

HYDROGEOCHEMIE A DYNAMIKA SKAPOVÝCH VOD V JESKYNĚ VÝPUSTEK (MORAVSKÝ KRAS)

Dripwater hydrogeochemistry and dynamics in Výpustek Cave (Moravian Karst)

Radoslava Bodláková, Jiří Faimon

Ústav geologických věd PŘF MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno; e-mail: 327891@mail.muni.cz

(24-41 Vyškov)

Key words: dripwater dynamics, electric conductivity, pH, rainfall, perched reservoir, Výpustek Cave

Abstract

Hydrogeochemistry and dynamics of selected drips was studied in Výpustek Cave (Moravian Karst). It was found that rainfall only weakly correlate with drip rate, despite a fundamental relation between both the variables. The drip rate was decreasing at all the studied sites, as rainfalls were insufficient to refill water in the epikarstic perched reservoirs. The drip rate and dripwater conductivity were positively correlated, probably due to water mixing in vadose zone fissures and epikarst. The pH and water conductivity were negatively correlated as an impact of partial pressures of epikarstic CO₂. A hint of negative correlation between drip rate and pH is probably the result of water degassing dynamics.

Úvod

Horizontálně prosakující krasové vody jsou klíčovým faktorem procesů jako je rozpouštění vápenců nebo růst, popř. koroze speleotém. Procesy, které probíhají v epikrasu a vadózní zóně jsou nepřístupné přímému pozorování a lze je do značné míry rekonstruovat ze složení tzv. skapových vod (vody skapávající ze stropu jeskyně). Cílem této práce bylo (1) zjistit bližší vztah mezi intenzitou skapů a srážkovými úhrny a (2) přispět k lepšímu pochopení dynamiky skapových vod a jejího vlivu na krasové procesy. Jako místo studia byla zvolena jeskyně Výpustek v Moravském krasu.

Jeskyně Výpustek se nachází ve střední části Moravského krasu v Křtinském údolí, asi 2 km od obce Křtiny směrem na město Adamov (obr. 1). Je vytvořena hlavně v lažáneckých a vilémovických vápencích, pouze okrajově sem zasahují též vápence křtinské (Chlupáč et al. 2002). Jeskynní prostory byly vytvářeny vodami Křtinského potoka, který v současnosti protéká již jen spodními patry jeskyně. Do určité míry se na tvorbě jeskynních prostor

mohly podílet i vody z Babické plošiny, která se nachází nad jeskyní jv. směrem k obci Babice.

Metodika

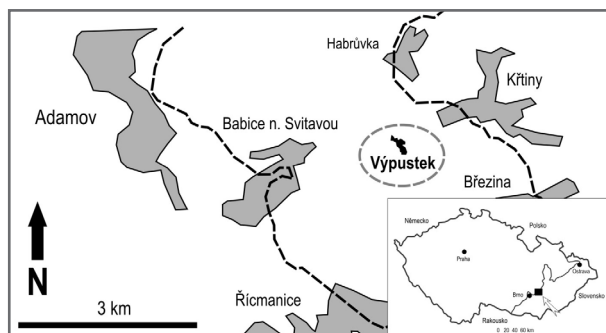
Měření vybraných parametrů tří skapových vod probíhalo v jeskyni Výpustek v období od 1. 7. 2011 do 20. 9. 2011. Ve zpřístupněné části jeskyně byly na délce přibližně 600 m vytipovány tři permanentní skapy: skap S1 v místě s mocností nadloží cca 8 m, skap S2 v místě s mocností nadloží cca 25 m a skap S3 z nadloží o mocnosti cca 40 m.

Na těchto místech byly rozmístěny plastové nádoby na odběr skapové vody. Odběr probíhal vždy 1× denně. U všech skapů byla měřena vydatnost/rychlost skapu v ml/hod, konduktivita v μS/cm, pH a orientačně také teplota vody. Hodnoty pH byly měřeny digitálním pH-metrem WTW 330i se skleněnou elektrodou, konduktivita byla zjišťována konduktometrem Exttech ExStik II. Pro měření objemu skapu byl používán odměrný válec. Objem nakapané vody byl přepočítán na objemovou rychlost skapu v ml/hod.

Množství srážek bylo měřeno srážkoměrem, který byl umístěn na střeše správní budovy jeskyně Výpustek. Veškerá data se zobrazovala na digitálním měřicím zařízení v kanceláři budovy. Každý den byla data z tohoto zařízení zapisována.

Výsledky

Celkové množství srážek za studované období činilo 289 mm. Nejvydatnější srážky byly v červenci, kdy denní úhrny dosahovaly až 32 mm (1/VII) nebo 35,8 mm (20/VII). Ostatní dny se denní úhrny pohybovaly do 15 mm. V měsíci srpnu byly srážky podstatně méně vydatné. Obecně bohatší na srážky byla první polovina měsíce. Druhá polovina byla ve znamení spíše suchého počasí, denní úhr-



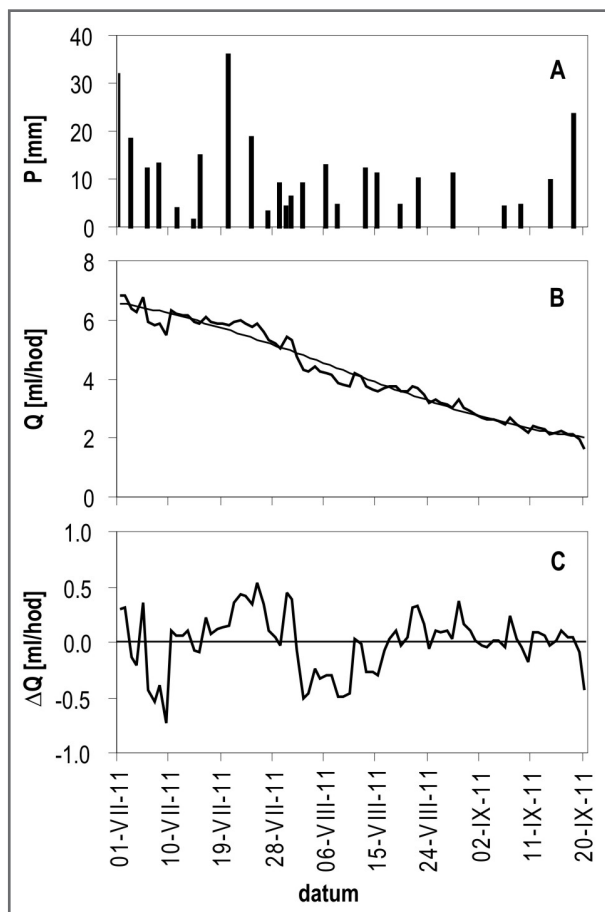
Obr. 1: Místo studia – situační mapka. Přerušovaná čára konturuje hranice Moravského krasu (upraveno podle Baláka, nepublikovaná práce).

Fig. 1: Site of study – sketch map. The dashed line shows Moravian Karst boundary (based on Balák, unpublished work).

ny se pohybovaly do 10 mm. Stejně tak září bylo ve znamení relativně suchého počasí.

Dynamika jednotlivých skapů se vzájemně lišila. Skap S1 byl nejméně vydatný a také nejrychleji docházelo k jeho vyprazdňování. Během 80 dní měření rychlost skapu poklesla z počátečních 6,85 ml/hod na konečných 1,6 ml/hod, tedy o cca 77%. Skap S2 byl vydatnější, ale i zde docházelo ke snižování rychlosti z počátečních 9,70 ml/hod na konečných 3,76 ml/hod, tedy o cca 50%. Skap S3 byl ze všech skapů nejvydatnější a také nejstabilnější. Za 80 dnů sledování jeho rychlost poklesla z 10,6 ml/hod na 8,6 ml/hod, tedy o cca 20%.

Konduktivita se u skapu S1 pohybovala v rozmezí 375–474 $\mu\text{S}/\text{cm}$. V první polovině období byla podstatně vyšší, v dalším období postupně klesala. Konduktivita u skapu S2 se pohybovala v rozmezí 427–505 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nejvyšších hodnot (505 $\mu\text{S}/\text{cm}$) dosahovala mezi 24 a 26/VIII. U skapu S3 se konduktivita pohybovala v rozmezí 533–647 $\mu\text{S}/\text{cm}$, nejvyšších hodnot (647 $\mu\text{S}/\text{cm}$) dosáhla 9/VIII.



Obr. 2: Ukázka hrubých a stacionárních dat – skap S1. (A) Srážky; (B) vydatnost/rychlost skapu – hrubá data s regresní linií; (C) vydatnost/rychlost skapu – stacionární data (rezidua).
Fig. 2: Example of the raw and stationary data for drip S1. Precipitations (rainfall) (A); drip rate – raw data with regression line (B); drip rate – stationary data (residua).

Tab. 1: Korelační matice proměnných pro skapy S1, S2 a S3 – hrubá data.
Tab. 1: Correlation matrix of the variables of drips S1, S2, and S3 – raw data.

	Q1	EC1	pH1	Q2	EC2	pH2	Q3	EC3	pH3	P
Q1	1,00									
EC1	0,91	1,00								
pH1	-0,89	-0,88	1,00							
Q2	0,97	0,90	-0,88	1,00						
EC2	-0,69	-0,49	0,73	-0,64	1,00					
pH2	0,40	0,13	-0,37	0,33	-0,82	1,00				
Q3	0,91	0,75	-0,82	0,92	-0,71	0,49	1,00			
EC3	-0,07	0,02	0,15	0,03	0,51	-0,49	-0,05	1,00		
pH3	0,58	0,46	-0,61	0,51	-0,77	0,60	0,56	-0,76	1,00	
P	0,22	0,11	-0,16	0,21	-0,25	0,17	0,22	0,01	0,07	1,00

Q – rychlost skapu [ml/hod], EC – elektrická konduktivita [$\mu\text{S}/\text{cm}$], P – srážky [mm]
Q – drip rate [ml/hod], EC – electric conductivity [$\mu\text{S}/\text{cm}$], P – precipitations [mm]
Zvýrazněné hodnoty korelačních koeficientů indikují statisticky významnou korelaci na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.
The highlighted values of correlation coefficients indicate statistically significant correlation at $\alpha = 0,05$.

Hodnoty pH se pohybovaly u skapu S1 v rozmezí 8,10–8,25, u skapu S2 v rozmezí 8,16–8,26, skap S3 vykazoval pH v rozmezí 8,16–8,31. Ukázka vybraných dat je na obrázku 2.

Analýza dat

Data ve formě časových řad (tzv. hrubá data) byla podrobena předběžné korelační analýze (tab. 1). Rychlosti skapů se srážkami slabě pozitivně korelují, u skapů S1 a S3 jsou korelace statisticky významné. Korelace mezi ostatními proměnnými jsou vesměs silné, avšak jsou bezesporu ovlivněny trendy v průtocích. Z toho důvodu byla hrubá data transformována do dat stacionárních: regresní analýzou byly nalezeny rovnice nelineárních trendů (polynomy 3. řádu). Vypočítané hodnoty proměnných odpovídající nalezenému trendu pak byly odečteny od hrubých dat. Na obrázku 2 je ukázka celé procedury pro skap S1: vydatnost skapu (hrubá data) s regresní linií jsou uvedeny na obrázku 2B, vydatnost téhož skapu po odečtení trendu (tj. stacionární data – rezidua) je na obrázku 2C. Pro srovnání jsou uvedeny i úhrny srážek (obr. 2A).

Přepočtená stacionární data prokázala některé statisticky významné korelace (viz tab. 2). U všech skapů pozitivně koreluje konduktivita s rychlostí skapu a záporně koreluje konduktivita s pH. U skapu S3 se objevuje slabá záporná korelace mezi rychlostí skapu a pH. Korelace mezi srážkami a rychlostmi skapu nebyly překvapivě potvrzeny.

Diskuze

Korelační analýza hrubých dat (tab. 1) naznačila slabou závislost mezi srážkami a vydatností/rychlostí skapů. U stacionárních dat tato závislost nebyla prokázána vůbec (tab. 2). Důvodem mohou být časové posuny mezi jednotlivými proměnnými. Předpokládanou závislost může také „stírat“ mixování vod ve vadózní zóně. Důvodem může být i skutečnost, že vliv běžných srážek na výšku hladiny vody ve visutých kolektorech v epikrasu je tak malý, že od toho odvozené změny hydrostatických tlaků a následně průtokových rychlostí (vydatností skapu) se při korelační analýze neprojeví. Systematický pokles vydatnosti/rychlosti skapů naznačuje, že srážky v daném období nestačily doplňovat

Tab. 2: Korelační matice proměnných pro skapy S1, S2, S3 – stacionární data.

Tab. 2: Correlation matrix of the variables of drips S1,S2, and S3 – stationary data.

Skap S1	Q1	EC1	pH1	P
Q1	1			
EC1	0,58	1		
pH1	-0,18	-0,52	1	
P	-0,01	-0,14	0,14	1
Skap S2	Q2	EC2	pH2	P
Q2	1			
EC2	0,23	1		
pH2	0,02	-0,73	1	
P	-0,01	-0,01	-0,01	1
Skap S3	Q3	EC3	pH3	P
Q3	1			
EC3	0,43	1		
pH3	-0,34	-0,84	1	
P	-0,06	0,13	-0,20	1

Q – rychlost skapu [ml/hod], EC – elektrická konduktivita [$\mu\text{S}/\text{cm}$], P – srážky [mm]

Q – drip rate [ml/hod], EC – electric conductivity [$\mu\text{S}/\text{cm}$], P – precipitations [mm]
Zvýrazněné hodnoty korelačních koeficientů indikují statisticky významnou korelaci na hladině významnosti $\alpha = 0,05$.

The highlighted values of correlation coefficients indicate statistically significant correlation at $\alpha = 0.05$

úbytek vody v kolektorech způsobený odtokem do vadózní zóny. To potvrzuje klíčovou roli jarního tání sněhu při doplňování visutých kolektorů v epikrasu (viz např. Vysoká et al. 2006).

Korelační analýza stacionárních dat potvrdila pozitivní závislost mezi konduktivitou a vydatností/rychlostí skapu: na všech sledovaných místech s poklesem rychlosti skapu klesala i mineralizace vody. To zpochybňuje laický názor, že čím rychleji voda puklinami projde, tím je méně nasycena kalcitem. Tento případ by platil pouze u extrémně rychlých skapů, kdy by voda nestačila dosáhnout rovnováhy s kalcitem a CO_2 . V blízkosti rovnováhy (při delší době zadržení) je stupeň nasycení řízen vnějšími podmínkami – parciálními tlaky CO_2 . Nalezené pozitivní korelace jsou tedy spíše důsledkem mixování různých typů vod nasycených pod různým parciálním tlakem CO_2 (a tedy i s různou mineralizací) na puklinách a zejména v epikrasu. Vyšší průtoky jsou bezesporu spojeny s vyššími hladinami vody ve visutých kolektorech, které umožňují

přelivy mezi dílčími rezervoáry. V závislosti na mixovacích poměrech a parametrech výchozích vod pak síla korelace kolísá (tab. 2).

Silná negativní korelace mezi pH a EC je dána principiální závislostí pH na složení nasycených vod kalcitem pod rozdílnými parciálními tlaky CO_2 . Náznak negativní korelace mezi průtokem a pH (skap S3, tab. 2) zřejmě vyjadřuje závislost pH na stupni odplynění vod.

Závěr

Studie skapových vod v jeskyni Výpustek prokázala pouze velmi slabou závislost mezi srážkami a dynamikou skapů a to navzdory faktu, že (i) mocnost nadloží jeskyně dosahuje pouhých 40 m a že (ii) vztah mezi atmosférickými srážkami a skapovými vodami je principiální. Důvodem mohou být časové prodlevy mezi srážkami a změnami dynamiky skapové vody, mixování vod na puklinách, popř. malý vliv srážek na hladinu vody ve visutých kolektorech v epikrasu.

Vydatnosti všech skapů během studovaného období systematicky klesaly, díky nedostatečnému doplňování vody v kolektorech v epikrasu srážkami. To naznačuje klíčovou roli jarního tání sněhu při doplňování krasových vod v epikrasu.

U všech studovaných vod byla prokázána přímá úměra mezi mineralizací a rychlostí skapu. Stupeň mineralizace tak nebyl řízen dobou zadržení vody v krasovém profilu, spíše mixováním různých typů vod na puklinách a v epikrasu. Nepřímá závislost mezi pH a EC je důsledkem vlivu parciálních tlaků $\text{CO}_{2(g)}$ v epikrasu na hydrogeochemii vody – na množství rozpuštěného kalcitu a pH. U nejvydatnějšího skapu se projevila závislost mezi průtokem a pH, zřejmě jako důsledek dynamiky odplynování vod.

Tato předběžná studie z jeskyně Výpustek poskytla v mnoha ohledech zajímavé a překvapivé výsledky, které vyžadují další pečlivý výzkum.

Poděkování

Práce je součástí bakalářské práce R. Bodlákové. Práce byla zaštitěna institucionální podporou výzkumu Masarykovou univerzitou v roce 2011–2012. Autoři děkují J. Himmelovi (Ochozská jeskyně) a J. Hromasovi ze Správy jeskyní ČR za všestrannou pomoc, dále recenzentovi T. Kuchovskému za kritické připomínky.

Literatura

Chlupáč, I. – Brzobohatý, R. – Kovanda, J. – Stráník, Z. (2002): Geologická minulost České republiky. – Academia, 436 s. Praha.
Vysoká, H. – Zeman, O. – Bruthans, J. (2006): Studium skapových vod v Ochozské jeskyni: Překvapivě dlouhá doba zdržení v nenasyčené zóně i za extrémních stavů. – Sborník Speleofórum, 25, s. 93. Česká speleologická společnost. Praha.