



METODIKA MONITORINGU MIKROKLIMATICKÝCH POMĚRŮ V JESKYNNÍCH SYSTÉMECH

Metodika je nástrojem pro opakované a objektivní měření mikroklimatických poměrů v jeskyních. Obsahuje přehled vhodných postupů a typů měřicí techniky pro zajištění dat o základních mikroklimatických prvcích, kterými jsou teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, rychlost a směr proudění vzduchu. Dalšími sledovanými veličinami jsou koncentrace plyných komponentů zejména CO_2 , případně radonu, teplota skalního masívu a teplota vody, v jeskyních protékaných tokem. Praktické použití metodiky nevyžaduje vědeckou přípravu hodnotitelů pouze odpovídající přístrojové vybavení. Znalost mikroklimatických poměrů jeskyní je nezbytná pro řešení otázek geneze krasu, pro stanovení optimálních podmínek jejich ochrany a vědecky podloženého managementu. Hodnocení mikroklimatu umožňuje mj. sledovat vliv návštěvnosti ve zpřístupněných jeskyních a stanovení optimálního počtu návštěvníků, objektivní hodnocení vlivu opatření provedených pro zpřístupnění jeskyně a managementová opatření.

THE METHODOLOGY FOR MONITORING OF MICROCLIMATIC CONDITIONS IN CAVE SYSTEMS

The methodology presents a tool to measure repeatedly and objectively a microclimatic conditions inside caves. It contains a list of suitable methods and types of measure equipment to find data on basic microclimatic entities like an air temperature, relative humidity, air stream velocity and direction. Other followed entities are gas components concentration – namely CO_2 , possibly radon, also a rock massif temperature or water temperature in case it flows through the cave. Application of the methodology is not conditional on scientific preparedness of staff, it requires just an adequate instrumental amenity. To solve the subject of karst formation, to set optimal conditions for its protection and scientifically substantiated management it is necessary to know microclimatic conditions in the cave. Microclimatic reviews make it possible to follow among other the influence of visitors in show caves and thus find their optimal amount. Further on it helps to assess the effect of adjustments carried out to enable an public access as well as other managerial measures.



JIŘÍ HEBELKA A KOL.

METODIKA MONITORINGU MIKROKLIMATICKÝCH POMĚRŮ V JESKYNNÍCH SYSTÉMECH

ISBN 978-80-87309-25-4



Metodika vznikla za finanční podpory MŽP ČR a je výstupem řešení projektu SP/2D5/5/07 „Stanovení závislosti jeskynného mikroklimatu na vnějších klimatických podmínkách ve zpřístupněných jeskyních ČR“ resortního programu výzkumu v působnosti Ministerstva životního prostředí na léta 2007 – 2011.

Jiří Hebelka, RNDr. Tomáš Litschmann, Mgr. Magdalena Korzystka,
Dr. Jacek Piasecki, RNDr. Ing. Jaroslav Rožnovský, CSc., Ph.D.,
Mgr. Tymoteusz Sawiński, Ing. Tomáš Středa, Ph.D., Ing. Hana Středová, Ph.D.

Metodika monitoringu mikroklimatických poměrů v jeskynních systémech

**Správa jeskyní České republiky
Český hydrometeorologický ústav
2011**

© Správa jeskyní České republiky

ISBN: 978-80-87309-25-4

Metodika monitoringu mikroklimatických poměrů v jeskynních systémech přináší přehled vhodných postupů a typů měřicí techniky pro kvalitní měření mikroklimatických poměrů v jeskyních, které jsou zcela specifické malou denní i roční amplitudou průběhu teploty a vlhkosti vzduchu, vyšší relativní vlhkostí vzduchu, nízkým výparem a výrazným ročním případně i denním chodem rychlosti a směru proudění. Proto nelze při jejich měření použít standardní postupy pro měření na klimatologických stanicích. Součástí jsou též postupy pro souběžná měření v okolí jeskyně tak, aby bylo možné stanovit rozdíly mezi hodnotami meteorologických prvků v jeskyni a ve vnějším prostředí. Metodika je sestavena pro měření ve všech jeskyních bez ohledu na návštěvnost.

Dodržením doporučených metod měření a vyhodnocení bude možné kvalifikovaně vyhodnotit jeskynní mikroklima pro vědecké účely, ale i pro hodnocení možných vlivů daných změnami klimatu nebo návštěvností.

Obsah

1. Úvod.....	6
2. Specifika monitoringu mikroklimatu (kryptoklimatu) v jeskyních.....	6
3. Monitoring teploty vzduchu v jeskynních systémech.....	10
4. Monitoring teploty skalní stěny a teploty povrchu skalní stěny.....	16
4.1. Měření teploty skalní stěny	16
4.2. Měření teploty povrchu skalní stěny pomocí infračerveného termometru.....	17
4.3. Měření teploty povrchu skalní stěny pomocí termokamery.....	19
5. Měření koncentrace oxidu uhličitého v jeskyních.....	20
6. Měření atmosférického tlaku vzduchu v jeskyních.....	23
7. Měření proudění vzduchu v jeskyních	24
8. Měření vlhkosti vzduchu v jeskyních.....	26
9. Měření meteorologických parametrů vnějšího prostředí	29
9.1. Měření teploty vzduchu vnějšího prostředí.....	29
9.2. Měření vlhkosti vzduchu vnějšího prostředí	30
9.3. Měření atmosférických srážek	31
9.4. Měření tlaku vzduchu.....	32
9.5. Měření koncentrací CO ₂ ve vnějším prostředí	33
10. Sběr a analýza dat.....	34
11. Možnosti aplikace metodiky	36
12. Literatura.	38
13. Summary.	39

1. Úvod

Jednou z významných složek jeskynního prostředí je jeho mikroklima, které lze definovat jako dlouhodobý režim faktorů tvořících fyzikální stav jeskynní atmosféry, vytvářený spolupůsobením vnějších a jeskynních faktorů a ve zpřístupněných jeskyních i činností člověka. K základním mikroklimatickým prvkům jsou zpravidla řazeny: teplota vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, rychlost a směr proudění vzduchu. Dalšími sledovanými veličinami v rámci mikroklimatického monitoringu jeskyní jsou: koncentrace plyných komponentů jeskynního ovzduší – zejména koncentrace CO₂, případně radonu, teplota skalního masivu a teplota vody - v jeskyních protékaných vodním tokem. K faktorům, které se významně podílí na ovlivňování mikroklimatu a jsou tak při monitoringu mikroklimatu paralelně sledovány, patří změny výšky vodní hladiny a meteorologické a klimatické podmínky vnějšího prostředí.

Jeskynní mikroklima závisí na typu jeskyně (statická, dynamická, statodynamická), velikosti a tvaru jeskynních prostor, počtu a poloze vchodů spojených s povrchem, vzdálenosti od vchodu, hydrologických poměrech, návštěvnosti ve zpřístupněných jeskyních aj.

Znalost mikroklimatických poměrů jeskyní je nezbytná nejen pro řešení otázek geneze krasu, ale především pro stanovení optimálních podmínek jejich ochrany a vědecky podloženého managementu. Z důvodu ochrany je zvlášť důležité sledování mikroklimatického režimu ve zpřístupněných jeskyních, soustavně ovlivňovaných návštěvností, a v místech, kde je to žádoucí z důvodu bezpečnosti návštěvníků a pracovníků (např. plynující jeskyně).

2. Specifika monitoringu mikroklimatu (kryptoklimatu) v jeskyních

Mikroklimatické poměry jeskyní jsou charakterizovány v porovnání s vnějším prostředím velmi malou denní i roční amplitudou průběhu teploty a vlhkosti vzduchu, vyšší relativní vlhkostí vzduchu, nízkým výparem a výrazným ročním případně i denním chodem rychlosti a směru proudění vzduchu. Při monitorování mikroklimatu (respektive kryptoklimatu při respektování striktní kategorizace) je v jeskynních systémech zapotřebí počítat zejména s těmito skutečnostmi:

- Jedná se o velmi vlhké prostředí s vysokou relativní vlhkostí vzduchu, doplněné o kapající anebo stékající vodu ze stropů a stěn. To klade značné nároky na vodotěsnost jednotlivých měřicích systémů, aby nedocházelo ke kondenzaci vody na

elektronických součástkách. U snímačů, které nemohou být ve vodotěsném pouzdrě a musí být v kontaktu s okolní atmosférou, je třeba počítat s jejich častější kalibrací, popřípadě výměnou. Vodotěsné musí být rovněž konektory, sloužící k přenosu naměřených údajů z dataloggerů, popřípadě je výhodné volit bezkontaktní způsoby přenosu.

- Změny jednotlivých měřených prvků, popřípadě jejich hodnoty, jsou poměrně malé, což klade vyšší nároky na rozlišovací schopnost a citlivost jednotlivých přístrojů. Malé amplitudy lze očekávat zejména u teploty a vlhkosti vzduchu, nízké měřitelné hodnoty se vyskytují většinou u proudění vzduchu.
- Zejména u nezpřístupněných jeskyní je nutno počítat s obtížným přístupem a ztíženými podmínkami pro instalaci a obsluhu měřicích zařízení. V těchto podmínkách je zapotřebí používat k přenosu naměřených dat z nainstalovaných zařízení jiné prostředky, než je klasický notebook (optické čtečky apod.), zejména pak tam, kde se musí překovávat různé vodní překážky, úzké průchody apod.

Podle nároků na přesnost vstupů lze monitoring jeskynního mikroklimatu specifikovat jako: orientační, základní a případně vědecký, který prohlubuje a zpřesňuje monitoring základní.

1. Orientační monitoring (orientační měření)

Slouží k získání orientačních informací o charakteru jeskynního mikroklimatu v dané jeskyni. Cílem je získat základní předběžné informace o poměrech v jeskyni a podklady pro přípravu projektu základního monitoringu. Provádí se jednorázově nebo nepravidelně dostupnou měřicí technikou na jednotlivých vybraných stanovištích, která jsou v terénu pro možnost opakování měření vhodně označena, spolu se zákresem do plánu jeskyně.

2. Základní monitoring

Slouží k získávání základních informací o charakteru jeskynního mikroklimatu v dané jeskyni a jeho vývoji. Provádí se podle předem vypracovaného projektu, zahrnujícího:

- a. Organizační zajištění měření – identifikace osob (instituce), které měření provádí, včetně jejich způsobilosti např. akreditace, autorizace apod. Pokud bude monitoring sloužit též k báňsko-bezpečnostním účelům, musí osoby (instituce, firmy) splňovat předepsanou kvalifikaci a použité přístroje být povoleny příslušným orgánem státní báňské správy.
- b. Datum a dobu měření.

- c. Stanovení termínů měření – časových intervalů opakování měření. Měření se provádí minimálně 4× ročně v měsících leden – únor, duben – květen, červenec – srpen a říjen – listopad.
- d. Určení měřicích stanovišť. Měřicí stanoviště z hlediska jejich počtu se volí na základě dříve provedeného orientačního průzkumu tak, aby byl získán reprezentativní snímek o charakteru jeskynního mikroklimatu. Ve zpřístupněných jeskyních je nutno určit stanoviště takovým způsobem, aby nedocházelo k ovlivnění měření procházejícími návštěvníky (pokud toto není účelem prováděného monitoringu). Není-li to možné, zaznamenají se časy průchodu návštěvníků. Zvolená stanoviště se v terénu vhodně označí (barvou, nýty v podlaze nebo stropu jeskyně apod.). Jednotlivá stanoviště se očíslovají směrem od vchodu dovnitř jeskyně. Číslem 1 se označí srovnávací stanoviště venku před jeskyní. Venkovní stanoviště (pokud není opatřeno ochrannými prvky) nesmí být umístěno na přímém slunci. Do evidence se zaneše poloha a výška měřicích stanovišť nad terénem.
- e. Orientační zákres prostoru jeskyně s vyznačením měřicích stanovišť. Měřicí stanoviště se vyznačí do základní mapy jeskyně v měřítku 1:500. U jeskyní převážně vertikálního charakteru je nutno vyznačit stanoviště i v podélném řezu.
- f. Použité přístrojové vybavení a podrobnosti o jeho kalibraci.
- g. Dobu trvání monitoringu, eventuelně etapy vyhodnocování.
- h. Formu zpracování naměřených údajů.

Při návrhu a realizaci monitorovací sítě v jeskynních systémech je nutno vzít v úvahu zejména tyto okolnosti:

1. Účel měření:

- a) provozní – pokud je zapotřebí mít okamžitě k dispozici údaje o základních parametrech atmosféry ve zpřístupněných jeskyních na jednom místě, je nutno vybudovat stacionární systém se snímači propojenými metalickými vodiči s přenosem údajů do centrálního místa, umístěného většinou mimo vlastní prostor jeskyně. Mezi monitorované prvky patří: teplota vzduchu, vlhkost vzduchu, teplota vody (v případě, že jeskyní protéká podzemní tok nebo se v ní nacházejí rozsáhlejší vodní plochy), obsah CO₂ v jeskynním vzduchu

(zejména pak v jeskyních s přirozenými vývěry tohoto plynu z podloží). Pokud provozní měření neslouží současně k vědeckým účelům, je možno se spokojit s nižší přesností jednotlivých snímačů, zejména pak u snímačů CO₂, u nichž cena výrazně stoupá s dosahovanou přesností. Četnost měření by měla být nejlépe 1 minuta s uchováváním všech informací na paměťovém médiu počítače, popřípadě ve spojení s varovným systémem. Naměřené údaje je možno vhodným způsobem zobrazovat pro informaci návštěvníků,

- b) vědecký – slouží k poznání zákonitostí v chodu jednotlivých měřených prvků v dlouhodobém časovém horizontu a jejich ovlivnění přirozenými anebo antropogenními vlivy. V tomto případě je možno volit autonomní registrační zařízení, shromažďující informace přímo v měřeném místě a přenášené jednou za čas k dalšímu vyhodnocení. Oproti provoznímu měření je nutno volit snímače s vyšší přesností a rozlišovací schopností. Ve zpřístupněných jeskyních je doporučována stejná četnost měření jako u provozního měření, tj. 1 minuta. U měřicích zařízení s omezenou kapacitou paměti lze výjimečně měřit v intervalu 10 minut. V nepřístupných jeskyních s obtížnějším přístupem a menší variabilitou měřených prvků lze četnost měření snížit, doporučený interval je 1 hodina.

2. Prostorový rozsah měření:

- a) plošný – snímače jsou rozmístěny přibližně ve stejné výšce nade dnem jeskynního prostoru. Tento způsob najde uplatnění především v nižších jeskyních tvořených převážně chodbami,
- b) prostorový – snímače jsou, vedle plošného rozmístění viz bod 2a, rozmístěny ještě v několika úrovních nad sebou a monitorují vertikální rozložení jednotlivých prvků. Tento způsob je vhodný zejména v jeskyních s vyššími dómy.

3. Časový rozsah měření:

Pro poznání zákonitostí chování jeskynního klimatu je zapotřebí volit co nejdelší časový rozsah měření, minimálně po dobu jednoho roku, aby byly zachyceny aspekty všech čtyř ročních období. V ojedinělých případech je možno provádět i krátkodobá ambulantní měření, jejich vypovídací schopnost je však omezena.

Měření v jeskynních systémech je nutno doplnit vždy i o povrchová měření základních meteorologických veličin s minimálně stejnou četností měření jako v podzemí a minimálně o stejné délce trvání.

Moderní monitorovací technika v současné době umožňuje většinu měření provádět automaticky s pravidelným záznamem naměřených hodnot, ruční měření se provádějí pouze u těch prvků, které nelze jednoduše automatizovat a které slouží k doplnění automatizovaných měření.

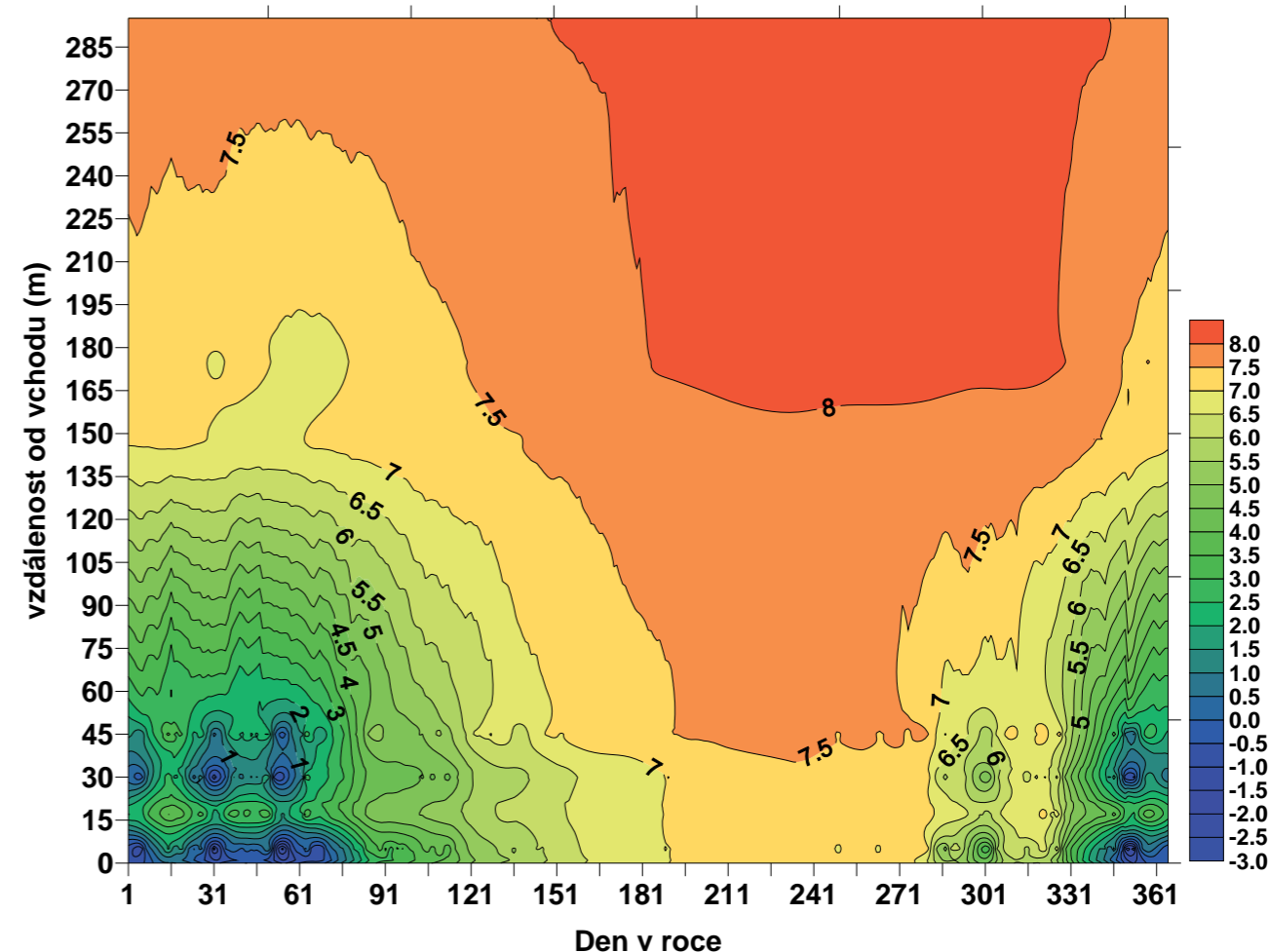
3. Monitoring teploty vzduchu v jeskynních systémech

Všeobecné požadavky na měření teploty vzduchu:

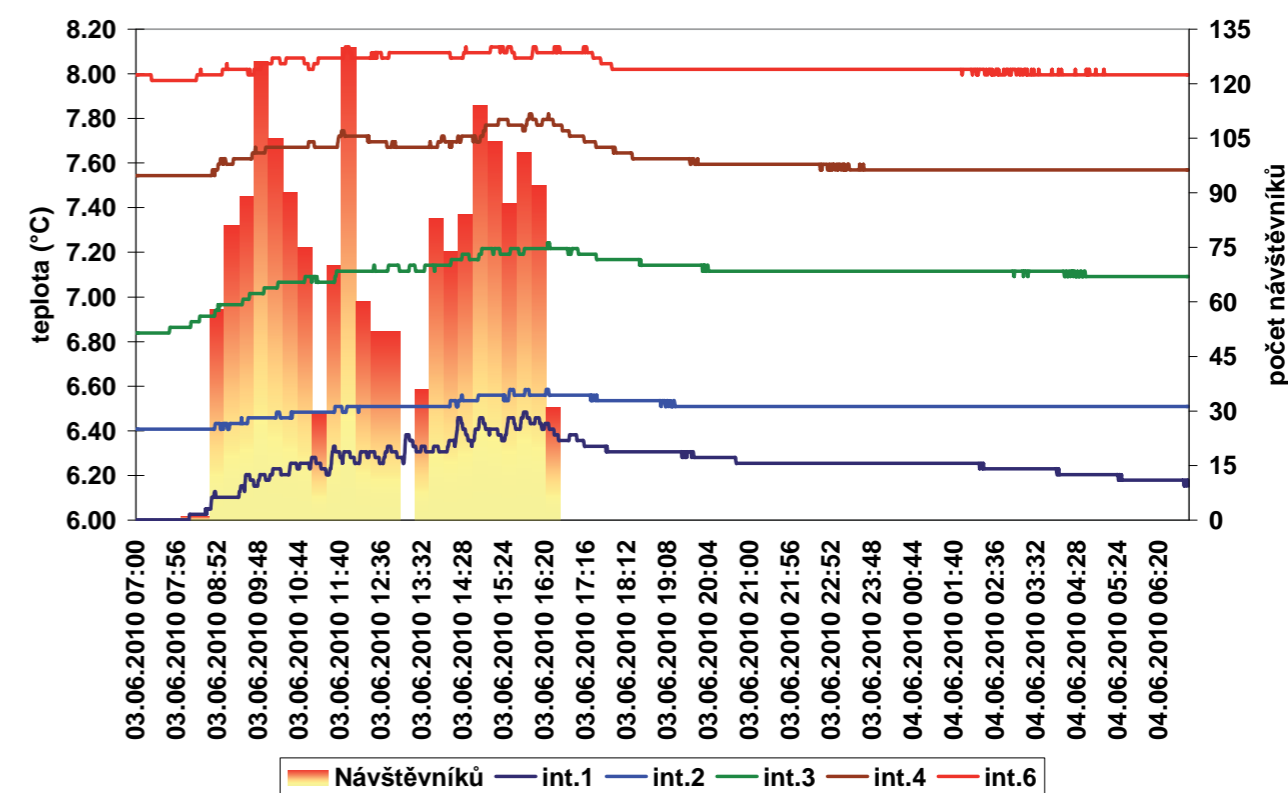
- Rozlišovací schopnost snímače: 0,01 °C.
- Přesnost měření: ± 0,2 °C.
- Interval měření: zpřístupněné jeskyně 1 min., nezpřístupněné jeskyně max. 1 hod.
- Interval mezi kalibrací snímačů: 2 roky.

Přirozený teplotní režim jeskyně je ovlivňován především vstupy tepla z nadloží, podloží a prouděním vzduchu z vnějšího prostředí. V případech, kdy daným prostorem protéká vodní tok, může za určitých situací dojít k výraznějšímu ovlivnění teploty vzduchu v důsledku rozdílné teploty protékající vody. Průměrná teplota vzduchu v jeskyni se hodnotou blíží k vnější průměrné roční teplotě, vyznačuje se velmi malými sezónními a denními amplitudami a je v rovnováze s vnitřní teplotou skalního masivu a vody. V blízkosti vstupu do jeskyně (heterogenní zóna) se dostává konvekcí venkovní vzduch a způsobuje změny teploty na vzdálenost až stovek metrů.

Teplotní dynamika interiéru jeskyní se pohybuje na úrovni desetin až několika stupňů Celsia. Například z výsledků měření ve střední části Kateřinské jeskyně v letech 2009 a 2011 je v průběhu roku patrný vliv vnější teploty, způsobující teplotní změny uvnitř jeskyně o 2 °C (minimum 6,56 °C, maximum 8,56 °C). Výrazný vliv sehrává zejména vzdálenost monitorovaného prostoru od vstupního otvoru (viz. obr. 1) a v jisté míře také vliv návštěvníků (obr. 2).



Obr. 1 Teplota vzduchu v Kateřinské jeskyni v závislosti na termínu a vzdálenosti od vchodu.



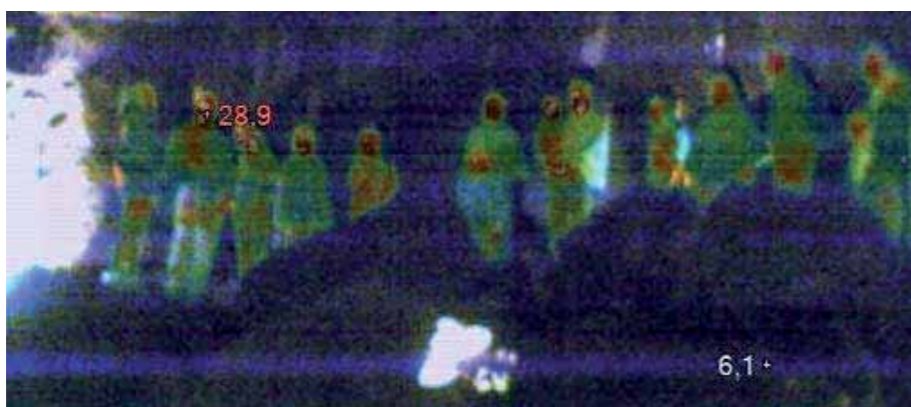
Obr. 2 Průběh teplot interiéru jeskyně a počty návštěvníků v daný okamžik v den s vysokou návštěvností (Kateřinská jeskyně 3. 6. 2010).

S ohledem na uvedené vlivy, postihující nerovnoměrně mikroklimatické poměry různých úseků jeskynního systému (tab. 1), je ideální zřízení automatického stacionárního monitorovacího systému s kontinuálním monitoringem (v případě dostupnosti finančních prostředků a potřebě podrobného monitoringu). V případě redukovaného monitoringu je vhodné umístění čidel minimálně v prostoru s predikovaným výrazným vlivem realizovaných činností na teplotu vzduchu.

Tab. 1 Rozsah teplot vzduchu v závislosti na vzdálenosti od vstupního otvoru, Kateřinská jeskyně, březen 2010 – březen 2011.

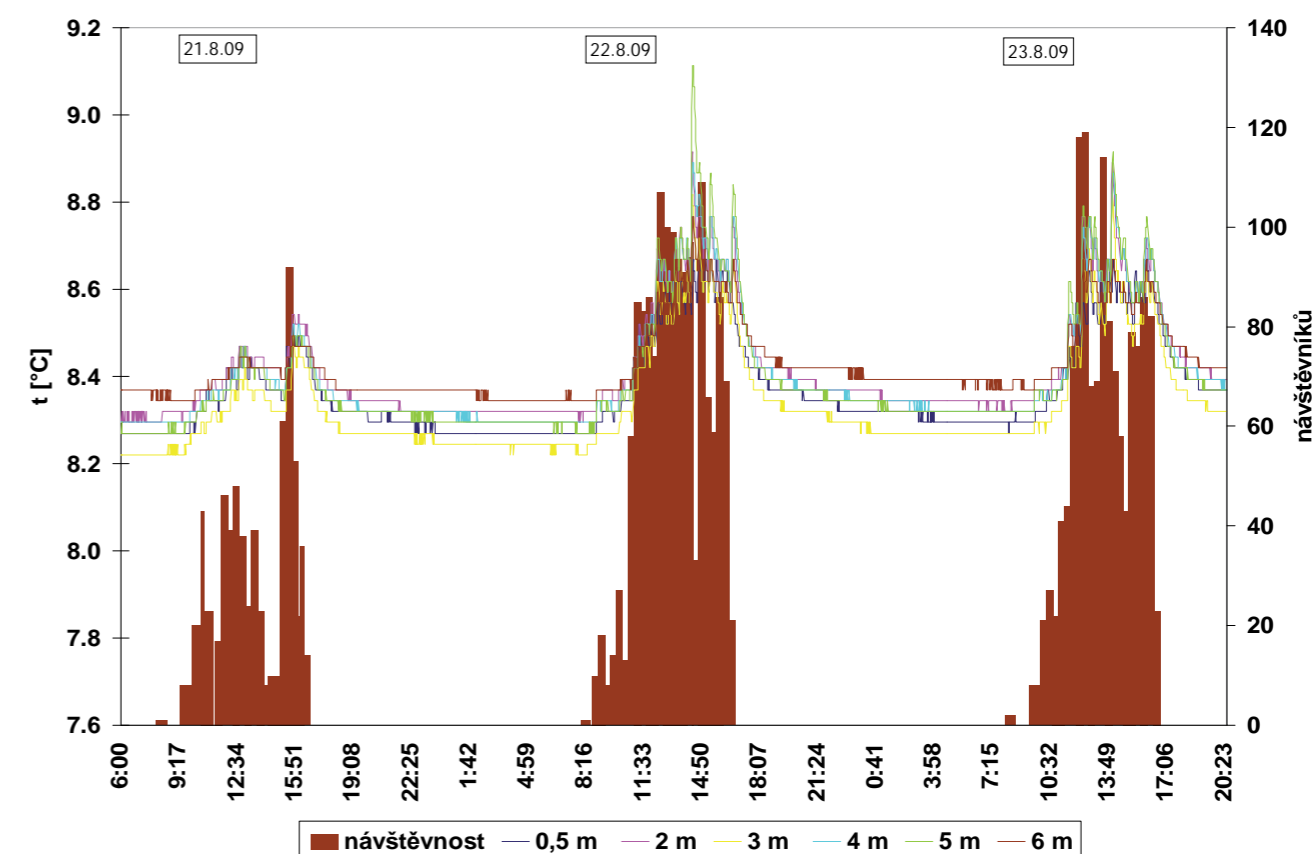
	Vzdálenost čidla od vstupu			
	5 m	35 m	148 m	295 m
Min. teplota °C	-3,806	-2,188	6,737	7,594
Max. teplota °C	7,619	7,569	8,120	8,767
Průměrná teplota	4,349	4,965	7,503	7,966

Vhodným zařízením jsou pro uvedené účely outdoorová čidla s kapacitně dostatečným dataloggerem s vlastním zdrojem energie a s rozlišením měření min. 0,01 °C. Doba měření je tak omezena kapacitou paměti měřicího přístroje a životností baterií. Minimalizována je i manipulace s jednotlivými čidly, kdy při dotyku může docházet k ohřevu čidel a zkreslení výsledků (vyrovnání teploty čidla s okolní teplotou trvá po manipulaci až několik desítek minut). Interval záznamu je třeba diferencovat podle typu jeskynního systému a období, ve kterém monitoring probíhá. V období s náhlými a čtenějšími výkyvy teplot (možnost náhlého zvýšení průtoků; období s výraznými výkyvy počasí apod.) je vhodný interval měření alespoň v řádu desítek minut. V případě ovlivnění prostředí návštěvností (vnos tepla návštěvníky je demonstrován na obr. 3) je na místě použít interval měření v 1minutovém kroku a to s rozlišením minimálně 0,1 °C, lépe však 0,01 °C.

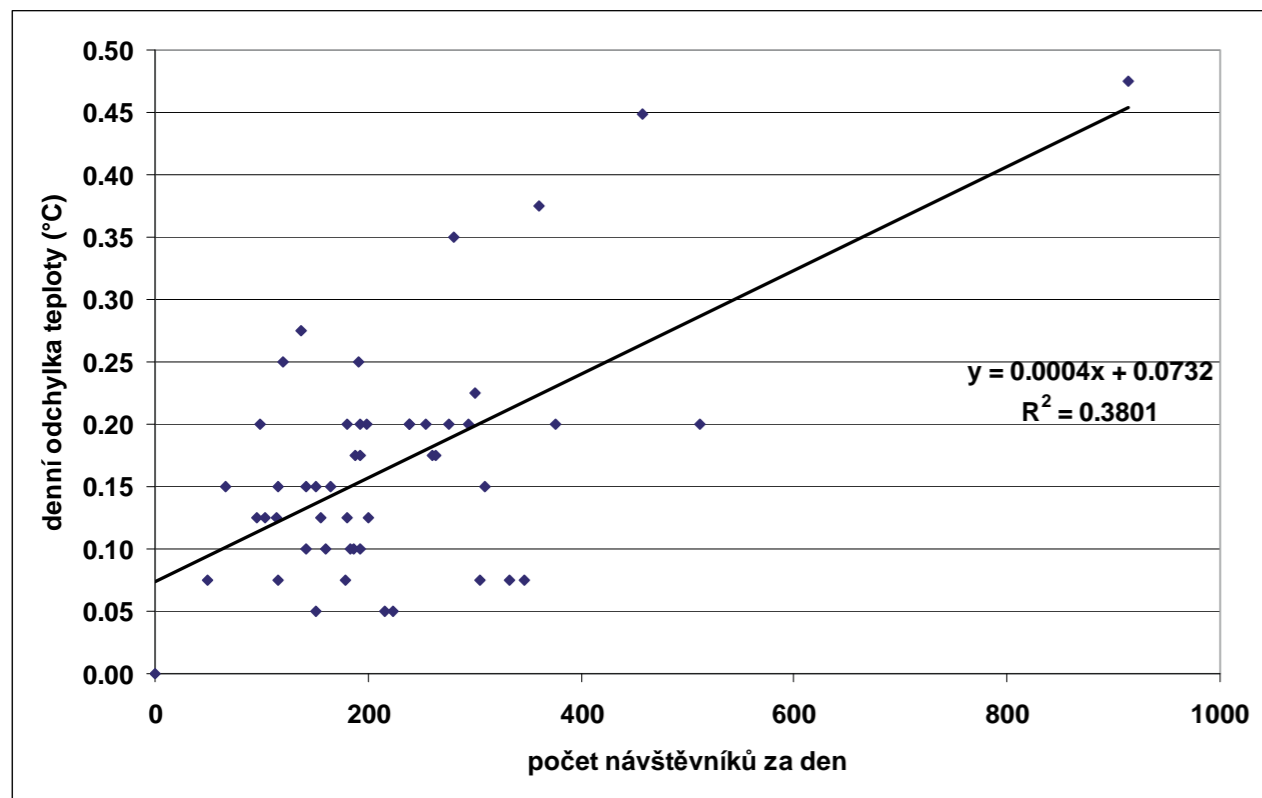


Obr. 3 Termosnímek s návštěvníky v Kateřinské jeskyni.

Pro kvantifikaci vlivu návštěvníků na teplotu interiéru (maximální denní amplitudu) je možno použít postup, kdy je teplotní výkyv zjištěn jako rozdíl mezi teplotou vzduchu naměřenou daným čidlem v 7:00 hodnoceného dne a teplotním maximem naměřeným stejným čidlem v následujících 24 hodinách. Předpokladem je, že do 7:00 (tj. před příchodem prvních návštěvníků) dojde v jeskyni ke stabilizaci teploty na teplotu „očistěnou“ od vlivu návštěvníků z předešlého dne. Zvýšení teploty v návštěvních hodinách, porovnané s touto „základní teplotou“, umožňuje kvantifikaci vlivu návštěvníků na teplotu vzduchu v daný den. Nejvyšší takto zjištěný teplotní výkyv činil např. v roce 2010 v Kateřinské jeskyni 0,50 °C. Zjištěn byl u čidla ve střední části jeskyně dne 3. 6. 2010, tj. v den s nejvyšší denní návštěvností za hodnocené období (913 návštěvníků). Vliv návštěvnosti se projevuje rozdílně dle výšky umístění čidla (obr. 4). Bodovým grafem (obr. 5) je kvantifikován vliv návštěvnosti na zvyšování teploty vzduchu na základě monitoringu ve střední části Kateřinské jeskyně ve výšce čidla 0,5 m. Pro zajištění dostatečné vypovídací hodnoty jsou hodnocena data z období roku s vysokou návštěvností (25. 5. 2010 – 25. 7. 2010). Obdobnou tendenci vykazoval monitoring ve výškách měření 2, 3 a 4 m. Ve výšce 5 m se již vliv návštěvníků na amplitudy teplot vzduchu tak výrazně neprojevoval.



Obr. 4 Vliv návštěvnosti na vertikální profil teploty vzduchu v Kateřinské jeskyni ve dnech 21. až 23. 8. 2009.



Obr. 5 Vliv návštěvnosti na změny teploty v centrální části Kateřinské jeskyně.

Jednotlivá teplotní čidla je tak vhodné umístit v průběhu celého objektu na mikroklimaticky reprezentativní místa do jednotné výšky. Doporučená výška s výjimkou vertikálních profilů je 1 metr (obr. 6), v případě podrobného monitoringu vertikálního profilu potom do odstupňovaných výšek (obr. 7). Pro instalaci senzorů jsou vhodné různé typy stojanů a stativů z antikorozního materiálu, eliminující případný vliv zdrojů tepla, skapu vody apod.

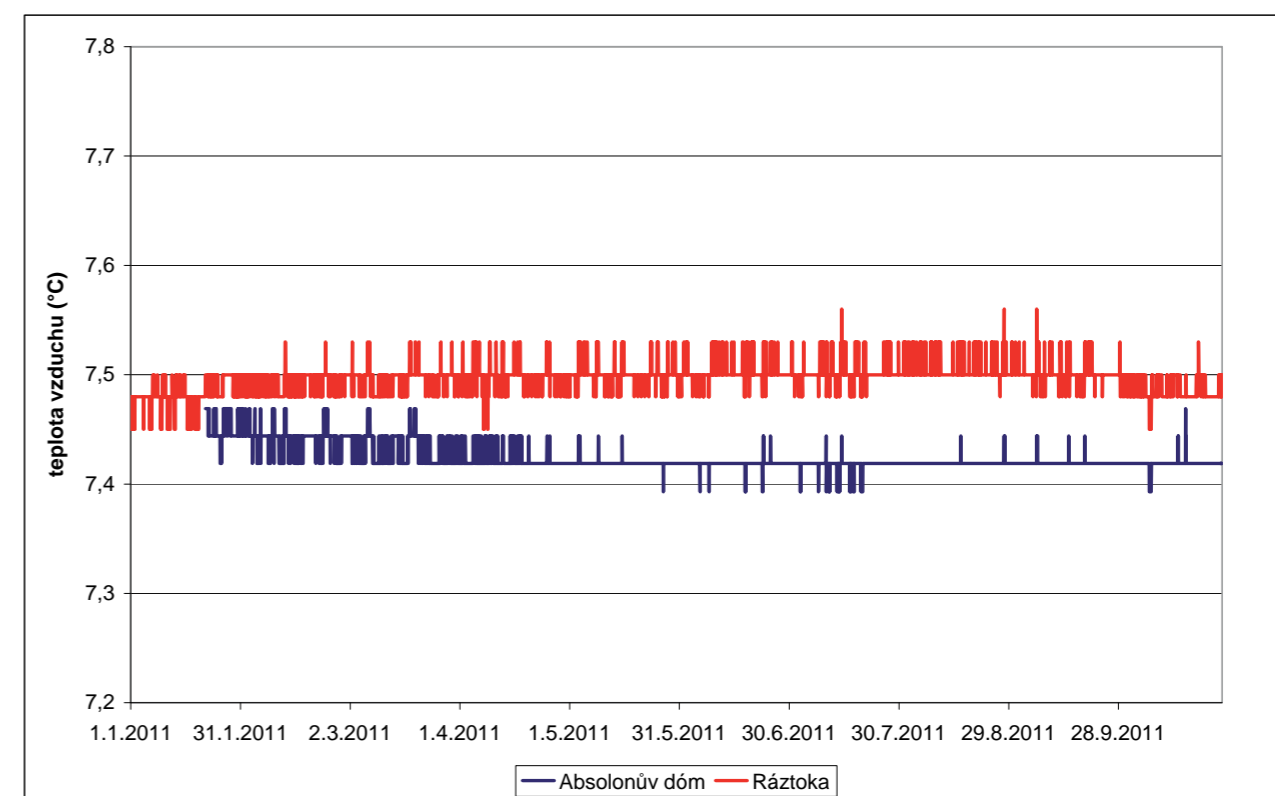


Obr. 6 (vlevo) Umístění teplotních čidel v interiéru jeskyně – jedna výška.
Obr. 7 (vpravo) Umístění teplotních čidel v interiéru jeskyně – vertikální profil.

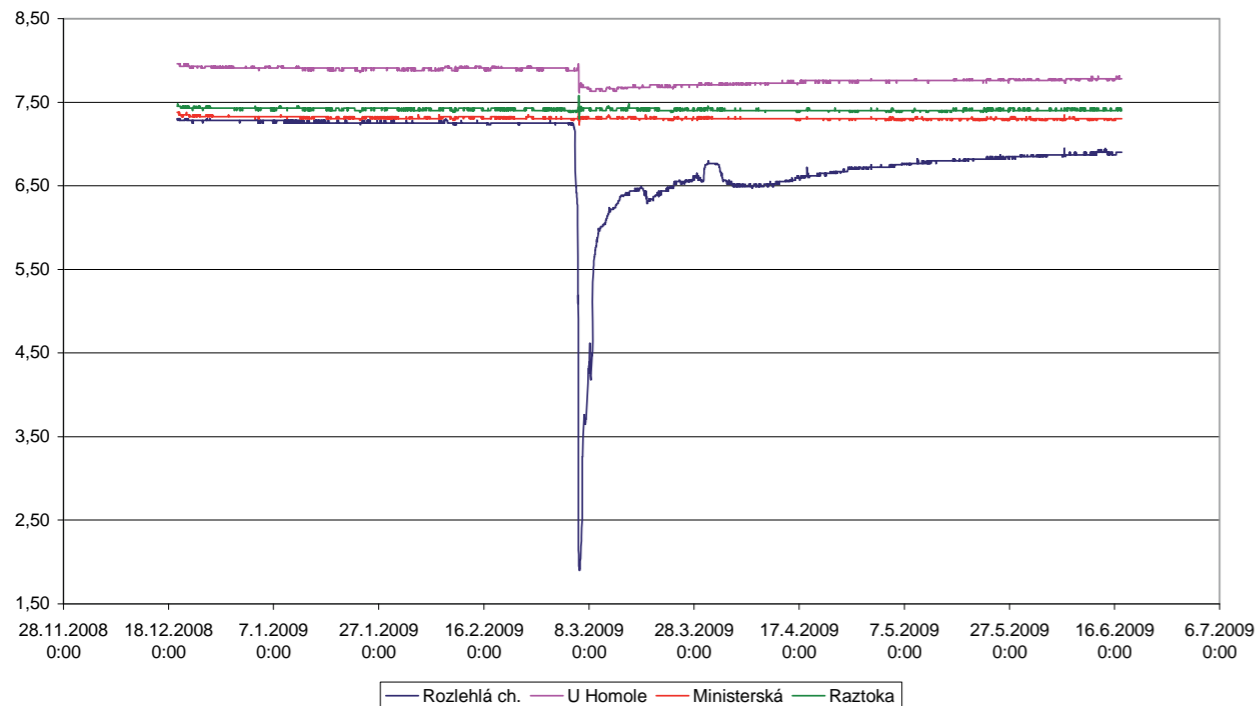
Po každém narušení homeostáze mikroklimatu má jeskynní systém tendenci k návratu do stabilního režimu. Při překročení únosnosti („carrying capacity“), zejména v teplém období a během období s krátkými nocemi, však hrozí riziko nedostatečné regenerace a nenávratných poškození prostředí, obzvláště v těch případech, kdy nemá působící faktor lineární, ale kumulativní účinky.

Příkladem jeskynního prostředí s minimální dynamikou změn teplot vzduchu je např. situace v Amatérské jeskyni. Tato jeskyně je typem statické jeskyně (s jedním, hermeticky uzavřeným vchodem) a minimálním pohybem osob v průběhu roku. Tomu odpovídá i velmi malá amplituda teploty vzduchu během roku v prostorách více vzdálených od vodního toku. Na obr. 8 je uvedena dynamika teplot vzduchu v období zima až podzim 2011 v Absolonově dómu (amplituda pouze 0,08 °C) a v dómu Ráztoka (amplituda 0,11 °C).

Teplotu vzduchu v jeskynních prostorách blíže situovaných vodnímu toku výrazně ovlivňuje jeho kolísání. Z výsledků měření v Amatérské jeskyni vyplývá, že při jarních oblevách (např. dne 6. 3. 2009), kdy jeskyně protékala studená voda, dochází k prudkému a výraznému ochlazení přilehlých jeskynních prostor (o 5,4 °C v Rozlehlé chodbě) a po skončení oblevy se teplota jen velice zvolna (v řádech měsíců) vrací na původní hodnoty (obr. 9). Obdobně dochází ke zvýšení teploty vzduchu po letních přívalových deštích vlivem velkého objemu teplé vody přicházející z povrchu do podzemí.



Obr. 8 Průběh teploty vzduchu v Amatérské jeskyni od 1.1 do 26. 10. 2011.



Obr. 9 Ovlivnění teploty vzduchu v Amatérské jeskyni kolísáním hladiny podzemního toku.

4. Monitoring teploty skalní stěny a teploty povrchu skalní stěny

4.1. Měření teploty skalní stěny

Všeobecné požadavky na měření teploty skalní stěny:

- Rozlišovací schopnost snímače: 0,01 °C.**
- Přesnost měření: ± 0,2 °C.**
- Interval měření: max 1 hod.**
- Interval mezi kalibrací snímačů: 2 roky.**

Měření změn teploty skalní stěny se provádí pomocí teplotních snímačů, umístěných v předem vyvrtaných otvorech do skalní stěny a připojených pomocí kabelu k záznamovému zařízení. Po vložení snímačů do předvrtaných otvorů je nutné tyto otvory hermeticky izolovat od okolního prostředí (např. pomocí cementu, montážní pěny apod.). Doporučená hloubka umístění snímačů ve stěně je 20 cm. Pro vědecký monitoring je možné měřit i v jiných hloubkách např. 5, 30, 50 cm a více. Pro měření teploty půdy lze použít datalogery s externí vpichovací sondou přiměřené délky.

4.2. Měření teploty povrchu skalní stěny pomocí infračerveného termometru

Všeobecné požadavky na měření teploty povrchu infračerveným termometrem:

- Rozlišovací schopnost snímače: 0,1 °C.**
- Přesnost měření: ± 1,0 °C.**
- Možnost nastavení emisivity materiálu (vápenec $\epsilon = 0,98$).**
- Interval měření: zpřístupněné jeskyně měsíčně, nezpřístupněné jeskyně čtvrtletně.**
- Interval mezi kalibrací snímačů: 2 roky.**

V rámci teplotního hodnocení interiéru jeskyně je významným prvkem teplota skalního masivu. K měření teploty povrchu skalní stěny je možné použít ruční bezdotykový infračervený teploměr s nastavitelnou emisivitou a laserovým zaměřovačem. Přístroj měří ve zvoleném intervalu množství infračervené energie emitované zacíleným předmětem a zobrazuje teplotu povrchu tohoto předmětu (obr. 10 a 11). Značnou výhodou přístroje je možnost měření teplot bez přímého kontaktu s měřeným objektem a bez nutnosti destrukce části interiéru jeskyně.

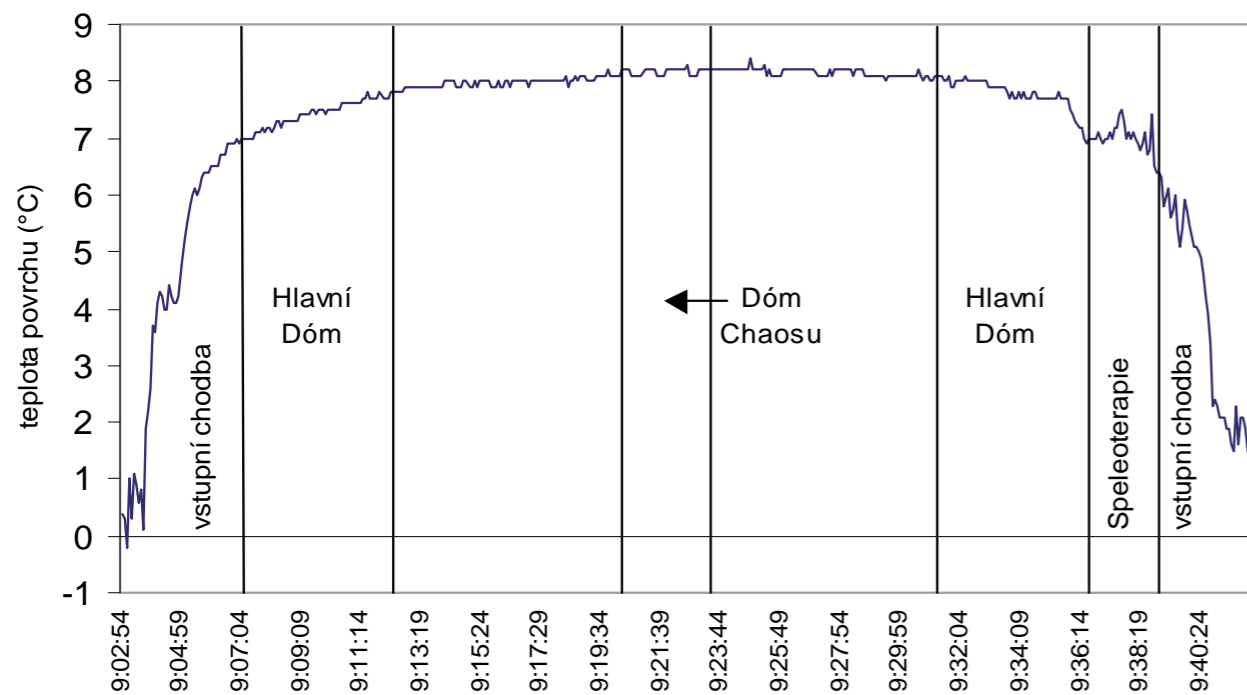
V Kateřinské jeskyni v průběhu roku 2010 kolísala průměrná teplota skalního masivu až o 1,4 °C. Teplotní maxima jednoho místa se v průběhu roku liší o 0,7 °C. Výrazná je diference minimálních teplot (až 4 °C), způsobená prochlazením vstupní chodby v zimním období (až na -1,6 °C). V letních měsících je teplota povrchu stabilní s přetrvávající nižší hodnotou ve vstupní části, což je zřejmě způsobeno intenzivním provětráváním. Vzhledem k omezené dynamice teploty skalního povrchu během roku je dostatečný přibližně měsíční interval měření s rozlišením měření $\leq 0,1$ °C. Teplotu skalního masivu je nutné snímat ve zvolených, přesně definovaných bodech nebo v průběhu celého jeskynního systému v přibližně stejné výšce a ve stejném charakteru masivu, např. podél prohlídkové trasy – viz. obr. 12. V tomto případě je nutné eliminovat případnou chybu měření heterogenitou povrchu na trase monitoringu (atypické „kapsy“ ve skalní stěně či materiál s odlišnou emisivitou – hlína atd.).



Obr. 10 Infračervený termometr Raynger.

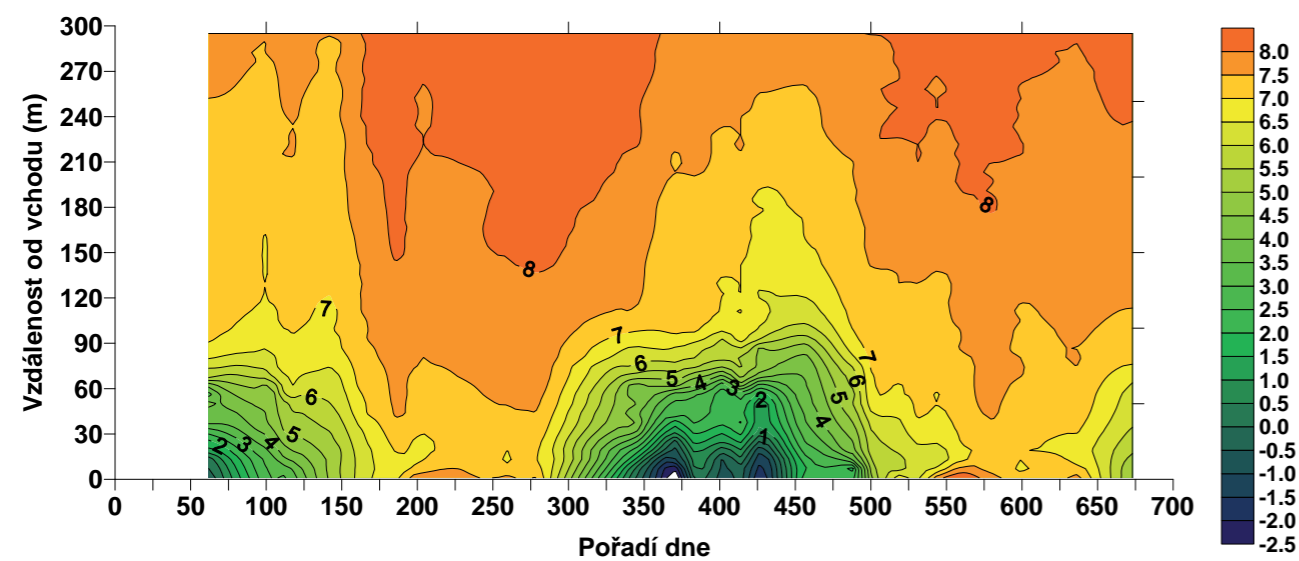


Obr. 11 Zaměřovací laserový paprsek.



Obr. 12 Průběh teploty povrchu na prohlídkové trase v Kateřinské jeskyni (25. 11. 2008).

Vývoj teplot skalního povrchu v průběhu období a v závislosti na vzdálenosti od vstupu je vhodné interpolovat a znázornit ve 2D projekci, např. prostřednictvím programu SURFER (obr. 13). Zachyceno je období od února 2010 do října 2011. Data jsou interpolována metodou „kriging“. Zřejmá je logicky poměrně výrazná dynamika teploty povrchu ve vstupní části, slábnoucí s rostoucí vzdáleností od vstupu.



Obr. 13 Teplota skalní stěny v závislosti na termínu měření a vzdálenosti od vchodu.

4.3. Měření teploty povrchu skalní stěny pomocí termokamery

Všeobecné požadavky na měření teploty povrchu termokamerou:

- a) Rozlišovací schopnost snímače: 0,1 °C.
- b) Přesnost měření: ± 2 °C nebo 2 % (platí vyšší hodnota).
- c) Možnost nastavení emisivity materiálu (vápenec $\epsilon = 0,98$).

Pro primární teplotní průzkum a identifikaci míst s odlišnými teplotními podmínkami je vhodné použití ruční termální kamery. S ohledem na teplotní a prostorové podmínky jeskyně doporučujeme použití termokamer s detektorem minimálně 320×240, s vysokou teplotní citlivostí $\leq 0,05$ °C a technologií „IR – Fusion“ s možností konfrontace IR a viditelné formy snímku, s automatickou detekcí studeného a horkého bodu. Problémem při použití termokamery je exaktní stanovení emisivity materiálu pro následné generování přesné teploty povrchu. Při praktickém studiu v terénu však obvykle dostačuje pracovat s relativními hodnotami teploty, které jsou dostatečně vypovídající o režimu povrchové teploty. Umožňují dobře popsat jak její prostorovou a časovou variabilitu i teplotní chování sledovaných povrchů, případně upozornit na možný vznik jevů bezprostředně souvisejících s charakterem pole povrchové teploty. Příklad identifikace míst s výrazně odlišnou teplotou povrchu pomocí termokamery je demonstrován na obr. 14 a 15. Identická scéna ze vstupní chodby Kateřinské jeskyně zachycuje teplotní pole v únoru a září téhož roku. Zřejmý je výskyt ledových útvarů (teplota -3,6 °C) versus teplota osvětlení (15,1 °C) v únoru. V září činila nejnižší teplota místa 5,1 °C a nejvyšší (osvětlení) 13,4 °C.



Obr. 14 (vlevo) Teplota povrchů v interiéru jeskyně v únoru.
Obr. 15 (vlevo) Teplota povrchů v interiéru jeskyně v září.

5. Měření koncentrace oxidu uhličitého v jeskyních

Všeobecné požadavky na měření koncentrace CO₂:

a) Rozlišovací schopnost snímače: 1 ppm.

b) Přesnost měření: ± 5 % z měřené hodnoty.

c) Interval měření: zpřístupněné jeskyně 10 min, nezpřístupněné jeskyně 1 hod.

d) Interval mezi kalibrací snímačů: 1 rok.

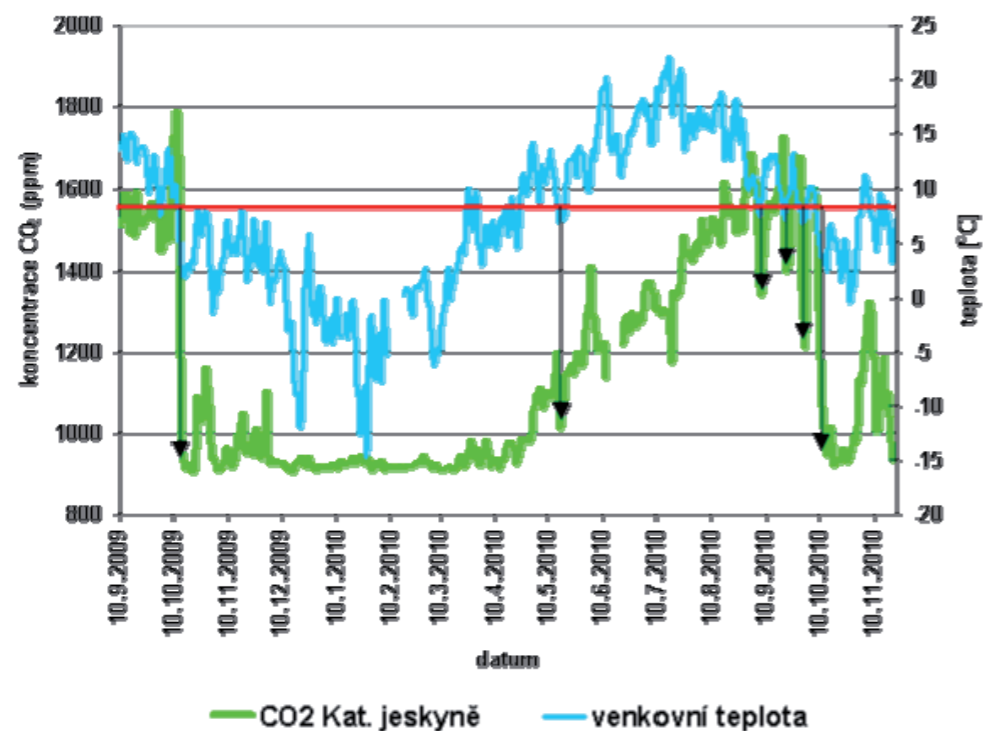
Oxid uhličitý hraje důležitou roli při vývoji krasových útvarů v karbonátových horninách. Zatímco v povrchových vrstvách napomáhá rozpouštění vápenců, v jeskynním prostředí je naopak důležitou složkou umožňující růst speleotém. Kromě toho znalost koncentrací CO₂ v jeskynní atmosféře je důležitým indikátorem výměny jeskynní atmosféry s okolním prostředím.

Zdrojem oxidu uhličitého v jeskynní atmosféře jsou následující procesy:

1. Přítok z okolní atmosféry – poměrně zanedbatelný zdroj vzhledem k tomu, že koncentrace CO₂ většinou bývají vyšší než ve venkovním prostředí. Uplatňuje se většinou v chladném období.
2. Přítok z okolní půdy – jeden z hlavních zdrojů zvýšených koncentrací CO₂ v jeskyních, zejména v teplém období. Z nadložní půdy se šíří do jeskynních prostor ve zvýšené míře puklinami, v menším množství se uvolňuje ze skapových vod. Produkce CO₂ v půdách závisí na jejich teplotě a vlhkosti.
3. Uvolňování CO₂ v důsledku bakteriální oxidace organické hmoty v jeskynních sedimentech – poměrně malý zdroj v závislosti na obsahu organické hmoty v těchto sedimentech závisí na tom, jak často a v jaké míře je do daného prostoru přiváděna organická hmota naplavováním zvenčí.
4. Přítok CO₂ difúzí z hlubinných zdrojů – v některých jeskyních (Zbrašovské aragonitové jeskyně) je výrazným zdrojem, vysoce převyšující podíl ostatních zdrojů. Mohou se tak vytvořit životu nebezpečná místa a ve zpřístupněných jeskyních je zapotřebí je nepřetržitě monitorovat.
5. Antropogenní zdroje – ve zpřístupněných jeskyních je do jejich atmosféry uvolňován CO₂ vydechovaný návštěvníky. Přínos z těchto zdrojů na zvýšení koncentrací závisí na počtu návštěvníků a velikosti jeskynních prostor.

Snižování koncentrací CO₂ v jeskynních prostorách se děje výměnou s okolním prostředím (pomineme-li nucené odvětrávání v případech, kdy je nutno snížit jeho koncentraci s ohledem na bezpečnost návštěvníků). Tato výměna je podmíněna rozdílem teplot v jeskyni a venku. V případě, že teplota venkovního vzduchu je nižší než v jeskyni, dochází ve většině případů k jejímu odvětrávání, a to nejprve částečnému, k němuž dochází v případě, že pokles venkovní teploty pod teplotu uvnitř jeskyně je krátkodobý a trvá jen několik hodin denně, v případě celodenních nižších teplot okolní atmosféry tento chladnější vzduch vytlačuje teplejší z jeskynních prostor a koncentrace CO₂ se přibližují venkovním. Jak vyplývá z výše uvedeného výčtu zdrojů CO₂ v jeskyních, mohou se jeho koncentrace pohybovat v poměrně širokém rozmezí. Pro koncentrace CO₂ je používána jednotka objemová % nebo ppm (partes per milion) – 1 ppm = 0,0001 %; 1% = 10 000 ppm. Prakticky u všech snímačů všeobecně platí, že čím větší rozsah, tím nižší rozlišovací schopnost a přesnost. S ohledem na cenu snímačů je nutné před instalací konkrétního typu snímače mít alespoň orientační informaci, v jakém rozmezí se koncentrace pohybují v jednotlivých místech daného jeskynního prostoru. K tomu lze s úspěchem využít nejrůznější přenosné měřiče koncentrací CO₂, většinou málo přesné, avšak cenově dostupné, sloužící k měření koncentrací v obytných místnostech. Nemají sice potřebné krytí pro měření v jeskynních prostorách, avšak pro ambulantní měření jsou postačující. Jejich rozsah bývá většinou do 10 000 ppm.

Nejvyšších koncentrací CO₂ v ovzduší je dosahováno ke konci letního období, typicky červenec nebo srpen, v závislosti na povětrnostních podmínkách daného roku. V tomto období je vhodné provést orientační měření v několika termínech na různých místech studovaných prostor, údaje zaznamenat a vyhodnotit s ohledem na účel trvalého monitoringu. Na základě výsledků těchto měření je možné přistoupit k volbě rozsahu přístroje trvale monitorujícího koncentrace CO₂. Ve většině jeskyní v ČR (s výjimkou některých částí Zbrašovských jeskyní) lze očekávat maximální koncentrace kolem 5 000 ppm, v některých hůře ventilovaných uzavřených prostorách bez návštěvníků mohou dosahovat až přes 10 000 ppm. Dynamika koncentrací CO₂ v průběhu roku je demonstrována na příkladu Kateřinské jeskyně (obr. 16). Šipkami jsou v grafu označeny dny, v nichž teplota venkovního vzduchu klesla pod průměrnou teplotu vzduchu v jeskyni a došlo k poklesu koncentrací CO₂.



Obr. 16 Změny denní průměrné koncentrace CO₂ a teploty vzduchu v Kateřinské jeskyni za období 10. 9. 2009 – 22. 11. 2010.

K měření koncentrací CO₂ se v současné době v praxi téměř výhradně používají snímače pracující na absorpci infračerveného záření. Jsou založeny na principu, že heteroatomární molekuly, mezi něž patří i CO₂, interagují s infračerveným zářením. Energie záření, která je molekulami absorbována, způsobí jejich vibrace. Absorpční koeficient je dán rezonanční frekvencí molekul a je pro jednotlivé plyny charakteristický. Infračervený paprsek prochází vzorkovaným prostorem a po průchodu spektrálním filtrem dopadá na detektor. Mezi nevýhody těchto snímačů patří časová nestabilita vysílače infračerveného záření při jeho stárnutí, což výrobci kompenzují různými způsoby, přičemž nejnověji se používají dva vysílací prvky, z nichž jeden vysílá častěji a je určen k měření, druhý méně často je určen k eliminaci driftu měřicího zdroje.

Nejvyšší přesnosti pro provozní měření lze zřejmě dosáhnout u nejkvalitnějších přístrojů (např. firmy Vaisala) v rozmezí ± 3 ppm (anebo ± 1 % z měřené hodnoty) při rozsahu 0 – 1000 ppm, u vyšších rozsahů se tato přesnost snižuje na ± 5 ppm (± 2 %). U méně kvalitních přístrojů může tato chyba být při nižších koncentracích až ± 50 ppm (anebo ± 5 % z měřené hodnoty), při vyšších (někdy už nad 1500 ppm) vzrůstá nad ± 7 %. Výměna plynů v měřicí komoře přístrojů může probíhat buď difúzí, anebo umělou ventilací, kdy je vzduch do komory vháněn přidavným čerpadlem. Vzhledem k tomu, že probíhající změny v koncentracích CO₂ v jeskyních jsou většinou pozvolné, je difusní výměna postačující.

Důležitá je pravidelná kalibrace přístrojů, s ohledem na extrémní vlhkostní podmínky by měla být častější, než doporučuje výrobce daného přístroje.

Při návrhu typu a rozmístění jednotlivých snímačů v prostoru jeskyně je podobně jako i u dalších měřených prvků zapotřebí vycházet z cíle měření, kterým může být např. zkoumání ventilace jeskyně, stanovení velikosti jednotlivých zdrojů CO₂, vliv návštěvníků na koncentraci apod. Při zkoumání vlivu návštěvníků je nutno použít přesnější přístroje než např. při studiu ventilace, obdobný ohled se musí vzít v úvahu i při umístění přístrojů. Pokud to podmínky, zejména pak finanční, dovolují, je výhodné použít alespoň dva snímače v různých částech, např. uvnitř a v blízkosti vstupu do jeskyně, popřípadě v prostoru s návštěvníky a ve veřejnosti nepřístupné části.

Při vlastním umístění měřicí části přístroje je nutno si uvědomit, že CO₂ je těžší než vzduch a hromadí se v nejnižších partiích daného prostoru, zejména za situací s malým promícháváním vzduchu, které jsou pro jeskyně typické. Proto je nutno pečlivě volit výšku snímače nad okolním terénem, a v případě více snímačů při plošném monitoringu zajistit, aby byla vždy stejná.

6. Měření atmosférického tlaku vzduchu v jeskyních

Změny tlaku vzduchu v okolní atmosféře jsou vyrovnávány systémem otvorů a puklin v obklopujícím skalním masivu. Zejména v malých a středně velkých systémech a obzvláště ve zpřístupněných jeskyních je toto vyrovnání prouděním vzduchu ve vstupních otvorech a štěrbinách poměrně rychlé. V důsledku toho jsou tlakové rozdíly mezi vnitřním a vnějším prostředím jeskyní malé a postižitelné pouze velmi přesnými snímači. V zahraniční literatuře se uvádí (např. Pflitsch, A. a kol., Dynamic climatologic processes of barometric cave systems using the example of Jewel Cave and Wind Cave in South Dakota, USA, Acta Carsologica, 2010, 39/3, p. 449–462), že nedosahují velikosti 1 hPa a jejich měření je poměrně problematické a vyžadovalo by použití speciálních snímačů. Pro běžné potřeby je proto zcela postačující měření tlaku vzduchu ve vnějším prostředí v příznivějších provozních podmínkách (viz kapitola o měření vnějšího prostředí).

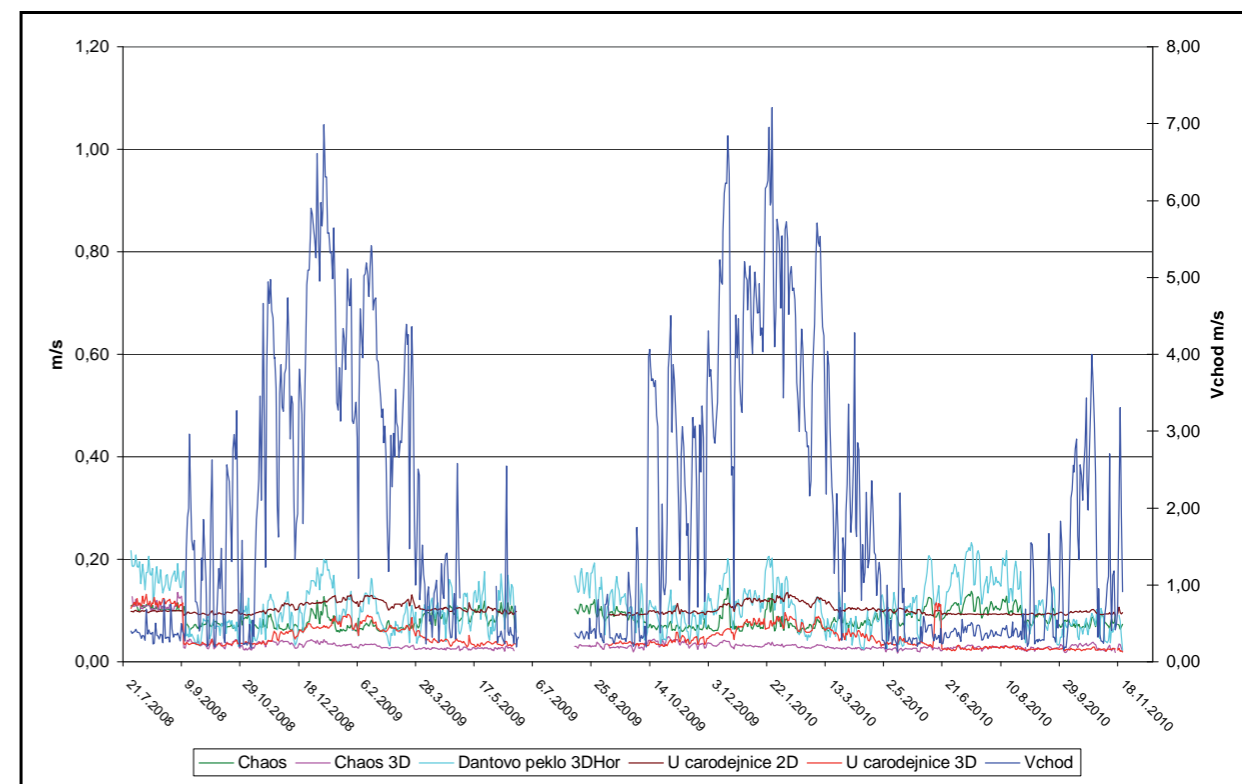
7. Měření proudění vzduchu v jeskyních

Všeobecné požadavky na měření proudění vzduchu:

- a) Rozlišovací schopnost snímače: $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- b) Prahová rychlost: $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.
- c) Přesnost měření: $\pm 2 \%$.
- d) Interval měření: zpřístupněné jeskyně 1 min, nezpřístupněné jeskyně: 10 min.
- e) Interval mezi kalibrací snímačů: 1 rok.

Proudění vzduchu je důležitým indikátorem vyrovnávání termobarických polí v jeskynních systémech a ve vnějším prostředí. Tyto tlakové rozdíly mohou vznikat v důsledku změn vnějšího tlaku vzduchu způsobeného synoptickou situací, anebo změnou znaménka rozdílů teplot mezi vnější atmosférou a jeskyní. V závislosti na velikosti objemu, typu jeskyně a jejím propojení s vnějším prostředím se mění i množství vyměňovaného vzduchu. Rychlost proudění v jeskynních prostorech dosahuje relativně malých hodnot, výjimku tvoří zúžená místa propojující jeskyni s okolím (vstupní chodby, komíny apod.), v nichž se v důsledku uplatnění zákona kontinuity rychlost proudění zvyšuje (obr. 17). Proto je zapotřebí k měření proudění vzduchu v jeskyních používat citlivé přístroje. Miskové anebo vrtulové anemometry mají poměrně vysoký práh citlivosti, tj. počáteční rychlost, při níž dojde k rotaci otočných měřicích částí. Ta se pohybuje u kvalitnějších přístrojů od $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Navíc jeskynní prostředí nesvědčí příliš jemné mechanice otočných částí těchto anemometrů. Proto je nutno používat snímače bez otočných částí, založených na jiných principech.

Pro ambulantní měření lze používat termické anemometry, jejichž princip spočívá v tom, že v měřicí sondě je drátek vyhříván na konstantní teplotu. Prouděním vzduchu se tento drátek ochlazuje, což elektronické obvody anemometru kompenzují zvýšenou dodávkou energie na jeho vyhřívání tak, aby jeho teplota byla konstantní. Množství přidané energie je pak úměrné rychlosti proudění. Anemometry založené na tomto principu umožňují měřit rychlosti proudění již od $0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tyto přístroje jsou určeny pouze pro krátkodobá orientační měření, a nikoliv pro kontinuální záznam, navíc umožňují měřit pouze rychlost proudění, a nikoliv již jeho směr. S jejich pomocí lze v jeskynním systému vytipovat lokality se zvýšenou rychlostí proudění vzduchu a ty pak osadit vhodnými snímači pro dlouhodobá měření.



Obr. 17 Průběh denní průměrné rychlosti proudění vzduchu v Kateřinské jeskyni za období 29. 7. 2008 - 22. 11. 2010.

Mezi nejpoužívanější snímače pro měření rychlosti proudění vzduchu v jeskyních patří ultrasonické anemometry (obr. 18). Neobsahují žádné rotační části a jsou složeny z několika dvojic vysílač – přijímač ultrazvukových vln. Pokud jsou tyto dvojice dvě, umístěné v rovině a navzájem proti sobě otočené o 90° , jedná se o 2D anemometr, umožňující měřit směr a rychlost větru v horizontální rovině, podobně jako klasický anemometr s větrnou směrůvkou a Robinsonovým křížem. Princip měření je přitom poměrně jednoduchý – nejprve se z vysílače na severní straně (N) vyšle ultrazvukový impuls do vysílače na jižní straně (S) a změří se doba od vyslání k zachycení impulsu. Vzápětí se vyšle impuls opačného směru (z S do N) a opět se změří potřebná doba průchodu vzdáleností mezi vysílači a přijímači. V klidném vzduchu jsou obě tyto doby stejné, v proudícím vzduchu se jedna doba zkracuje a druhá prodlužuje, z čehož lze při znalosti vzdálenosti mezi vysílači a přijímači stanovit rychlost proudění v tomto směru. To stejné se zopakuje i pro pár vysílač – přijímač, orientovaný západovýchodním směrem (W – E), čímž se získají dvě rychlosti v navzájem kolmých směrech, z nichž lze již vypočítat vektor proudění (směr a rychlost). Přidáním třetího páru vysílač – přijímač a změnou jejich rozmístění z roviny do prostorového útvaru se získá 3D anemometr, zaznamenávající i vertikální složku proudění vzduchu. To je důležité zejména při měření v prostorných dómech, v nichž proudění nemusí být vždy horizontální, ale může přicházet z libovolného místa v prostoru.

Anemometry se v jeskynním systému instalují na předem vytipovaná místa s charakteristickým režimem proudění, nejlépe do stejné výšky nad povrchem. Jelikož se měří i směr proudění, je nutno při instalaci zjistit pomocí kompasu sever a natočit značku na anemometru do tohoto směru. V průběhu výzkumu byly nejlepší výsledky získány s pomocí anemometrů 3D typu USA-1 německé firmy METEK GmbH. O něco horší výsledky v oblasti nejnižších rychlostí, od 0,01 do 0,05 m/s, jsou získány anemometry firmy Gill Instruments, typu WindMaster (3D) a WindObserver (2D).



Obr. 18 Ukázka umístění 2D sonického anemometru v Kateřinské jeskyni.

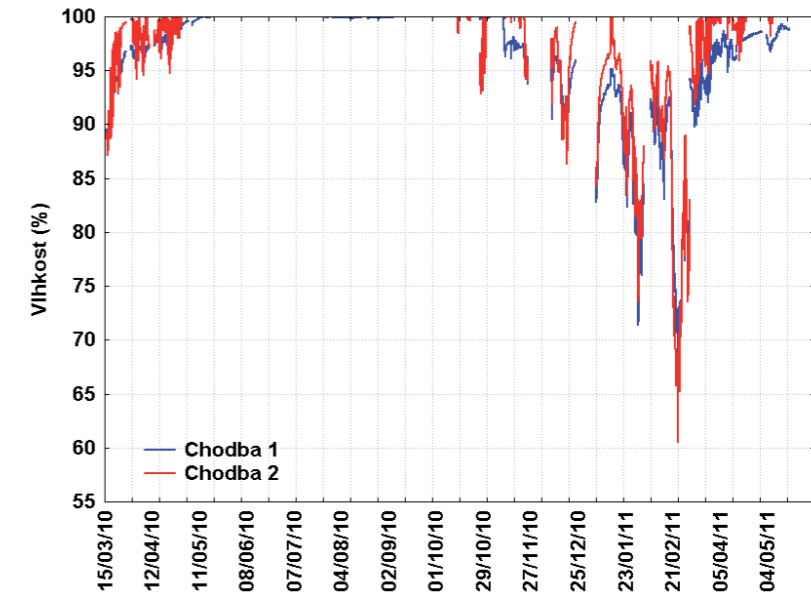
8. Měření vlhkosti vzduchu v jeskyních

Všeobecné požadavky na měření vlhkosti vzduchu:

- a) **Rozlišovací schopnost snímače: 0,1 % relativní vlhkosti.**
- b) **Přesnost měření ± 2 % relativní vlhkosti.**
- c) **Interval měření: zpřístupněné jeskyně 1 min., nezpřístupněné jeskyně max. 1 hod.**
- d) **Interval mezi kalibrací (výměnou) snímačů: 1 rok.**

Odpařováním vody v uzavřeném prostoru dochází postupně ke zvyšování koncentrací vodních par až do okamžiku, kdy dosáhnou stavu nasycení a vzduch již není schopen další páry přijmout. Nejinak je tomu i v jeskynních prostorech a záleží pak již jen na velikosti hladiny vodních ploch a ovlhčených povrchů ve vztahu k ventilaci daného prostoru, aby bylo dosaženo konkrétního stavu nasycení vodními parami. Pro jeskyně jsou proto typické poměrně vysoké hodnoty relativních vlhkostí vzduchu (relativní vlhkost – poměr mezi skutečným obsahem vodní páry ve vzduchu a obsahem maximálně možným při dané teplotě, vyjádřený v procentech), avšak i zde se najdou rozdíly. Téměř 100 % vlhkost vzduchu se trvale vyskytuje ve vnitřních částech jeskyní s vlhkými stěnami (typické krápníkové jeskyně)

a omezenou výměnou vzduchu. Ve vstupních chodbách a dalších místech, kde je zvýšená výměna vzduchu s venkovním prostředím, jsou tyto vlhkosti nižší a vykazují vyšší dynamiku. Popsaná situace byla zjištěna např. monitoringem relativní vlhkosti vzduchu v Kateřinské jeskyni v letech 2010 a 2011. Dynamika relativní vlhkosti vzduchu byla zjištěna pouze ve vstupní chodbě během chladné části roku (obr. 19). Vlhkostní čidla ve zbývajících prostorách jeskyně vykazovala trvale 100 % relativní vlhkost vzduchu.



Obr. 19 Dynamika relativní vlhkosti vzduchu ve vstupní části Kateřinské jeskyně.

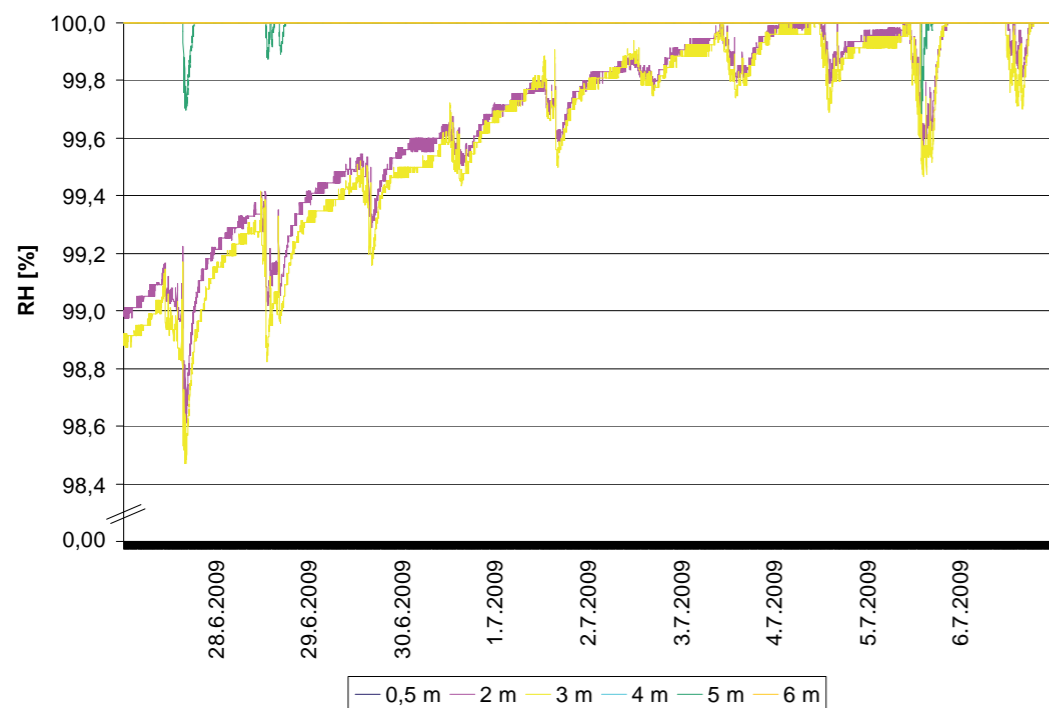
Na území ČR se nachází i jeskyně, v nichž nejsou stěny trvale ovlhčeny (např. jeskyně Na Turoldu), relativní vlhkost je v nich nižší a většinou nedosahuje stavu nasycení po delší dobu, neboť zdrojem vodních par jsou pouze vodní plochy.

Měření vlhkostí vzduchu v jeskyních je poměrně náročné, zejména v těch případech, kdy má jít o dlouhodobé monitorování v těch částech, v nichž se trvale vyskytuje vysoká vlhkost blízka stavu nasycení. Většina používaných metod při vysokých vlhkostech (nad 95 %) již vykazuje menší přesnost, snižující se při dlouhodobé expozici v tomto prostředí. Proto je třeba při výběru metody k měření v daném prostoru vzít v úvahu, nakolik jsou přesné údaje z těchto prostor pro daný záměr důležité a zda-li není postačující zjištění skutečnosti, že v daném prostoru se vlhkost vzduchu trvale pohybuje např. v rozmezí 98 – 100 %. Z obr. 20 je však zřejmé, že i s použitím kapacitního snímače lze zachytit jemné fluktuace vlhkosti vzduchu i v blízkosti stavu nasycení.

Pro většinu případů, kdy je nutno měřit vlhkost vzduchu v prostorech, v nichž nedosahuje trvale stavu nasycení, jsou postačující snímače založené na kapacitním principu. Ten spočívá v tom, že snímač tvoří kondenzátor, jehož dielektrikem je tenká vrstvička materiálu vratně

sorbujícího vlhkost z prostředí. Dielektrikum je film polymeru nebo kovového oxidu. Jedna z elektrod je děrovaná, umožňující okolnímu vzduchu kontakt s dielektrickým filmem. Přestože je množství absorbované vody poměrně malé, díky její velké dielektrické konstantě jsou změny kapacity měřitelné: řádově činí 0,1 % z celkové kapacity na každé % relativní vlhkosti. Kapacitní senzory se vyznačují malou závislostí údaje na teplotě, odolností vůči kondenzaci, dobou odezvy řádu desítek sekund, přesností v jednotkách % relativní vlhkosti, malými rozměry a v neposlední řadě nízkou cenou. Navzdory proklamovaným tvrzením výrobců o dlouhodobé časové stálosti a životnosti těchto senzorů naše praxe ukazuje, že v podmínkách, v nichž vlhkost vzduchu alespoň občas dosahuje stavu nasycení, dochází u používaného dielektrika postupně k nevratným změnám, vedoucím ke snížení citlivosti snímače až k jeho úplnému znehodnocení. Proto platí zásada, že čím je měřené prostředí vlhčí, tím častěji je nutné provádět kalibrace, popřípadě výměnu senzoru za nový, pokud mají být údaje o vlhkosti spolehlivé. Ve venkovním prostředí je životnost těchto snímačů odhadována přibližně na dobu 3 roky, ve vnitřním prostředí jeskyní doporučujeme jejich každoroční výměnu. Senzory nabízející větší přesnost v pásmu od 95 do 100 % vlhkosti (např. výrobky firem Rotronic a Vaisala) jsou obvykle dražší a navíc ani jejich konstrukce se nevyrovnává s problémem kondenzace. Řešením mohou být psychrometrické přístroje s nucenou ventilací měřicí hlavice, ačkoliv ani ony nejsou využitelné v plném rozsahu, a to zejména s ohledem na rychlé mechanické opotřebování ventilátoru.

Vlhkost vzduchu doporučujeme měřit současně s teplotou pro případné korekce.



Obr. 20 Vlhkost vzduchu v Kateřinské jeskyni (27. 6. - 6. 7. 2009) – vertikální profil.

9. Měření meteorologických parametrů vnějšího prostředí

Měření vybraných parametrů vnějšího prostředí je nedílnou součástí monitoringu mikroklimatu jeskyní. Vnější podmínky působí prostřednictvím kondukce a výměny vzduchu na dynamiku jednotlivých parametrů vnitřní atmosféry. Proto je nutno současně s měřením uvnitř jeskyní vybudovat nejméně jednu, lépe však celou síť meteorologických stanic, rozmístěných v členitém krasovém reliéfu a měřících potřebné prvky. Při vytvoření sítě více stanic se tak současně získají i poznatky o jednotlivých složkách topoklimatu daného území.

Při umísťování stanic je zapotřebí vybrat taková místa, která jsou typická pro příslušný tvar reliéfu (žleb, náhorní rovina, údolí apod.), popřípadě se nacházejí v blízkosti monitorované jeskyně. Velká rozmanitost terénních útvarů v krasovém území vede v některých případech rovněž i ke značným rozdílům v měřených meteorologických prvcích a jejich dynamice.

V ojedinělých případech, kdy je předmětem zájmu pouze jeden prvek (např. teplota, popř. i vlhkost vzduchu), je možno instalovat na dané místo pouze malý registrátor („datalogger“), zaznamenávající tyto veličiny.

Jelikož většina měřených prvků vykazuje změny s nadmořskou výškou, je důležité po instalaci měřicích systémů zaznamenat nejen jejich přesnou geografickou polohu, ale též i nadmořskou výšku.

9.1. Měření teploty vzduchu vnějšího prostředí

Všeobecné požadavky na měření teploty vnějšího vzduchu:

a) Rozlišovací schopnost snímače: 0,1 °C.

b) Přesnost měření: ± 0,2 °C.

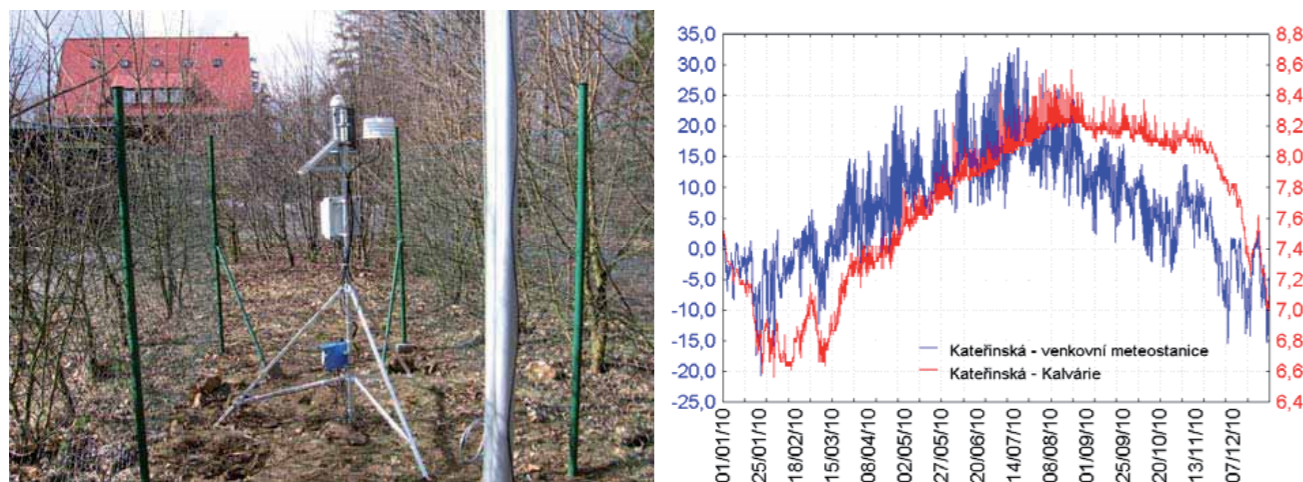
c) Interval měření: 10 min.

d) Interval mezi kalibrací snímačů: 2 roky.

Pro kvantifikaci vlivu vnějšího klimatu na teplotní poměry jeskyně je nezbytný monitoring teploty vně monitorovaných jeskynních prostor. S ohledem na specifika krasových území optimální lokalizace měřicího zařízení dle standardů ČHMÚ pro zakládání a provoz meteorologických stanic není. Respektovány by měly být místní poměry a podmínky (obr. 21) a čidla umístěna na mikroklimaticky reprezentativní místa (bez případných vlivů staveb, zdrojů tepla apod.).

S ohledem na dynamiku teplot až desítek °C v průběhu dne či v kratším časovém horizontu (obr. 22) lze ideálně doporučit desetiminutový interval měření teplot vzduchu. Jsou tak

zaznamenány výkyvy i extrémy vnějších teplot, které mají výrazně dynamičtější charakter než v uzavřených jeskynních systémech. Navíc hodnoty v 10minutovém intervalu lze srovnat s výstupy z měření okolních klimatologických stanic ČHMÚ, kde monitoring teploty probíhá právě v desetiminutovém intervalu. Pokud není měření teploty vzduchu součástí komplexnějších měření pomocí meteorologické stanice, jsou vhodným zařízením pro uvedené účely outdoorová čidla s dataloggerem s vlastním zdrojem energie s rozlišením měření minimálně 0,1 °C. V současnosti jsou uvedené přístroje cenově dostupné, uživatelsky přívětivé a jejich použití se tak jeví jako bezproblémové.



Obr. 21 (vlevo) Venkovní meteostanice v podmínkách reprezentujících mikroklima prostředí.
Obr. 22 (vpravo) Průběh teploty vzduchu v interiéru a exteriéru Kateřinské jeskyně v roce 2010.

Ať je již k měření teploty venkovního vzduchu použit samostatný datalogger anebo je součástí měření v rámci souboru přístrojů meteorologické stanice, vždy musí být snímač umístěn v radiačním stínítku, kde je chráněn před přímým dopadem slunečních paprsků, dešťových srážek, ale současně je zajištěno volné proudění vzduchu.

9.2. Měření vlhkosti vzduchu vnějšího prostředí

Všeobecné požadavky na měření vlhkosti vzduchu:

- Rozlišovací schopnost snímače: 0,5 % relativní vlhkosti.**
- Přesnost měření ± 2 % relativní vlhkosti.**
- Interval měření: 10 min.**
- Interval mezi kalibrací (výměnou) snímačů: 2 roky.**

Ve vnějším prostředí relativní vlhkost vzduchu kolísá v podstatně větší míře než uvnitř jeskyní. V nočních a ranních hodinách se za příznivých situací přibližuje hodnotě 100 %, nejnižší hodnoty, kolem 30 %, bývají zaznamenávány v jarním období při výraznějších vzestupech teplot v průběhu dne. Dynamika změn v průběhu dne i v delším časovém horizontu úzce souvisí s dostupností vody k vypařování, energetickou bilancí a výměnou vzduchových hmot v dané lokalitě. V úzkých zastíněných žlebech, protékáných krasovými toky, jsou tyto změny menší a jsou zde dosahovány vyšší hodnoty vlhkosti vzduchu oproti krasovým plošinám, popřípadě širším údolím.

Pro měření vlhkosti vzduchu vnějšího prostředí lze bez problémů s dostatečnou přesností použít běžně dostupné kapacitní snímače. Pouze v extrémnějších případech, kdy jsou zaznamenávány déle trvající epizody vyšších hodnot (při měření ve žlebech, na dně propastí apod.) doporučujeme, pokud má být měření spolehlivé, častější výměnu a kalibraci než jsou uváděné dva roky.

Podobně jako při měření teploty vzduchu je nutno snímač opatřit vhodným stínítkem proti slunečnímu záření a vertikálním srážkám.

9.3. Měření atmosférických srážek

Všeobecné požadavky na měření atmosférických srážek:

- Rozlišovací schopnost snímače: 0,3 mm.**
- Přesnost měření ± 10 %.**
- Interval měření: 10 min.**
- Interval mezi kalibrací snímačů: 2 roky.**

Atmosférické srážky hrají významnou úlohu při vzniku a vývoji celého krasu a krápníkové výzdoby jednotlivých jeskyní. Zasakující srážková voda po nasycení oxidem uhličitým, obsaženým v půdě, rozpouští uhličitán vápenatý v krasových horninách a opětovně jej za příhodných podmínek vylučuje uvnitř jeskynních prostor. Při značné propustnosti zvětralých krasových hornin výraznější srážky velmi rychle zvedají hladiny v podzemních tocích a v závislosti na ročním období mění rychle jejich teplotu, což se může v některých případech projevit i v teplotě vzduchu uvnitř jeskyně. Jelikož zejména v letním období je plošně rozdělení srážek značně nerovnoměrné, je vhodné instalovat více měřicích míst na celém povodí zkoumaných krasových toků. K poznání všech těchto vzájemných souvislostí je zapotřebí mít k dispozici údaje o velikosti i podrobnějším časovém výskytu jednotlivých

srážkových epizod. Doporučovaný časový interval měření 10 minut umožňuje stanovovat i intenzitu deště využitelnou při těchto studiích.

Pro měření srážek k výše popsaným účelům plně postačují člunkové srážkoměry, v nichž přitékající srážková voda z nálevky postupně naplňuje člunek. Jakmile toto množství dosáhne určité velikosti, dojde k překlopení člunku a jeho vyprázdnění, přičemž se sepne kontakt a vyšle impuls do záznamové jednotky. Počet těchto impulsů za časovou jednotku po vynásobení množstvím srážek, potřebných k překlopení člunku, udává jejich celkové množství.

V zimním období při poklesu teploty pod bod mrazu tyto srážkoměry bez instalace vytápění neměří, možnost vytápění je limitována dostupností přívodu el. energie z rozvodné sítě.

Provoz člunkových srážkoměrů vyžaduje pravidelné čištění zachytné plochy i dalších případných sítěk umístěných v cestě ke člunku. Rovněž nečistoty, usazené v člunku, zvyšují jeho hmotnost a tím vnášejí systematickou chybu do měření. Doporučená perioda čištění se velmi různí v závislosti na ročním období (pyl z okolních stromů na jaře, spadané listí na podzim) a na okolním prostředí (prašné cesty, okolní stromy apod.).

9.4. Měření tlaku vzduchu

Všeobecné požadavky na měření tlaku vzduchu:

- a) Rozlišovací schopnost snímače: 0,1 hPa.
- b) Přesnost měření $\pm 2 \%$ hPa.
- c) Interval měření: 10 min.
- d) Interval mezi kalibrací snímačů: 2 roky.

Tlak vzduchu hraje důležitou roli při ventilaci jeskynních systémů. Tyto systémy jsou prostřednictvím nejrůznějších otvorů propojeny s okolní atmosférou, a tak dochází většinou k poměrně rychlému vyrovnání tlaků v jeskyni a venkovním prostředí za vzniku proudění vzduchu. Proto je postačující měření tlaku vzduchu vně jeskyní, kde nejsou natolik extrémní podmínky. Při vzniku těchto proudění je důležitější než sama absolutní velikost tlaku vzduchu jeho časová změna. Proto je zapotřebí tlak měřit a registrovat poměrně často, nejlépe v uvedeném desetiminutovém intervalu, aby bylo možno postihnout i lokální krátkodobé změny, vznikající při přechodu jednotlivých frontálních systémů, popřípadě při bouřkové činnosti.

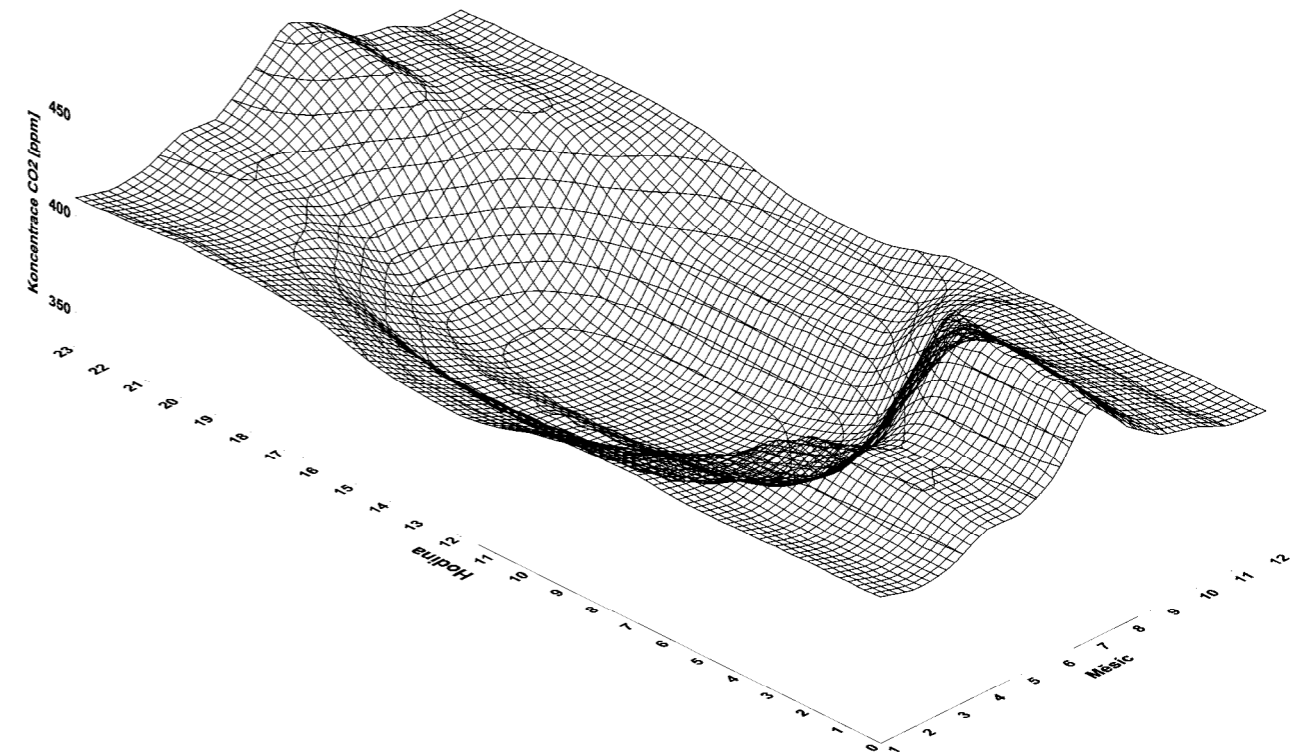
K měření tlaku vzduchu existuje dnes již celá řada elektronických snímačů založených na nejrůznějších principech. Musí se jednat o snímače měřící absolutní tlak, tzn. že obsahují vakuovanou komůrku uzavřenou pružnou membránou, jejíž průhyb je převáděn vhodnou metodou na některou z elektrických veličin. Pokud není snímač tlaku vzduchu součástí systémů meteorologických stanic, existují i záznamníky tlaku vzduchu určené pro vnitřní prostředí, které je nutno umístit v místnosti nedaleko sledované jeskyně.

9.5. Měření koncentrací CO₂ ve vnějším prostředí

Všeobecné požadavky na měření koncentrace CO₂:

- a) Rozlišovací schopnost snímače: 1 ppm.
- b) Přesnost měření: ± 3 ppm.
- c) Interval měření: 10 min.
- d) Interval mezi kalibrací snímačů: 2 roky.

Aby bylo možno porovnávat koncentrace CO₂ v jeskyních s koncentracemi ve vnější atmosféře, je nutno provádět i jeho měření na povrchu. Koncentrace CO₂ ve vnějším prostředí dosahují předvídatelných koncentrací a většinou se pohybují v rozmezí 250 – 600 ppm (obr. 23). Největší proměnlivost je zaznamenávána v letním období, kdy v období maximální



Obr. 23 Průměrný denní a roční chod koncentrací CO₂ ve Sloupu v Moravském krasu.

fotosyntézy v poledních hodinách koncentrace dosahují minimálních hodnot, naproti tomu maximální koncentrace se vyskytují v období východu Slunce, kdy dochází k největšímu nahromadění produktů respirace v přízemní atmosféře.

Vzhledem k relativně nízkým koncentracím oproti jeskynnímu prostředí a relativně malému kolísání je zapotřebí pro monitorování vnějších koncentrací CO₂ používat přesnější a citlivější snímače (obr. 24). Jsou opět založeny na měření absorpce infračerveného záření při průchodu daným prostředím s obsahem CO₂. Snímače je nutno umísťovat do standardní výšky 2 m nad terénem, kde již převládá turbulentní proudění a koncentrace CO₂ jsou rovnoměrnější oproti poměrům těsně při zemi.



Obr. 24 Snímač koncentrací CO₂ od firmy Vaisala, chráněný před povětrnostními vlivy stříškou z nerezového plechu.

10. Sběr a analýza dat

Analýza dat z monitorovacích systémů instalovaných v Punkevních jeskyních a v Kateřinské jeskyni potvrdila, že optimálním intervalem pro většinu mikroklimatických měření ve zpřístupněných jeskyních je měření v minutovém intervalu. V jeskyních nezpřístupněných může být interval delší – 10, 15, 30 nebo maximálně 60 minut.

Shromažďování dat by mělo být prováděno na základě databázového systému (komerčního např. „Oracle Database“ nebo „open source“ např. „MySQL“, „PostgreSQL“), instalovaného v centrálním počítači (sběr dat pomocí přenosových kabelů nebo wifi - v případě počítače instalovaného u jeskyně nebo posílání dat přes internet - v případě počítače lokalizovaného ve větší vzdálenosti od jeskyně). Navíc je vhodné, aby každé stanoviště disponovalo nezávislým paměťovým modulem o kapacitě umožňující minimálně měsíční samostatnou registraci. Tato varianta je velmi důležitá v případě problémů s přenosem dat přes internet,

poruch centrálního počítače, poruch integrity sítě apod. Pro menší objemy naměřených dat (zejména z outdoorových čidel s dataloggerem a s vlastním zdrojem energie) je možné použít pro jejich zpracování i aplikaci MS Excel nebo podobné aplikace.

V případě integrované sítě by měl být zápis dat z měřicích stanovišť na server prováděn tak často, jak jen to umožňují parametry komunikačních zařízení (optimálně po každém minutovém měření). V případě sítě využívající nezávislá čidla je nutné importovat data do databáze okamžitě po jejich odečtení z loggerů.

Data by měla být uložena v databázi ve formě rekordů, zahrnujících všechny měřené veličiny a datum a čas pro každé měření. Kromě zápisu v databázi by data měla být uložena ve formě záložních kopií – nejlépe v jednotlivých textových souborech, zahrnujících např. výsledky registrace z jednoho dne. Zkušenost ukazuje, že tento formát náhradních kopií značně usnadňuje kopírování, přenos a opětovnou integraci dat v případě poruchy (důležitá je především malá velikost textových souborů a jednoduchost importu do všech programů sloužících pro zpracování a správu dat).

Interface databáze by měl umožňovat oprávněným uživatelům přístup online. Měl by také nabízet možnost grafického a textového prohlížení všech naměřených veličin jak běžících, tak také archiválních. Volitelný interface může rovněž nabízet funkce základní agregace dat (především hodinové, denní, měsíční a roční průměry, extrémy, četnosti aj.) a zápis či export výsledků agregace a surových dat. Vhodná je rovněž funkce umožňující opravu dat (odstraňování chybných výsledků, uvádění korekčních koeficientů apod.). V případě použití této funkce je třeba zajistit, aby opravená data byla uložena v odlišné databázi nebo tabulce a nenahrazovala naměřená data.

Základním obdobím, pro které se provádí zpracování, agregace a analýza materiálů, by měl být hydrologický rok (období od začátku listopadu do konce října následujícího roku), nebo období od prosince (začátek klimatologické zimy) do listopadu (konec klimatologického podzimu). S přihlédnutím k výrazné sezónní proměnlivosti mikroklimatu jeskyní a k silné závislosti stavu atmosféry jeskyně v daném čase na dřívější situace mohou analýzy provedené pro kalendářní rok zkreslovat skutečné vztahy v mikroklimatickém prostředí jeskyně a vést k falešným závěrům. Příkladem mohou být výpočty průměrné roční teploty vzduchu v jeskyni. Tato veličina, vypočítaná pro hydrologický rok, ilustruje vztahy mezi zimním vychlazením jeskyně a jejím letním oteplením a je podstatným indexem pro hodnocení energetické bilance jeskyně v měřítku analyzovaného období. V případě výpočtů provedených pro kalendářní rok není získání takové informace možné (průměr ovlivňují data ze dvou po sobě následujících sezón).

11. Možnosti aplikace metodiky

Možnosti aplikace metodiky jsou uvedeny v následující tabulce:

Měřená veličina	Metody měření	Získané informace	Interpretační možnosti a aplikace výsledků
Teplota vzduchu a jiných složek jeskynního prostředí (vody, skalní stěny aj.)	Orientační měření Základní monitoring	Poznání termických podmínek v jeskyni (průměrná teplota, amplituda teploty, prostorové rozložení teploty v horizontálních profilech, vertikální stratifikace termické atmosféry jeskyně); Zjištění dynamiky změn teploty v jeskyni (sezónní změny, denní rytmus, jiné neperiodické změny)	Hodnocení směru toku energie mezi jednotlivými komponenty jeskynního prostředí; Hodnocení energetické bilance jeskyně; Vyznačení mikroklimatických zón jeskyně; Hodnocení antropogenního vlivu na termické podmínky v jeskyni (vliv turistického provozu, vliv změn v morfologii jeskyně – např. zpřístupňovací práce); Nepřímá interpretace dynamiky výměny vzduchu a změn vlhkostních parametrů vzduchu v jeskyni; Vstupní data pro modelování termických podmínek a jiných mikroklimatických charakteristik v jeskynních a jiných podzemních systémech
Pohyb vzduchu	Orientační měření Základní monitoring	Zjištění rychlosti proudění vzduchu v jeskyni; Identifikace cest proudění vzduchu v jeskyni, zejména v kontextu výměny vzduchu v soustavě jeskyně – okolí; Zjištění strukturální diferenciace proudění vzduchu ve vertikálních profilech domů a chodeb; Zjištění procesů toku vzdušných mas v izolovaných částech jeskyně (mimo oblast cirkulační výměny vzduchu mezi jeskyní a jejím okolím)	Popis cirkulačního mechanismu jeskyně; Popis necirkulačních činitelů, ovlivňujících proudění vzduchu v jeskyni (svázaných např. s procesy výměny energie v jeskynním prostředí); Popis energetické bilance; Hodnocení antropogenního vlivu na proces ventilace jeskyně (týká se především následků morfologických změn, způsobených zpřístupňovacími pracemi); Hodnocení intenzity procesů ventilace jeskyně; Vstupní data pro modelování termických podmínek a jiných mikroklimatických charakteristik v jeskynních a jiných podzemních systémech; Informace o charakteru ventilačních procesů v jeskyni mohou být využity pro zpracování posudků spojených s bezpečností práce v přírodních a umělých podzemních systémech
Vlhkostní parametry vzduchu	Orientační měření Základní monitoring	Zjištění vlhkostních podmínek v jeskyni (relativní vlhkost, obsah vodní páry ve vzduchu, rosný bod); Zjištění prostorové diferenciace vlhkostních podmínek v jeskyni; Zjištění dynamiky změn vlhkostních podmínek v jeskyni.	Vyznačení mikroklimatických zón jeskyně; Stanovení závěrů ohledně procesů množství a intenzity výparu a kondenzace uvnitř jeskyně; Hodnocení dodávky latentního tepla do klimatického systému jeskyně (energetická bilance jeskyně); Vstupní data pro modelování mikroklimatických charakteristik v jeskynních a jiných podzemních systémech

Složení vzduchu	Orientační měření Základní monitoring	Zjištění kvantitativních a kvalitativních charakteristik složení jeskynního vzduchu; Zjištění dynamiky změn složení jeskynního vzduchu; Zjištění prostorové diferenciace složení jeskynního vzduchu.	Hodnocení antropogenního vlivu na prostředí jeskyně (dodávka antropogenního CO ₂); Monitoring stupně ohrožení lidí zdržujících se v podzemním systému (detekce zvýšené koncentrace radonu, CO ₂ a další); Nepřímé posouzení dynamiky procesu ventilace jeskyně; Stanovení koeficientu ventilace jeskyně
Tlak vzduchu	Orientační měření Základní monitoring	Stanovení barických podmínek uvnitř jeskyně; Stanovení barického gradientu v sestavě jeskyně – okolí	Stanovení závěrů o směru a intenzitě výměny vzduchu v sestavě jeskyně – okolí (týká se především barometrických jeskyní); Vstupní data pro ventilační modely jeskyně
Složení speleo-aerosolu	Mobilní měření Periodická měření	Rozpoznání kvantitativních a kvalitativních charakteristik složení jeskynního vzduchu; Zjištění změn dynamiky složení jeskynního vzduchu; Zjištění prostorové diferenciace složení jeskynního vzduchu	Stanovení parametrů kvality vzduchu pro speleoterapeutické účely; Stanovení antropogenního vlivu (zavlečení tuhých částic) na jeskynní ekosystém a podmínky zachování památkových objektů uvnitř jeskyně (např. malby na skalách, archeologické svědectví apod.)
Intenzita výparu, kondenzace, sublimace a resublimace (v ledových jeskyních)	Periodická měření (často v rámci základního monitoringu)	Zjištění rychlosti a množství výparu a kondenzace v jeskyni; Zjištění prostorové diferenciace intenzity procesů výparu a kondenzace v jeskyni; Zjištění dynamiky procesů výparu a kondenzace v jeskyni	Stanovení dodávky latentního tepla do klimatického systému jeskyně (energetická bilance jeskyně); Stanovení intenzity koroze krápníkové výzdoby; Stanovení antropogenního vlivu na jeskynní ekosystém (vliv vodní páry z lidského dechu a přísun tepla spojeného s turistickým provozem)
Průtok nebo výška hladiny vody v podzemních tocích	Periodická měření Základní monitoring	Zjištění rozsahu změn kolísání výšky hladiny jeskynních vod; Stanovení dynamiky změn výšky hladiny a průtoku jeskynních vod	Stanovení reakce jeskynního mikroklimatického systému na změny výšky hladiny jeskynních vod a rychlosti průtoku vody (např. změny termických podmínek, změny průběhu výměny vzduchu, změny složení vzduchu); Stanovení energetické bilance jeskyně (přísun tepla z tekoucí vody); Zpracování charakteristik hydrologického systému jeskyně; Zajištění bezpečnostních podmínek pro jeskyni (např. včasné varování před záplavami)
Tempo přírůstku a ubývání jeskynního ledu	Periodická měření (často v rámci základního monitoringu)	Zjištění dynamiky a množství přírůstku a ubývání jeskynního ledu; Zjištění prostorové diferenciace přírůstku a ubývání ledu v oblasti jeskyně	Vyznačení klimaticko-ledových zón v jeskyních s ledovou výplní (zóna s ledem po celý rok, zóna se sezónním ledem, zóna epizodického výskytu ledových forem); Stanovení bilance masy jeskynního ledu; Stanovení energetické bilance jeskyně (příchod tepla fázových přeměn)

12. Literatura

- Hájek, L., Fastej, P. (1977): Důlní záchranářství, SNTL, Praha.
- Jakál, J. a kol. (1982): Praktická speleologie, Osveta, Martin.
- Musil, R. a kol. (1993): Moravský kras - labyrinty poznání, Mavel, Brno.
- Quitt, E. (1982): Mikroklimatické poměry jeskyní Moravského krasu, Československý kras 32, Academia, Praha.
- Hebelka, J. (1995): Metodika jednotného monitorování zpřístupněných jeskyní 1. část - monitoring mikroklimatických poměrů, AOPK ČR Praha.

Summary

The methodology for monitoring of microclimatic conditions in cave systems is an output solution of project SP/2D5/5/07 "Determination of cave microclimate depending on external weather conditions in CR show caves" of the resort research program under the competence of the Ministry of the Environment, which was realized in the Moravian Karst caves between 2007 – 2011. The methodology includes three types of cave microclimate monitoring that logically follow each other in terms of their realization - from the simplest preliminary measurements, through basic monitoring to the most demanding scientific monitoring.

The methodology defines rules for stratification of the selection and location of reference measurement sites, rules for monitoring of basic microclimatic elements, such as: air temperature, relative air humidity, speed and direction of air movement and other quantities (concentration of gaseous components of the cave air - namely the concentration of CO₂, rock massif temperature and atmospheric air pressure) and rules for data collection and analysis. The methodology solves and measures meteorological parameters of the external environment as well. It also includes the application options. Knowledge of microclimatic conditions in caves is crucial not only for solving the question of Karst origin but mainly to determine the optimum conditions to protect and scientifically manage the caves. Monitoring of the microclimatic mode is especially important in publicly available caves due to their protection and also to ensure the safety of cave visitors and staff.

Metodika monitoringu mikroklimatických poměrů v jeskynních systémech

Autoři: Jiří Hebelka, RNDr. Tomáš Litschmann, Mgr. Magdalena Korzystka,
Dr. Jacek Piasecki, RNDr. Ing. Jaroslav Rožnovský, CSc., PhD.,
Mgr. Tymoteusz Sawiński, Ing. Tomáš Středa, Ph.D., Ing. Hana Středová, Ph.D.

Vydala: Správa jeskyní České republiky v roce 2011
Květnové náměstí 3,
252 43 Průhonice

ISBN: 978-80-87309-25-4

Kontakt na autory:
roznovsky@chmi.cz,
hebelka@caves.cz