

# NESTABILITA PROUDĚNÍ VZDUCHU V DYNAMICKÉ CÍSAŘSKÉ JESKYNI (MORAVSKÝ KRAS)

Airflow instability in dynamic Císařská Cave (Moravian Karst)

Marek Lang, Jiří Faimon

Ústav geologických věd PřF MU, Kotlářská 2, 611 37 Brno; e-mail: 309580@mail.muni.cz

(24-23 Protivanov)

**Key words:** Airflow; Císařská Cave; oscillations; spectral analysis; temperature; ventilation mode

## Abstract

Airflows were studied in two-entranced Císařská Cave (Moravian Karst). Data (airflow and temperature) were measured at the upper cave entrance (UE) at an upward airflow ventilation mode (UAF). The airflow showed high-frequency oscillations with the periods from tens to hundreds seconds. Multiple oscillations and their time-variability indicate that the oscillations are not a cave resonance phenomenon and cannot be described in the terms of Helmholtz resonator. The change of external temperature in narrow interval of  $\sim 4$  °C had only small effect on the airflow. Under given conditions, air residence time in the cave was 2.5 days. If the airflow was constant and ventilation mode was not exchanged during this period, the cave would persist at a period of active ventilation. As result, the cave air would be completely replaced by air from exterior.

## Úvod

Výměna vzduchu mezi vnější a vnitřní atmosférou dynamické jeskyně výrazně ovlivňuje mikroklimatické parametry jeskyně včetně koncentrací  $\text{CO}_2$  v jeskynní atmosféře a tím i základní krasové procesy (kondenzační koroze, růst/koroze speleotém). Pohyb vzduchu vzniká v důsledku tlakových rozdílů daných rozdílnými hustotami vzduchu uvnitř jeskyně a ve vnější atmosféře. Hustota vzduchu je funkcí více proměnných, z nichž nejvýznamnější je teplota. Hnací sílu proudění vzduchu v jeskyni tak představuje především teplotní gradient mezi teplotou vzduchu v jeskyni a ve vnější atmosféře (Bögli 1978, Pflitsch a Piasecki 2003, Kowalczyk a Froelich 2010). Rozsah výměny vzduchu mezi jeskyní a venkovní atmosférou je kvantifikován *ventilací jeskyně* (Faimon et al. 2011). Je definována jako objemový tok vzduchu jeskyní normalizovaný jejím objemem:

$$v = j/V \quad (1)$$

kde  $j$  představuje objemové proudění vzduchu jeskyní v  $\text{m}^3/\text{s}$  a  $V$  je objem jeskyně v  $\text{m}^3$ . Ventilace jeskyně udává, za jak dlouho se vymění všechny vzduch v jeskyni. Normalizace na objem jeskyně dovoluje srovnávat jeskyně o různých objemech mezi sebou. Převrácená hodnota ventilace odpovídá *době zadržení vzduchu v jeskyni*  $\tau$  (Faimon et al. 2011):

$$\tau = 1/v \quad (2)$$

U dynamických jeskyní (viz Geiger 1966) lze rozlišit tři módy ventilace: (1) se vzestupným prouděním (UAF mód – upward airflow mode), (2) se sestupným prouděním (DAF mód – downward airflow mode) a (3) s neustáleným prouděním (přechodový mód). Při UAF módu se venkovní vzduch tlačí do jeskyně spodním vchodem a vychází horním vchodem v případě, že  $T_{\text{ext}} < T_{\text{cave}}$  ( $T_{\text{ext}}$  je vnější teplota jeskyně a  $T_{\text{cave}}$  je vnitřní teplota jeskyně). V DAF módu se jeskyně nachází při  $T_{\text{ext}} > T_{\text{cave}}$ , kdy jeskynní vzduch „vytéká“ spodním vchodem a venkovní vzduch je nasáván

horním vchodem. Podle rozsahu vyvětrání jeskyně jsou definována *období aktivní ventilace* a *období stagnující ventilace*. Období aktivní ventilace vyžaduje dlouhodobé trvání buď DAF nebo UAF módu – pak mezi jeskyní a venkovní atmosférou dochází ke kompletní výměně vzduchu. V období stagnující ventilace dochází k přepínání jednotlivých módů ventilace dříve, než dojde k vyvětrání celé jeskyně – důsledkem je větrání pouze vstupních pasáží jeskyně (Faimon et al. 2011).

Proudění vzduchu jeskyní není uniformní, ale osciluje kolem průměrné hodnoty (Faust 1947). Detailní mechanismy vzniku oscilací nejsou doposud objasněny. Jednou z možností jsou zpětné vazby způsobené změnami teplotního gradientu v blízkosti vchodů jeskyně a pružností/rotažností vzduchového sloupce (Faimon et al. 2011). Oscilace v proudění se běžně vysvětlují jako rezonanční jevy – kmity jsou popsány tzv. Helmholtzovým rezonátorem (Cigna 1968, Plummer 1969). Helmholtzův rezonátor je definován jako rezervoár vzduchu s definovaným objemem, do něhož proudí vzduch hrdlem s průměrem menším než je jeho objem (Faimon et al. 2011). Podle Frenche (2005) je jeho rezonanční frekvence  $f$  [Hz] dána vztahem:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{tV}} \quad (3)$$

kde  $c$  je rychlost zvuku ve vzduchu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ],  $A$  je průřez hrdla rezervoáru [ $\text{m}^2$ ],  $t$  je délka hrdla [ $\text{m}$ ] a  $V$  je celkový objem rezervoáru [ $\text{m}^3$ ].

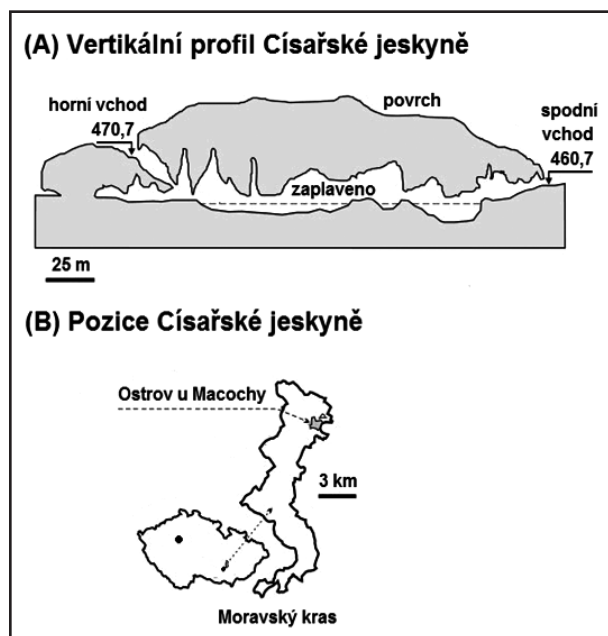
## Cíle práce

Cílem práce je (1) charakterizovat nestabilitu v proudění vzduchu v Císařské jeskyni, (2) ověřit, zda je chování proudění vzduchu v jeskyni konsistentní s tzv. Helmholtzovým rezonátorem a (3) kvantifikovat intenzitu výměny

vzduchu mezi jeskynní a venkovní atmosférou v závislosti na vnějších podmínkách. Práce by měla přispět k lepšímu pochopení (a) mechanismů výměny vzduchu v jeskyních a (b) míry ovlivnění krasových procesů.

### Místo studia

Císařská jeskyně leží v severní části Moravského krasu v části Suchého žlebu asi 1,5 km od Ostrova u Macochy. Je budována svrchnodevonskými vápenci macošského souvrství. Její délka je 250 m a nachází se asi 40 m pod povrchem krajiny. Celkový objem jeskyně je přibližně 11 500 m<sup>3</sup>. Morfologie jeskyně a rozdílné nadmořské výšky dvou vchodů (460,7 a 470,7 m) určují její dynamický charakter (obr. 1A). Oba vchody jsou uzavřeny ocelovými dveřmi s okénky o rozměrech 20 × 20 cm. Prostředí jeskyně je upraveno betonovými chodníky a ocelovými můstky přes jeskynní jezírka. Dvě protilehlé části jeskyně zaplavené vodou jsou propojeny stolou (obr. 1B). Jeskyně je od roku 1993 využívána dětskou léčebnou v Ostrově u Macochy ke speleoterapii.



Obr. 1: Císařská jeskyně: vertikální profil jeskyně (A), pozice jeskyně (B).

Fig. 1: Císařská Cave: the cave vertical profile (A), cave position (B).

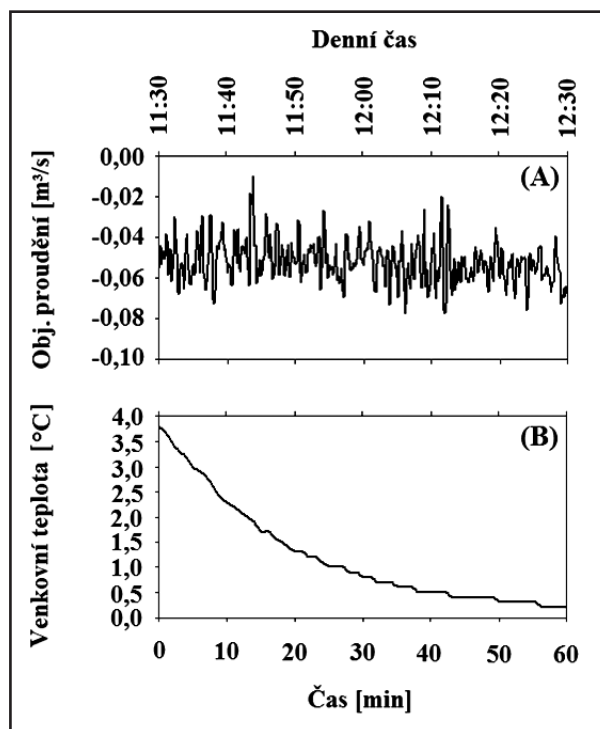
### Metodika

Data prezentovaná v této práci byla naměřena v říjnu 2011. Rychlost proudění a teplota byly kontinuálně měřeny u horního vchodu po dobu 1 hodiny. Pro měření rychlosti proudění byl zvolen krok měření 5 s, pro venkovní teplotu vzduchu byl zvolen krok měření 1 minuta. Proudění bylo monitorováno v úrovni okénka v ocelových dveřích. K měření rychlosti proudění byl použit thermoanemometr FVA935 TH4 (rozsah rychlostí 0,05 až 2 m/s s rozlišením  $\pm 0,04$  m/s) propojený s dataloggerem Almeno 2590-4S. Současně s měřením rychlosti byl sledován také směr proudění vzduchu. Proudění směrem do jeskyně bylo považováno za kladné (znaménko +), proudění směrem

z jeskyně bylo považováno za záporné (znaménko -). Naměřené hodnoty v m/s byly přepočteny na objemové rychlosti v m<sup>3</sup>/s. Venkovní teplota vzduchu byla měřena teploměrem/vlhkoměrem s dataloggerem COMET S3120 (rozsah teplot -30 až 70 °C s přesností  $\pm 0,4$  °C). Naměřená data byla zpracována v programech MS Office Excel 2003 a Statistica verze 9 (StatSoft, Inc., www.statsoft.cz).

### Výsledky

Během měření se jeskyně nacházela v UAF módu proudění. Venkovní vzduch pronikal do jeskyně spodním vchodem a vystupoval horním vchodem (negativní znaménko rychlosti). Po celou dobu měření mírně klesala venkovní teplota jeskyně a proporcionálně se zvyšoval teplotní gradient mezi venkovní a jeskynní atmosférou. Proudění bylo nestabilní a oscillovalo. Průměrná rychlost proudění vzduchu byla  $0,052 \pm 0,0096$  m<sup>3</sup>/s (nejvyšší naměřená hodnota byla 0,077 m<sup>3</sup>/s, nejnižší naměřená hodnota byla 0,016 m<sup>3</sup>/s). Průměrná venkovní teplota vzduchu se pohybovala mezi 0,2 °C a 3,8 °C (obr. 2).



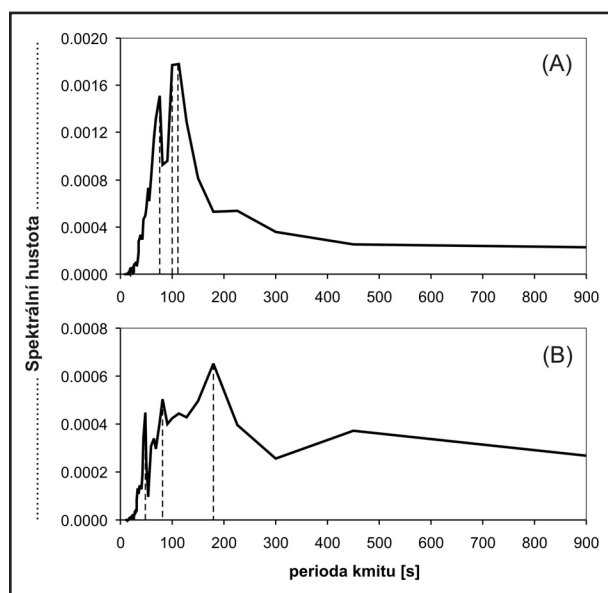
Obr. 2: Proudění vzduchu horním vchodem Císařské jeskyně (A) a venkovní teplota (B).

Fig. 2: Airflow through the upper entrance of Císařská Cave (A) and external temperature (B).

### Analýza dat

Během měření byla ventilace  $0,0163$  hod<sup>-1</sup> (tj., za 1 hodinu by se vyvětralo 0,0163 jeskyně, což odpovídá  $\sim 188$  m<sup>3</sup> jeskynního vzduchu) a doba zadržení vzduchu v jeskyni byla 2,5 dne. Korelační analýza mezi prouděním a teplotou prokázala pouze nevýznamnou negativní korelaci (koeficient korelace -0,15). Autokorelace signálu proudění neprokázala žádnou periodicitu vyššího řádu: většina hodnot korelačního koeficientu se pohybovala pod hladinou významnosti  $\alpha = 0,05$ . Z naměřených

dat byly vyčleněny dva 15minutové úseky: na počátku a na konci měření. Signál z těchto úseků byl podroben spektrální analýze a rozložen Fourierovou transformací na harmonické kmity. Po převedení do frekvenční domény byly identifikovány nejvýznamnější frekvence, které byly přepočteny na periody kmitů,  $T = 1/f$ . Analýza ukázala, že periody nejvýznamnějších oscilací byly 75, 100 a 112 sekund na počátku měření (v prvním úseku signálu) a 47, 82 a 180 sekund na konci měření (ve druhém úseku signálu). Výsledky spektrální analýzy jsou na obrázku 3.



Obr. 3: Spektrální analýzy dvou 15minutových úseků signálu proudění vzduchu jeskyní: počáteční úsek (A) a závěrečný úsek (B) z celkového 60minutového signálu (Císařská jeskyně, horní vchod).

Fig. 3: Spectral analysis of two 15 minute segments of the total 60 minute airflow signal: The initial segment (A) and the final segment (B) (Císařská Cave, upper entrance).

## Diskuze

V malém rozmezí teplot  $\sim 4^\circ\text{C}$  se neprojevila závislost proudění vzduchu na teplotním gradientu (resp. na venkovní teplotě při konstantní teplotě v jeskyni). To naznačuje, že závislost proudění na teplotním gradientu je složitější, než se všeobecně předpokládá (De Freitas et al. 1982). Signál proudění vzduchu výrazně osciloval. Autokorelace signálu neukázala žádnou významnou periodicitu vyššího řádu a podtrhla tak jeho chaotický charakter. Pokud by byly oscilace důsledkem rezonance jeskyně, očekávala by se v signálu proudění jedna dominantní perioda. Na základě spektrální analýzy však bylo identifikováno více výrazných oscilací. Kromě toho se periody oscilací během obou časových úseků vzdálených od sebe pouze 30 minut vůči sobě posunovaly. Tato fakta do značné míry zpochybňují, že oscilace jsou výsledkem rezonance jeskynních prostor a že je lze popsat na základě Helmholtzova rezonátoru.

Za předpokladu konstantního proudění a ideálního pístového toku by doba zadržení vzduchu v jeskyni byla 2,5 dne. Pokud by se během této doby nezměnil ventilační mód (UAF), což lze předpokládat vzhled k celodenním nízkým teplotám, jeskyně by se nacházela v období aktivní ventilace a jeskynní atmosféra by byla kompletně nahrazena vzduchem z okolní atmosféry.

## Závěr

Výsledky studia lze shrnout do následujících závěrů:

- (1) Proudění vzduchu v Císařské jeskyni bylo během studia v UAF módu, mělo nestabilní charakter a oscilovalo.
- (2) Pokles venkovní teploty o  $4^\circ\text{C}$  neovlivnil zásadně proudění vzduchu.
- (3) V případě konstantního proudění by byla doba zadržení vzduchu v jeskyni 2,5 dne. Pokud by se nezměnil ventilační mód, jeskynní atmosféra by za tuto dobu byla kompletně vyměněna za venkovní atmosféru.
- (4) Spektrální analýza signálu proudění naznačila, že oscilace v signálu proudění nejsou řízeny rezonančními jevy a nelze je popsat pomocí Helmholtzova rezonátoru.

## Poděkování

Autoři děkují recenzentovi J. Zemanovi za podnětné připomínky. Práce byla podporována projektem VaV GA205/03/1128 a výzkumným záměrem MSM0021622427.

### Literatura

- Bögli, A. (1978): Karsthydrographie und physische Speläologie. – Springer. Berlin.
- Cigna, A. A. (1968): An analytical study of air circulation in caves. – *International Journal of Speleology*, 3, 41–54.
- De Freitas, C. R. – Littlejohn, R. N. – Clarkson, T. S. – Kristament, L. S. (1982): Cave climate: assessment of airflow and ventilation. – *Journal of Climatology*, 2, 383–397.
- Faimon, J. – Troppová, D. (2007): Cave Microclimate Impact on Karst Processes: Role of Cave Ventilation. – *Slovenský kras (Acta Carsologica Slovaca)*, 46 (2), 443–445.
- Faimon, J. – Troppová, D. – Baldík, V. – Novotný, R. (2012): Air circulation and its impact on microclimatic variables in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic). – *International Journal of Climatology*, 32, 599–623.
- Faust, B. (1947): An unusual phenomenon. – *National Speleological Society (NSS) Bulletin*, 9, 52–54.
- French, R. M. (2005): A pop bottle as a Helmholtz resonator. – *Experimental Techniques*, 29, 67–68.
- Geiger, R. (1966): *The climate near the ground*. – Cambridge, MA, Harvard University Press.
- Kowalczyk, A. J. – Froelich, P. N. (2010): Cave air ventilation and CO<sub>2</sub> outgassing by radon-222 modeling: How fast do caves breath? – *Earth and Planetary Science Letters*, 289, 209–219.
- Pflitsch, A. – Piasecki, J. (2003): Detection of an airflow system in Niedzwiedzia (Bear) Cave, Kletno, Poland. – *Journal of Cave and Karst Studies*, 65 (3), 160–173.
- Plummer, W T. (1969). Infrasonic resonances in natural underground cavities. – *The Journal of the Acoustical Society of America*, 46, 1 074–1 080.