0021620855 Přírodovědecké fakulty – Ústavu hydrogeologie Karlovy univerzity. Autoři příspěvku děkují Dr. H. Osterovi za provedení analýz CFC a SF<sub>6</sub>.*

## Literatura

- GRABCZAK, J. – MALOSZEWSKI, P. – ROZANSKI, K. – ZUBER, A. (1984): Estimation of the Tritium Input Function with the Aid of Stable Isotopes. – *Catena*, 11, 105–114.
- KENDALL, C. – MC DONELL, J. J. (1998): Isotope tracers in catchment hydrology. – Elsevier, Amsterdam.
- 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, Vienna.
- MALOSZEWSKI, P. – ZUBER, A. (1982): Determining the Turnover Time of Groundwater Systems with the Aid of Environmental Tracers. – *J. Hydrol.*, 57, 207–231.
- OSTER, H. – SONNTAG, C. – MÜNNICH, K. O. (1996): Groundwater are dating with chlorofluorocarbons. – *Wat. Resour. Res.*, 32, 10, 2989–3001.
- PLUMMER, L. N. – BUSENBERG, E. – DRENKARD, S. – SCHLOSSER, P. – EKWURZEL, B. – WEPPERNIG, R. – MC CONNELL, J. B. – MICHEL, R. L. (1998): Flow of river water into karstic limestone aquifer – 2. Dating the young fraction in groundwater mixtures in the Upper Floridan aquifer near Valdosta, Georgia. – *Appl. Geochem.*, 13, 1017–1043.
- QUITT, E. (1971): Klimatické oblasti Československa. – *Stud. Geogr.*, 16, Brno.