

## MĚŘENÍ MIKROKLIMATU V KATEŘINSKÉ JESKYNI V ROCE 2009 A V ROCE 2010

### Monitoring of microclimate in Kateřinská cave in 2009 and 2010

Středová H.<sup>1</sup>, Fukalová P.<sup>2</sup>, Středa T.<sup>2</sup>, Rožnovský J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mendelova univerzita

<sup>2</sup>Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno

#### Abstrakt

Jeskyňe představují unikátní prostředí se specifickými klimatickými podmínkami. Mikroklima jeskyní je ovlivněno zejména typem jeskyně, tvarem a velikostí prostor, vzdáleností, počtem a polohou vchodů spojených s vnějším prostředím a hydrologickými poměry. Stacionární a ambulanti měření meteorologických podmínek, zejména v souvislosti s vlivem návštěvnosti na mikroklima jeskyní, probíhá také v jeskyních Moravského krasu, například v Kateřinské jeskyni. Průměrná roční návštěvnost této jeskyně je okolo 60 tis. návštěvníků. Kateřinská jeskyně je jeskyní s výměnou vzduchu přes vstupní část a dva komíny. Monitoring teploty a vlhkosti vzduchu v Kateřinské jeskyni probíhá od června 2009 pomocí vysoce přesných čidel HOBO U23 Pro V2 s dataloggerem. Vyhodnocována je stratifikace teploty a vlhkosti vzduchu a jejich roční dynamika, včetně období s nejvyšší návštěvností. Z výsledků měření je patrný vliv vnější teploty, způsobující teplotní změny uvnitř jeskyně o 2 °C (minimum 6,56 °C, maximum 8,56 °C). Nejsilnější vazba mezi vnější a vnitřní teplotou se projevila v březnu. Relativní vlhkost vzduchu v jeskyni vykazovala i v období vysoké návštěvnosti stabilní hodnotu 100 %. Součástí hodnocení mikroklimatu jeskyně je také měření teploty skalního masivu infračerveným termometrem. Snímána je teplota povrchu na celé prohlídkové trase. V průběhu roku 2010 byla zjištěna diference průměrné teploty masivu o 1,4 °C. Teplotní maxima se v průběhu roku liší o 0,7 °C. Výrazná je diference minimálních teplot (až 4 °C), způsobená prochlazením vstupní chodby v zimním období (až na -1,6 °C). V letních měsících je teplota povrchu stabilní s přetrvávající nižší hodnotou ve vstupní části, což je zřejmě způsobeno intenzivním provětráváním.

**Klíčová slova:** Moravský kras, jeskyně, monitoring, teplota, návštěvnost

#### Abstract

Caves represent a unique natural environment with specific climatic conditions. Cave microclimate is particularly influenced by the type of a cave, shape and size of cave spaces, distance, location and number of entries associated with the external environment and hydrological conditions. Stationary and ambulatory measurements of climatic conditions, particularly in relation to the influence of attendance on cave microclimate, are also monitored in Moravian Karst caves, such as in Kateřinská cave. Average annual attendance of this cave is about 60 000 visitors. Air exchange in Kateřinská cave is realized through the entrance and two chimneys. Monitoring of air temperature and humidity has been done by high-precision sensors to HOBO U23 Pro V2 with datalogger in Kateřinská cave since June 2009. Stratification of air temperature and humidity and their annual dynamics including periods with the highest number of visitors is recorded. Influence of external air temperature, causing changes in temperature inside the cave about 2°C (minimum of 6.56°C and maximum of 8.56°C) is evident from the results of measurements. The strongest relationship between external and internal air temperature was evident in March. Relative air humidity in the cave showed stable value of 100% even during the season of high attendance.

The rock massif temperature measurements by infrared thermometer are also part of the cave microclimate evaluation. Rock massif temperature is measured throughout the guided tour. The difference of mean rock massif temperature of 1.4°C was detected in 2010. Temperature maximum varies by 0.7°C throughout the year. A significant difference, probably caused by exposure of entrance corridor to the cold weather in the winter period (up to -1.6°C), concerns the minimum temperature (4°C). The rock massif temperature in summer months is stable with persistent lower value in the entrance part of cave which is probably due to intensive ventilation.

**Key words:** Moravian Karst, cave, monitoring, temperature, attendance

## Úvod

Jeskyně představují výjimečné přírodní prostředí, které morfologií a uzavřeností určuje specifické mikroklimatické poměry v podzemních prostorách. Zákon 114/92 Sb. o ochraně přírody a krajiny se ve svém § 10 zabývá ochranou jeskyní jako významného přírodního fenoménu a řadí je tak k významným úkolům komplexního pojetí ochrany životního prostředí.

Mikroklimatické poměry jeskyní jsou charakterizovány v porovnání s volným terénem nižší denní i roční amplitudou průběhu teploty a vlhkosti vzduchu, vyšší relativní a absolutní vlhkostí vzduchu, nízkým výparem a výrazným ročním případně i denním chodem rychlosti a směru větrného proudění. Mikroklima jeskyní je ovlivněno zejména typem jeskyně (statická, dynamická), tvarem a velikostí prostor, počtem a polohou vchodů spojených s vnějším prostředím a hydrologickými poměry. Podrobná znalost mikroklimatických poměrů jeskyní poskytuje cenné informace nezbytné pro řešení otázek krasovění, rozšíření rostlinných i živočišných druhů v jeskyních, vhodnosti pro speleoterapii apod. (Musil a kol., 1993). V současné době však začíná být mikroklima sledováno také v souvislosti se stále rostoucí návštěvností jeskyní a obavou zachování jejich cenné krápníkové výzdoby.

Nedostatečné regulace návštěv jeskyní nebo nevhodná údržba s tím spojené infrastruktury mohou mít v některých případech za následek vážné ohrožení životního prostředí v podzemí (Cigna, 1993). Návštěvníci narušují přísunem hmoty a energie relativně stabilní jeskynní systém (Hamilton- Smith, 2004). Cílem současných výzkumů zejména je vyřešit odpovědi na otázky týkající se zavedení přísnějších limitů návštěv jeskyní, počtu vstupů do jeskyní apod. Výhodou dnešní doby jsou poměrně dosti přesná měřicí zařízení k monitorování jednotlivých mikroklimatických veličin. Výzkum ochrany jeskyní ve vztahu k turismu není jednoduchý, protože do úvahy musí být současně vzato mnoho faktorů (Pulido-Bosch, 1997).

Mikroklimatické poměry jeskyní jsou v rámci projektu Ministerstva životního prostředí ČR č. SP/2D5/5/07 „*Stanovení závislosti jeskynního mikroklimatu na vnějších klimatických podmínkách ve zpřístupněných jeskyních ČR*“ zkoumány také ve vybraných jeskyních Moravského krasu. Do těchto jeskyní byl instalován automatický stacionární monitorovací systém, který zajišťuje kontinuální monitoring jednotlivých veličin s dálkovým přenosem naměřených hodnot do PC. Interval záznamu je 1 minuta. Teplotní senzory jsou umístěny ve výšce 1 metr nad zemí nebo v definovaných výškách pro měření vertikálního teplotního profilu dané prostory (Rožnovský a kol., 2009). Kromě stacionárního měření probíhají v jeskyních také četná ambulantní měření. Pro monitoring vnějších klimatických podmínek jsou v areálu jeskyní Moravského krasu instalovány venkovní meteostanice (Pokladníková a kol., 2009).

Jednou z jeskyní Moravského krasu, kde se v rámci výše zmíněného projektu monitoruje od roku 2008 mikroklima je Kateřinská jeskyně. Kateřinská jeskyně (Obr. 1) leží v severní části Moravského krasu v kaňonu Suchého žlebu, v národní přírodní rezervaci Vývěry Punkvy v chráněné krajinné oblasti Moravský kras. Nadmořská výška vstupní/výstupní části jeskyně (Obr. 2) je 342 m n.m. Jeskyni tvoří dva vzájemně spojené mohutné domy s přilehlými

chodbami. Jeskyně byla pro veřejnost otevřena v roce 1910. Celková délka jeskyně je 950 m. Zpřístupněná část jeskyně je dlouhá 420 m, délka návštěvního okruhu je 580 m. Hlavní dóm je s rozměry 95 x 44 x 20 metrů největší veřejnosti zpřístupněnou podzemní prostorou v Moravském krasu. Mezi nejkrásnější partie jeskyně patří útvar Čarodějnice a Bambusový lesík tvořený vzácnými, několik metrů vysokými hůlkovými stalagmity. Kateřinská jeskyně je z důvodu ochrany zimujících netopýrů v měsících prosinec, leden a únor zavřena. Doba prohlídky je cca 40 minut. Průměrně jeskyni navštíví 63 619 návštěvníků (1991-2008) (Správa jeskyní MK, 2007). Stálá teplota vzduchu v jeskyni se pohybuje okolo 7 až 8 °C, relativní vlhkost je cca 99 %. Kateřinská jeskyně je významným zimovištěm 11 druhů netopýrů a vrápenců. V celém jeskynním systému pokračuje také speleologický průzkum, hydrochemické, geologické a další výzkumy (Zajíček, 2003).



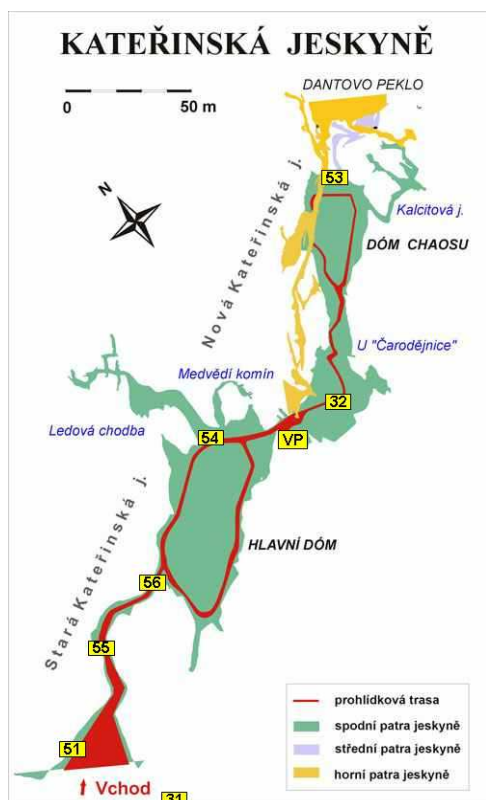
Obr. 1: Lokalizace Kateřinské jeskyně na mapě jeskyní České republiky (vlevo)

Obr. 2: Vstup do Kateřinské jeskyně (vpravo)

### Materiál a metody

Na základě výsledků terénní observace a série ambulantních měření byly vymezeny kritické zóny s největší dynamikou teplot a očekávaným nejvýraznějším vlivem návštěvníků na mikroklima Kateřinské jeskyně. Před vchod do jeskyně (čidlo 31), do přístupové chodby (čidla 55 a 56), na návštěvnosti nejvíce exponovaná místa v interiéru jeskyně (čidla 54, 53 a 32) a do vertikálního profilu (VP) na exponované místo uprostřed prohlídkové trasy byla umístěna vysoce přesná čidla HOBO U23 Pro V2 s dataloggerem (Obr. 3). K zachycení diferencí teplot a vlhkostí vzduchu vlivem návštěvnosti registrují interiérová čidla teplotu a vlhkost vzduchu v minutovém kroku. Exteriérové čidlo a kontrolní čidlo v interiéru, instalovaná v srpnu 2009, registrují v patnáctiminutovém kroku.

Monitoring teploty a vlhkosti vzduchu v blízkosti „bambusového lesa“ probíhal od června 2009 do července 2010. Zachycena je tak stratifikace teploty a vlhkosti vzduchu a jejich roční dynamika, včetně období s nejvyšší návštěvností. Podrobný monitoring kritických míst uvnitř jeskyně probíhá kontinuálně od března 2010 (vyhodnocena byla data do konce října 2010).

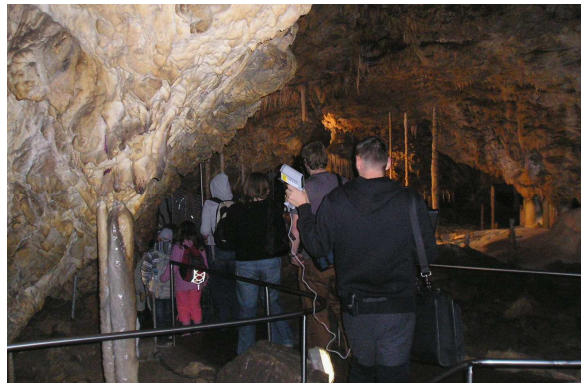


Obr. 3: Mapa prohlídkové trasy s vyznačením umístění čidel HOBO

Obr. 4 a 5: Senzor HOBO Pro V2 umístěný v přístupové chodbě a na stojanu uvnitř jeskyně.

Součástí hodnocení mikroklimatu interiéru jeskyně, jeho diferencí a dynamiky je hodnocení teploty skalního masivu, měřené infračerveným termometrem.

K měření teploty povrchu skalního masivu byl použit bezdotykový infračervený teploměr Raytek Raynger MX4 (Obr. 6), který měří množství infračervené energie emitované zacíleným předmětem a zobrazuje teplotu povrchu tohoto předmětu. Termometr je vybaven laserovým zaměřováním a má grafický displej zobrazující stav laseru, čas a datum, naměřenou teplotu, grafické zobrazení, hodnotu emisivity, stavový řádek a indikátor stavu baterií. Přístroj umožňuje automatické uložení naměřených hodnot. K měření je možno použít také kontaktní sondu. Velikost měřeného bodu závisí na vzdálenosti mezi předmětem, který je měřen a infračerveným teploměrem. Laserový kroužek (Obr. 7) ukazuje skutečnou velikost měřeného bodu.



Obr. 6: Infračervený teploměr Raynger MX4 (vlevo)

Obr. 7: Zaměřovací laserový paprsek (uprostřed)

Obr. 8: Měření pomocí termometru (vpravo)

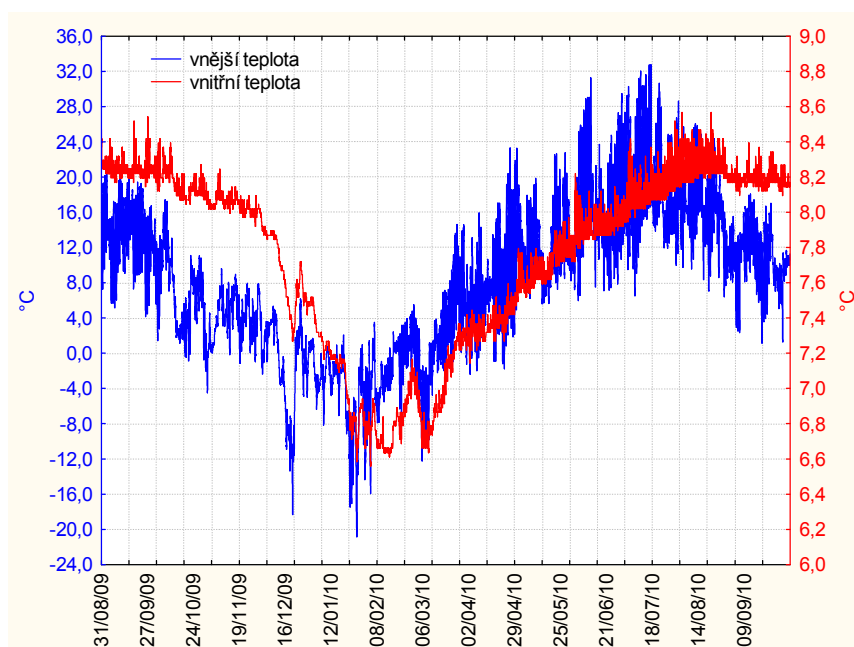
Technické údaje infračerveného teploměru Raynger MX4: Teplotní rozsah  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  –  $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Rozlišení zobrazení  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Rozlišení  $60:1$ ; Provozní rozsah okolní teploty  $0$  až  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; Skladovací teplota  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ambulantní měření termometrem jsou realizována ve čtrnáctidenním kroku při stahování dat z teplotních a vlhkostních čidel. Snímána je teplota povrchu na celé prohlídkové trase.

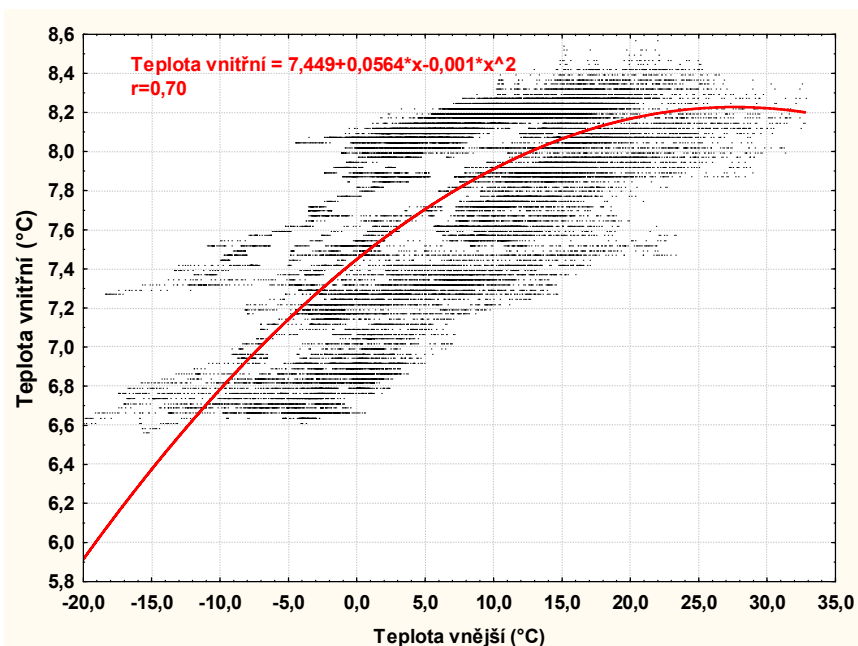
### Výsledky a diskuze

S ohledem na to, že součástí tohoto příspěvku není podrobné hodnocení vlivu návštěvnosti, jsou data uváděna a zpracována v patnáctiminutovém kroku, který dostatečně spolehlivě postihuje vliv průběhu počasí na mikroklima jeskyně.

Obr. 9 zachycuje roční dynamiku teploty vzduchu vně (čidlo 31) a uvnitř jeskyně, v její střední části (čidlo 32). Z průběhu křivek je patrný vliv vnější teploty, způsobující teplotní změny uvnitř jeskyně o  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (minimum  $6,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ , maximum  $8,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Průběh a sílu závislost vnitřní a vnější teploty, vyjádřené polynomem 2. stupně s odhadem trendu uvádí Obr. 10.

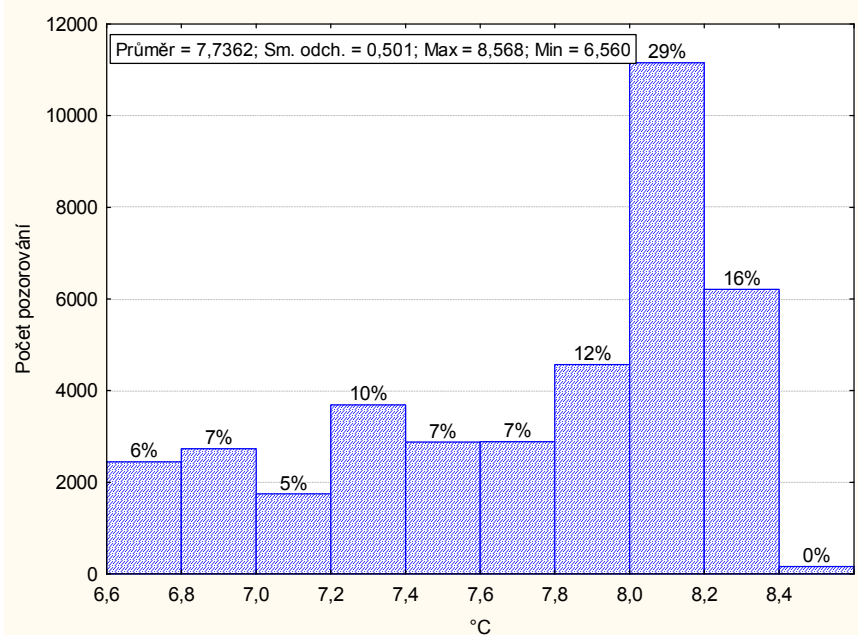


Obr. 9: Průběh teplot u čidel 31 a 32 - celé období (tj. 13 měsíců)

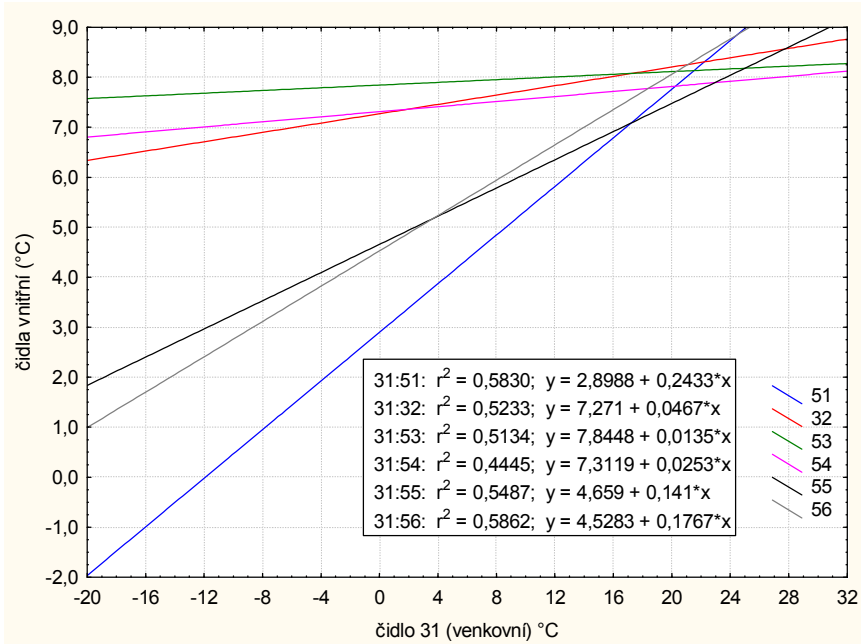


Obr. 10: Závislost vnitřní teploty na vnější – čidla 31 a 32 – celé období (tj. 13 měsíců)

Obr. 11 uvádí četnosti výskytu kategorií teplot v průběhu roku a základní statistické charakteristiky mikroklimatu v interiéru Kateřinské jeskyně. V Obr. 12 je naznačena vazba mezi průběhem teplot před jeskyní a její vazba na teploty v interiéru, vyjádřená indexem determinace a regresními rovnicemi.

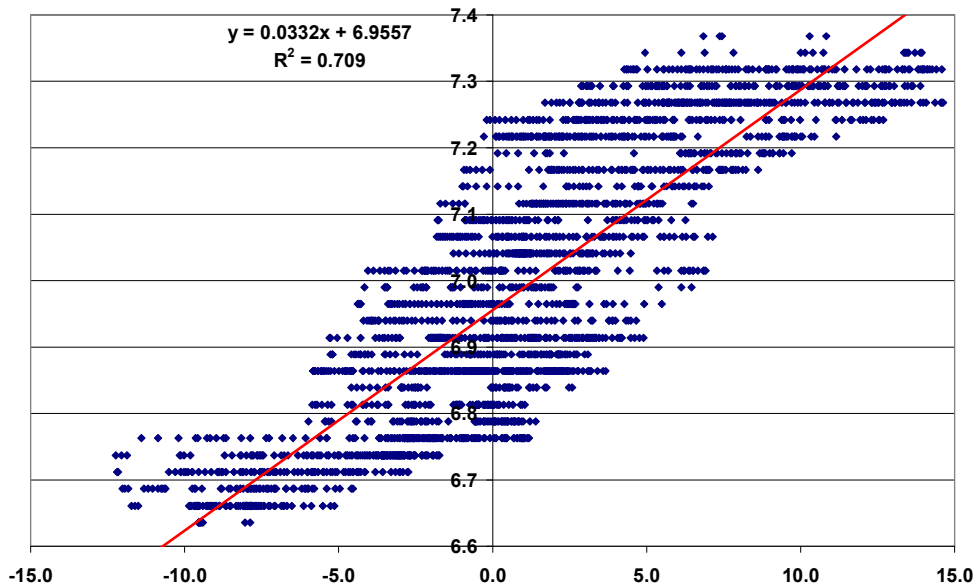


Obr. 11: Četnosti jednotlivých teplot – čidlo 32 - celé období (tj. 13 měsíců)



Obr. 12: Závislost vnitřní teploty na vnější – všechna vnitřní čidla a čidlo vnější – období 8 měsíců; vyjádřeno lineární regresí

Na základě dat měřených v jednotlivých měsících roku byly vykresleny grafy závislosti mezi průběhem teplot před jeskyní a teplot v interiéru. S ohledem na vývoj teplot byl k proložení hodnot volen polynom 2. stupně nebo lineární trend. Nejsilnější vazba, vyjádřená indexem determinace se projevila v březnu (Obr. 13).



Obr. 13: Závislost vnitřní teploty na vnější – čidla 31 a 32 – březen

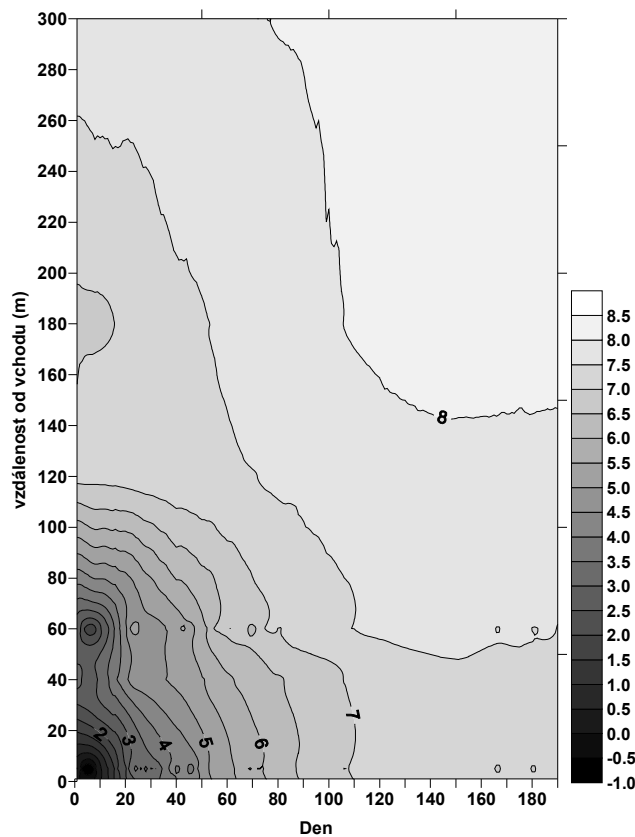
Formou ambulantních měření byla prováděna měření teploty povrchu skalního masívu celého zpřístupněného interiéru Kateřinské jeskyně. V průběhu roku 2010 byla zjištěna diference průměrné teploty masívu 1,4 °C (průměrná teplota z celé prohlídkové trasy). Teplotní maxima v průběhu roku kolísají o 0,7 °C. Výrazná je diference minimálních teplot (až 4 °C), způsobená prochlazením vstupní chodby v zimním období (teploty vzduchu až -1,6 °C –

Obr. 14). V letních měsících je teplota povrchu stabilní s přetrvávající nižší hodnotou ve vstupní části, což je zřejmě způsobeno intenzivním provětráváním.



Obr. 14: Fotografie ze vstupní chodby Kateřinské jeskyně z 10.2.2010

Vývoj teplot v průběhu roku a jejich průběh v závislosti na vzdálenosti od vstupu formou izolinií uvádí Obr. 15. Zřejmá je logicky poměrně výrazná dynamika ve vstupní části, slábnoucí s rostoucí vzdáleností od vstupu. Od části „Bambusový les“ je patrná v podstatě homogenní teplota v průběhu celého hodnoceného období.



Obr. 15: Vykreslení teplot v jeskyni za období března – října 2010



## **Závěr**

Stacionární a ambulantní měření klimatických podmínek probíhá v Kateřinské jeskyni. Tato jeskyně má výměnou vzduchu přes vstupní část a komíny v Hlavním dómu a Dómu chaosu mezi Suchým žlebem a náhorní rovinou „Chobot“. Dynamika jeskyně se projevuje nejvýrazněji ve vstupní chodbě, ale je dobře patrná i v celém průběhu jeskyně. Z dosavadních výzkumů v rámci projektu vyplývá závislost změn směru proudění vzduchu na změnách vnější teploty, kdy při venkovních teplotách okolo 5°C dochází k reverzi směru proudění vzduchu, což je charakteristické pro typicky dynamické jeskyně.

Monitoring teploty a vlhkosti vzduchu v Kateřinské jeskyni pomocí vysoce přesných čidel HOBO U23 Pro V2 s dataloggerem probíhá od června 2009. Zachycena je stratifikace teploty a vlhkosti vzduchu a jejich roční dynamika. Z výsledků měření je patrný vliv vnější teploty, způsobující teplotní změny uvnitř jeskyně o 2 °C (minimum 6,56 °C, maximum 8,56 °C). Nejsilnější vazba mezi vnější a vnitřní teplotou se projevila v březnu.

Součástí hodnocení mikroklimatu jeskyně je také měření teploty skalního masivu infračerveným termometrem. Snímána je teplota povrchu na celé prohlídkové trase. V průběhu roku 2010 kolísá průměrná teplota skalního masivu až o 1,4 °C. Teplotní maxima se v průběhu roku liší o 0,7 °C. Výrazná je diference minimálních teplot (až 4 °C), způsobená prochlazením vstupní chodby v zimním období (až na -1,6 °C). V letních měsících je teplota povrchu stabilní s přetrvávající nižší hodnotou ve vstupní části, což je zřejmě způsobeno intenzivním provětráváním.

## **Dedikace**

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu MŽP ČR č. SP/2D5/5/07 „Stanovení závislosti jeskynního mikroklimatu na vnějších klimatických podmínkách ve zpřístupněných jeskyních ČR.“

## **Použitá literatura**

- Cigna, A.A., 1993. Environmental management of tourist caves: the examples of Grotta di Castellana and Grotta Grande del Vento, Italy. *Environmental Geol.*, 21, pp. 173-180.
- Hamilton-Smith, E., 2004. Tourist caves. In: Gunn, J. (Ed.), *Encyclopaedia of Caves and Karst Science*. Fitzroy Dearborn, New York, pp. 726–730.
- Musil, R. a kol., 1993. *Moravský kras – labyrinty poznání*. Jaromír Bližňák, GEO program, Adamov, 336 s.
- Pokladníková, H., Litschmann, T., Středa, T., Rožnovský, J., Fukalová, P., 2009. Klimatické poměry Moravského krasu. In: ARAGONIT vědecký a odborný časopis Správy slovenských jaskýň, ročník 14, číslo 2/október 2009, 188 s., Štátna ochrana prírody SR, Správa slovenských jaskýň v Liptovskom Mikuláši, Žilina, s.176 – 177. ISSN 1335 – 213X.
- Pulido-Bosch, A., Martín-Rosales, W., López-Chicano, M., Rodríguez-Navarro, C.M., Vallejos, A., 1997. Human impact in a tourist karstic cave (Aracena Spain) *Environmental Geology*, 31, pp. 142-149.
- Rožnovský, J., Fukalová, P., Středa, T., Pokladníková, H., 2009. Mikroklima zpřístupněných jeskyní Moravského krasu. In: ARAGONIT vědecký a odborný časopis Správy slovenských jaskýň, ročník 14, číslo 2/október 2009, 188 s., Štátna ochrana prírody SR, Správa slovenských jaskýň v Liptovskom Mikuláši, Žilina, s. 177. ISSN 1335 – 213X.
- Správa Jeskyní MK, 2007. Kateřinská jeskyně – online [2009-08-04]. Dostupné na: <http://www.cavemk.cz/katerinska-jeskyne/>
- Zajíček, P. a kol., 2007. *Punkevní jeskyně a propast Macocha*. Správa jeskyní ČR. Vydala INVENCE Janov – první upravené vydání, 23 s. ISBN: 80-86143-19-8.

**Kontaktní adresa 1. autora:**

Ing. Hana Středová, Ph.D., Mendelova univerzita, Zemědělská 1, 61300 Brno, e-mail:  
hana.stredova@mendelu.cz