

SPELEOLOGIE / SPELEOLOGY

Studium mikroklimatických změn v jeskyních na Paní hoře
v Českém krasuStudy of microclimatic changes in caves of Paní hora Hill
in the Bohemian KarstMichal Kolčava ^{1,*}, Petr Vodička ^{1,2}, Lenka Thinová ³

0. Abstract

Measurements of temperatures, CO₂ concentrations and radon levels were performed within the study of microclimatic changes in the Arnoldka and Čerínka caves, located at Paní hora Hill in the Bohemian Karst. The first stage of temperature measurements was carried out at 5 locations (3 in Arnoldka and 2 in Čerínka) using automated temperature counters (an accuracy of 0.35 °C) during years 2008–2010. Based on experience from the first stage of measurements, eight intensive seasonal measurement campaigns of temperature (accuracy of 0.1 °C) and CO₂ levels were provided at over 50 selected locations (a total for both caves) from March 2013 to January 2015.

Radon levels in cave air and mass activities of natural radionuclides in sediment samples were measured episodically during years 2008 and 2014. Thanks to the collected set of data we obtained comprehensive knowledge of the gradient of temperatures and CO₂ concentrations in the caves in different seasons, which allowed a more detailed view on annual microclimatic changes which take place in the Arnoldka and Čerínka caves.

1. Úvod

1.1. Jeskyně na Paní hoře

Návrší Paní hora (tvary v mapě stabilního katastru: Panj Hora, na panj Hore, na panj Hoře; občasný tvar: Pání hora) leží na rozhraní k. ú. Bubovice a Kozolupy 800 m jiz. od Bubovic v Českém krasu. Je budováno spodnosedonskými vápenci o sklonu vrstev 30–40° k SSZ. V roce 1958 byl ve vrcholové plošině návrší založen jámový etážový lom Čerínka (PŘIBIL 1999), v němž byly postupně objeveny dutiny krasového původu. Řada z nich byla v dalších letech odtěžena nebo zasypána. Do současnosti ale zůstaly zachovány dvě nejrozsáhlejší. Jsou to propastovitá jeskyně Čerínka (též Palachova propast, Propast Na Čerince; nadmořská výška vchodu 399,92 m.; ev. číslo 24-020; objevena na 2. etáži lomu dne 9. února 1969) a o 216 m dále k VSV propastovitá jeskyně Arnoldka (objevný vchod v nadmořské výšce 375,21 m; novější horní vchod v nadmořské výš-



Obr. 1. Jezerní dóm v Arnoldce. Hladina vody znemožňovala plánované měření v nejnižších částech jeskyně, které byly po celou dobu zatopené. Foto Petr Vodička, 11. října 2014.

Fig. 1. Jezerní dóm (the Lake Dome) in the Arnoldka Cave. The water level did not permit to take planned measurements in the lowermost parts of the cave that were flooded all the time. Photo by P. Vodička, October 11, 2014.

¹ Česká speleologická společnost, ZO 1-05 Geospeleos,

* Na Dlouhém lánu 63, 160 00 Praha 6; mayk@atlas.cz

² Ústav chemických procesů AV ČR, v. v. i., Rozvojová 135, 165 02 Praha 6; vodička@icpf.cas.cz

³ Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská ČVUT v Praze, Břehová 7, 115 19 Praha 1; thinova@fjfi.cvut.cz

Poděkování: Tato práce by nevznikla bez dalších členů základního týmu jmenovitě: Jakub Kerhat, Lukáš Němeček, Patrik Večeřa, Jan Voráček a Ivo Záruba. Za pomoc při měřeních v jeskyních děkujeme členům a sympatizantům klubu Geospeleos a dalších ZO ČSS: Radimu Bromovi, Liboru Čadovi, Lukášovi Falteiskovi, Tadeášovi, Tomášovi a Tereze Francovým, Jiřimu Hrdličkovi, Radku Hrubému, Pavlu Chrobokovi, Karlu Křtěnovi, Vladimíru Liptákov, Josefu Lohovi, Otě Makešovi, Marii Mikšaníkové, Adéle Navrátilové, Bohdanu Ninadovičovi, Petru Pompo Novákovi, Lence Podracké, Blance Pokorné, Janu Pospíšilovi, Davidu Procházce, Danielu Šárochovi, Márii Šoltesové, Jiřimu Štěpánkovi, Ondřejovi Tesařovi, Janě Urbánkové, Heleně Wieserové a Jeronýmu, Martinu a Ireně Zapletalovým.

Speciální poděkování pak patří Karlu Žákovi, Václavu Štěpánovi, Barboře Šimečkové a in memoriam Robertu Švajdovi za zapůjčky přístrojů a velmi cenné konzultace. Za poskytnutí teplotních dat z meteorologické stanice Chrustenice–Na Radosti děkujeme Karlu Streitovi z Chrustenic.

Práce probíhala jako volnočasová aktivita členů České speleologické společnosti.

Český kras (Beroun), XLI (2015), 20–42, 5 tab., 17 obr.

© Muzeum Českého krasu, p. o., Beroun

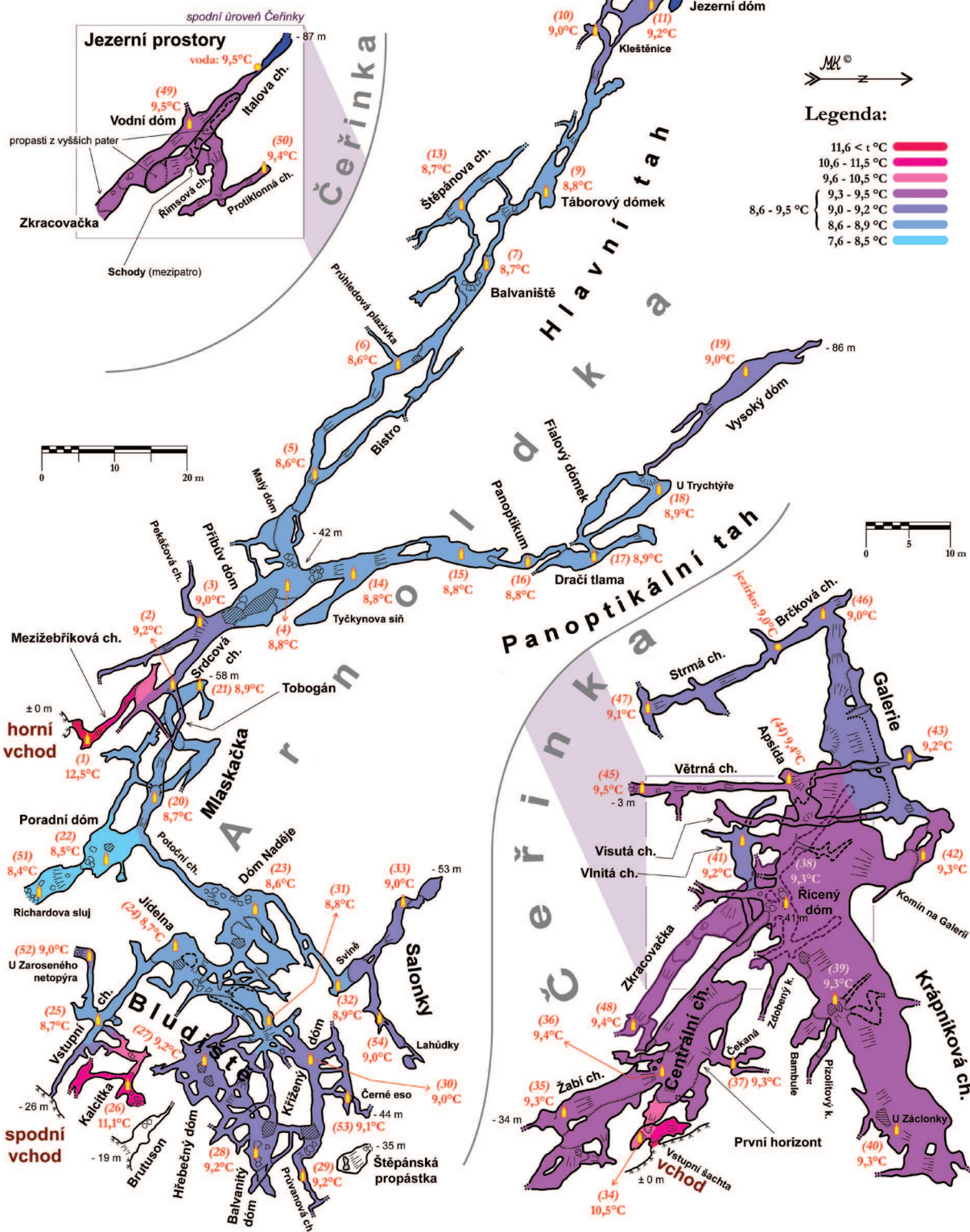
ISSN 1211-1643

ISBN 978-80-87708-07-1

ARNOLDKA + ČEŘINKA

TEPLOTA VZDUCHU DNE 11.10.2014

PŮDORYS



Obr. 2. Půdorysné schéma jeskyní Arnoldka a Čeřinka s vyznačením měřených stanovišť a výsledných hodnot teplot vzduchu sedmé sady měření ze dne 11. října 2014. Rozdíly vyznačuje barevné odstupňování.

Fig. 2. A schematic plan view of the Arnoldka and Čeřinka caves showing the measurement sites and the resulting values of temperature measurements from October 11, 2014 (seventh set). Differences are distinguished by a color gradient.

ce 401,63 m; ev. číslo 24-026; objevena 17. června 1972 na 4. etáži). Charakter jeskyní je v některých rysech podobný. *Čeřinka* je tvořena strmě klesajícími chodbami a propastmi v loděnických, sliveneckých, koněpruských a kotýzských vápencích ukončenými v nejnižším místě kolísajícím jezerem. Svrchní prostory jeskyně se naopak blíží k povrchu vrcholové plošiny. Celková délka chodeb činí 630 m, hloubka 87 m. *Arnoldka* je tvořena dvěma paralelními větvemi (*Hlavní* a *Panoptikální* tab) klesajícími po vrstevnatosti řeporyjských a loděnických vápenců do míst občasné zaplavovaných vodou (obr. 1) a dále spleťtým *Bludištěm* a větvemi *Mlaskačka* a *Salonky* ve spodněji položených vápencích loděnických a sliveneckých. Celková délka jeskyně je 1360 m, hloubka 111 m (KOLČAVA 2004). Půdorysné schéma obou jeskyní je na obrázku 2.

Stále se rozšiřující *lom Čeřinka* postupně dosáhl délky zhruba 1,5 km a jeho nejstarší část (právě ta v blízkosti obou jeskyní) začala plnit funkci vnitřní výsypky. Vchody obou jeskyní se tak ocitly při dně nálevkovitých jam tvořených výsypkou, *Čeřinka* v roce 2008, spodní vchod *Arnoldky* v roce 2015 (pozn. horní vchod *Arnoldky* leží v úrovni plošiny mimo lom). Prostor mezi jeskyněmi téměř nabyl podoby původní *Paní hory*. Další geografické, geologické a hydrologické souvislosti uvádějí např. HROMAS a KUČERA (1972), BRUTHANS a FILIPPI (1999) a KOLČAVA (2013). Oblast *Paní hory* je ze speleologického hlediska dlouhodobě sledována skupinou „Geospeleos“ (Základní organizace 1-05 České speleologické společnosti).

1.2. Mikroklima v jeskyních na Paní hoře

Relativně uzavřené a tím specifické ovzduší uvnitř jeskyní lze charakterizovat základními parametry, jako jsou teplota vzduchu, relativní vzdušná vlhkost, atmosférický tlak, proudění vzduchu, výskyt různých koncentrací plyných látek, aerosolů a lehkých atmosférických iontů. Srozumitelný přehled charakteristik mikroklimatických veličin a jejich problematiku uvádí např. SLÁDEK (2009); příklady závislosti jeskynního mikroklimatu na vnějších klimatických podmínkách ve zpřístupněných jeskyních v ČR pak uvádějí HEBELKA a ROŽNOVSKÝ et al. (2011).

V letech 2008–2015 probíhalo v jeskyních *Arnoldka* a *Čeřinka* měření teploty vzduchu, koncentrace oxidu uhličitého a objemové aktivity radonu. Tuto činnost podpořilo několik impulsů, např. během měřických prací ve spodním úseku *Panoptikálního tahu* v srpnu 1993 došlo k náhlému úbytku dýchatelného vzduchu. Po dvou měsících byla ve *Vysokém domě* zjištěna koncentrace oxidu uhličitého 6 obj. % (měřeno trubičkami prosávacím detektorem Universal 66; podobná situace ve spodních částech obou „tahů“ nastávala v 70. letech 20. století, tehdy ale ještě nebyl otevřen horní vchod jeskyně); tato událost vyvolala spekulace o původu CO₂. Později, již při úvodním měření teplot (etapa I, viz níže), jedno z čidel Omega zaznamenalo v 1. polovině roku 2009 nelogický dlouhodobý nárůst teploty v *Dračí tlamě* jeskyně *Arnoldka* (viz kapitola 3.1.1.) a orientační měření objemové aktivity radonu v r. 2008 přineslo v okolí *Panoptika* (*Arnoldka*) a v *Říceném domě* (*Čeřinka*) neočekávané zvýšené hodnoty (viz kapitola 3.3.1.). Všechna tato starší data byla důvodem k podrobnějšímu studiu mikroklimatických poměrů obou jeskyní.

Výsledky samotného měření mohou mít přínos k lepšímu pochopení režimu zimoviště netopýrů, rovněž mohou přispět k objevům dosud neznámých částí jeskyní. Výsledky také popisují stav mikroklimatu těsně před a během zasypávání lomu v okolí spodního vchodu do *Arnoldky* a mohou v budoucnu posloužit k porovnání situace v jeskyni při případném navyšování horizontu výsypky nebo při úplném zavalení ohroženého vchodu.

1.3. Teplota vzduchu v jeskyních

Teplotní stabilitu jeskynního ovzduší zajišťuje teplo okolní horniny, v níž je jeskyně vytvořena. Tuto stabilitu ale narušují a v různé míře vychylují další procesy. Jednak proudění vzduchu vyvolané rozdílem teplot ovzduší uvnitř a vně jeskyní – vlivem rozdílných hustot lehčí teplejší vzduch stoupá a těžší chladnější klesá – termické proudění. U jeskyní s více vchody v nestejných výškách jev způsobuje dynamické proudění vzduchu uvnitř jeskynních prostor (to je případ části jeskyně *Arnoldka*, kde lze projevy proudění vzduchu v jeskyni sledovat i na povrchu – v zimě roztátý sníh „mastný flek“, případně sloup páry u horního vchodu, v létě pak vytékání studeného vzduchu ze spodního vchodu). U jeskyní s jedním vchodem, tedy z hlediska proudění vzduchu ve statických jeskyních, způsobuje rozdíl teplot pouze částečnou sezónní obměnu. V případě vchodu v nejvýše položeném místě jeskyně dochází k obměně v období, kdy venkovní teplota klesá pod hodnotu teploty vzduchu v jeskyni, zpravidla tedy pouze v zimním období. Proudění vyvolané rozdílem teplot stagnuje v období vyrovnání venkovní a vnitřní teploty.

K další částečné výměně vzduchu v částech blízkých vchodu dochází při atmosférických změnách vnějšího tlaku vzduchu, kdy jeskyně při poklesu vnějšího tlaku vzduch „vydechuje“ a při nárůstu atmosférického tlaku vně jeskyně je do ní vzduch vtlačován. Představitelem tohoto typu jeskyně je *Čeřinka* (opomineme-li hypotetickou ventilaci přes *Větrnou chodbu* a zaniklou ventilaci *Krápníkové chodby* skrze zasypaný vrt). Podle příčiny, která jev vyvolává, se jedná o barické proudění, které s dalšími mechanismy proudění vzduchu v jeskyních analyzuje JANČAŘÍK (1976, 1977, 1978 a 1982) a JANČAŘÍK a BOTUR (1981).

Dalším faktorem je geotermický gradient ve vertikálním směru k jádru Země. Hodnota přírůstku zvyšující se teploty horninového masivu kolísá v závislosti na lokalitě od 1 do 10 °C na 100 m hloubky (např. BLAŽKOVÁ 2010), přičemž obvyklé hodnoty bývají v rozmezí 1,8 až 3,5 °C na 100 m (LUETSCHER a JEANNIN 2004). V obou námi popisovaných jeskyních, které dosahují hloubky okolo 100 m, může tento jev ovlivňovat teploty vzduchu a opět vlivem rozdílných hustot vyvolávat jeho proudění ve vertikálním směru. Jak ale LUETSCHER a JEANNIN (2004) uvádí, může být geotermický gradient opačně ovlivňován přenosem tepla vzduchem a zejména vodou, přičemž ve většině jimi uváděných jeskyní byl výsledný teplotní gradient okolo 0,5 °C na 100 m (což je mimochodem gradient vlhkého vzduchu) a výsledná teplota tak byla v určité rovnováze s teplotou vzduchu, vody a horniny.

Teplotu vzduchu má v obou popisovaných jeskyních schopnost ovlivňovat také teplo „jezerní“ vody, která je přiváděna do jeskyní „od spodu“ synklinály či po tektonických liniích z jiných částí území (KOLČAVA 2013). Výkyvy v její teplotě určují rozdíly mezi „klidovým“ stavem podzemní vody a reakcí na povodňovou situaci. Voda jako nositel tepla hraje roli i v dalším faktoru, kterým je skap. Především v místech vyšších průsaků vody do podzemí z blízkého povrchu. Ke zvýšení schopnosti ovlivnění může přispět rozsah srážkové události a teplota infiltrované vody.

Rovněž pohyb osob v jeskyni, jejich počet, doba setrvání a typ prováděné činnosti vyvolává změnu teploty vzduchu a to jak přímou tepelnou výměnou, tak nepřímou vyvoláním proudění vzduchu a to nejen pohybem (např. JANČAŘÍK 1977, LARIO a SOLER 2010), ale také změnou hustoty ovzduší v okolí osob (vydechování těžšího CO₂, výkyv vlhkosti vzduchu, kondenzace vodních par, transport aerosolových částic). Lokální změnu teploty vzduchu může dále vyvolávat změna atmosférického tlaku (stlačování/rozpínání vzdušného sloupce), stejně jako tlaková reakce na náhlé výkyvy hladin jezer při povodňových událostech, či změna hustoty vzduchu vlivem soustředěnějšího „přítoku“ CO₂.

1.4. Oxid uhličitý v jeskyních

Oxid uhličitý je běžnou složkou zemské atmosféry (v současnosti cca 0,035 obj. %) a součástí koloběhu uhlíku na Zemi. Jeho zdrojem je mimo jiné přirozený rozklad a oxidace organické hmoty, spalování, respirace, plynné výrony ze zemské kůry aj. Je zhruba 1,5krát těžší než vzduch, a proto může docházet k jeho kumulaci v prohlubních, jeskyních, dolech, studnách apod. O tom, jaké množství se ho bude kde hromadit, rozhoduje intenzita produkce z jeho zdroje a míra ventilace zmíněných objektů. Významným zdrojem CO_2 v jeskyních jsou biogenní procesy v půdním pokryvu (např. SLÁDEK 2009), tj. dýchání kořenových systémů, organismů, rozkladné procesy organické hmoty atd. Jeho generované množství pak závisí na teplotě prostředí, četnosti srážek, stupni přítomnosti kořenových systémů, fotosyntéze rostlin. Vegetační cykly následně způsobují sezónní výkyvy produkce CO_2 (např. SOBKOVÁ 2010, KUZYAKOV 2006); promrzlá půda tedy snižuje možnost tvorby půdního CO_2 .

Oxid uhličitý se z půdy do podzemí dostává buď přímo otevřenými puklinami, závaly, suťovými ucpávkami komínů (příkladem může být nedaleká *Studniční jeskyně* na *Mokrém vrchu* – ZAPLETAL, ZAPLETAL a ŽÁK 2011) nebo nepřímou rozpouštěním CO_2 ve vodě a následnou infiltrací do jeskyně (skap). Tento proces je spojen s průvodním rozpouštěním CaCO_3 . Do jeskynního prostředí se tak CO_2 dostává ve vodném roztoku hydrogenuhličitanu vápenatého. Možnost jeho uvolnění do jeskynní atmosféry ale již řídí jeho vlastní přítomnost (koncentrace) v jeskyni. Pokud dosahuje hodnoty blízké koncentraci v půdním pokryvu, k jeho uvolnění nedochází. Zároveň také nedochází ke zpětnému vysrážení CaCO_3 ve formě speleotém. Princip včetně ovlivnění dalšími prvky přítomnými procesy krasování popisují např. CÍLEK, SLAČÍK a ŠMEJKAL (1992). Z této práce uvedme ještě poznámku: rozpustnost CO_2 ve vodě stoupá s klesáním teploty.

Dalším nepochybným zdrojem CO_2 je člověk a jeho dýchání při činnostech v jeskyni (prolongace, dokumentace, exkurze aj.). Charakteristickým příkladem je vliv návštěvníků na klima zpřístupněných jeskyní, např. HEBELKA a ROŽNOVSKÝ et al. (2011) nebo LANG, FAIMON a EK (2015). Rovněž karbidové lampy či jiná svítidla s otevřeným plamenem produkují spalováním oxid uhličitý. Přítomnost zvýšených koncentrací CO_2 (a radonu, Rn) v jeskyních Českého krasu ve vztahu k hypotetickému hlubinnému původu vázanému na hluboké zlomové struktury diskutují ŽÁK (1999) nebo ZEMAN a SUCHÝ (1999).

Aktuální úroveň CO_2 je závislá především na míře výměny vzduchu mezi jeskyní a vnější atmosférou. Dalším řídícím faktorem je atmosférický tlak. Při jeho poklesu se CO_2 uvolňuje z přitékající vody (skapy, eventuální přítoky jezer), z porézních hornin (jeskynní sedimenty), ze vzdušné vlhkosti (např. KOWALCZYK a FROELICH 2010). Naopak přítok nenasycené vody během srážkových událostí a povodní je schopen CO_2 částečně absorbovat.

KVAPIL (2012) na závěr upozorňuje, že kolísání koncentrace CO_2 v reakci na výkyvy ventilace jde pospolu s kolísáním koncentrací dalších plynů, a to především radonu.

1.5. Radon v jeskyních

Z velkého počtu primordiálních radionuklidů vzniklých syntézou při evoluci Země se zachovaly pouze radionuklidy s velkým poločasem přeměny. Vzhledem ke koncentracím přírodních radionuklidů v zemské kůře a jejich měrným aktivitám (udávaným v Bq/kg) jsou pro radioaktivitu hornin významné pouze K, U a Th (tzv. primordiální radionuklidy) a členové jejich přeměnových řad (tzv. sekundární radionuklidy). Jednotlivé horniny (magmatické, sedimentár-

ní a metamorfované) se obsahem přírodních radionuklidů odlišují. Obecně lze říci, že nejnižší radioaktivitu mají obvykle sedimentární a nejvyšší vyvřelé kyselé horniny.

Přeměnové řady obsahují také plynný prvek, radon, který může být díky svým vlastnostem zdrojem informací o chování podzemní atmosféry. Izotop ^{222}Rn (radon) s poločasem přeměny 3,82 dne, je členem uranové přeměnové řady a je dceřiným radionuklidem ^{226}Ra . Obvykle v podmínkách radioaktivity ČR méně významný ^{220}Rn (thoron) je členem thoriové přeměnové řady, je dceřiným radionuklidem ^{224}Ra a jeho poločas přeměny je 55 s. Oba se přeměňují alfa přeměnou. Dceřiné produkty obou izotopů radonu jsou kovové prvky, které bývají zachyceny na povrchu aerosolových částic (tzv. vázaná frakce) anebo jsou přítomny ve vzduchu (tzv. volná frakce) a mohou být tedy vdechovány a ozařovat dýchací cesty (např. PORSTENDÖRFER 1994, VAUPOTIČ 2008). Jejich (resp. ^{214}Bi) zvýšená koncentrace v ovzduší může přispívat také k externímu ozaření osob, pracujících nebo se pohybujících delší dobu v podzemí, přičemž záleží na koncentraci radonu a velikosti podzemních prostor. Naopak lidé v podzemí nejsou ozařováni kosmickým zářením, neboť je odstíněno horninovým masivem. Koncentrace aerosolových částic v jeskyních může být o dva řády nižší než ve vnějším prostředí, také proto jsou tato čistá prostředí využívána pro speleoterapii.

Radon je plyn inertní, bezbarvý, radioaktivní a bez zápachu. Jeho hustota je více než 7krát vyšší než hustota vzduchu: $9,73 \text{ kg/m}^3$ a je přibližně 5krát těžší než CO_2 . Radon je také dobře rozpustný ve studené vodě i dalších kapalinách (např. benzen, ethanol, glycerin, toluen atd.); jeho rozpustnost však klesá s rostoucí teplotou vody, což může ovlivnit jeho koncentraci např. v termálních pramenech.

Radon se do ovzduší jeskyní uvolňuje z horninového podloží. V horninách vzniká emanováním a uvolňuje se exhalací. Šíří se difúzí v případě gradientu koncentrace na krátké vzdálenosti a konvekci podél puklin či jiných tektonických projevů na vzdálenosti až několik desítek metrů. Na volném prostranství se objemová aktivita radonu (dále OAR) pohybuje v jednotkách Bq/m^3 (obvykle $3\text{--}10 \text{ Bq/m}^3$), v uzavřených prostorách pak může jít až o desítky tisíc Bq/m^3 . Koncentrace radonu v podzemních prostorách není možné předpovídat na základě žádného geologického a geometrického modelu; vysoké koncentrace radonu v ovzduší jeskyní nemohou být způsobeny koncentrací radonu v přítomné vodě (vzhledem k její nízké teplotě), jejich zdrojem jsou koncentrace ^{226}Ra převážně v klastických sedimentech a dále v přítomných horninách, a zejména nízký koeficient výměny vzduchu. Pokud k popisu kontinuální křivky koncentrací radonu použijeme dvouparametrický model a poté nalezneme odchylky od modelu, mohou být způsobeny např. zemětřesením (BRIESTENSKÝ et al. 2011). Projevy zemětřesení můžeme sledovat na velké vzdálenosti, neboť během něj dochází ke změnám na tektonických strukturách, které se mohou náhle otevřít/uzavřít vůči přísunu radonu z mnohdy hlubokých podložních partií jeskyní.

Radon se chová jako plyn, proto jeho typická křivka má variace nejčastěji s hlavní periodou 24 h. Postihnout jeho chování a variace je ale velmi obtížné a musí být založeno na dlouhodobém měření. Z těchto měření pak lze usuzovat na dynamiku jednotlivých jeskyní a pohyb vzdušných mas v nich. V některých případech jsou změny koncentrace závislé na změnách atmosférického tlaku, většinou však na změně poměru teplot vně/uvnitř měřené prostory resp. na změně proudění vzduchu. Protože teplota v jeskyních je během roku téměř konstantní, závisí variace koncentrace radonu vlastně na vnější teplotě. Čím vyšší je rozdíl vnější teploty během dne a noci, tím větší denní variace radonu můžeme sledovat. Změny teplot se pro-

jevují v rámci horninového masivu v závislosti na jeho tepelných vlastnostech a hloubce pod povrchem. Proto variace koncentrací radonu mohou vykazovat časový posun oproti změně teploty až několik dní a týdnů, většinou v blízkosti vchodu do jeskyně je koncentrace radonu ovlivněna atmosférickými ději vně jeskyně nejvíce a v hlubokých partiích nejméně. V případě neexistence komunikačních cest mezi jeskyní a povrchem a uzavření jeskynních prostor zdola vodní hladinou mohou být koncentrace radonu v jeskyních zcela konstantní během dlouhých časových období (statické části či celé jeskyně). Tedy ve větraných částech je ho méně než v nevětraných, např. v letním období, kdy se téměř zastavuje obměna vzduchu ve statických typech jeskyní se vchodem nahoře (teoreticky Čerínka), koncentrace výrazně roste (rozdíly mohou být několika-násobné, v extrému i více jak stonásobné, PLACHÝ 1986).

Přeměna radonu a jeho dceřiných produktů je také spojována s ionizací ovzduší (SAS, SLÁDEK a NAVRÁTIL 2006) a vznikem lehkých atmosférických iontů (ionty kyslíku, dusíku, vodíku, různých oxidů aj.).

2. Metodika

2.1. Měření teplot

Měření teplot vzduchu probíhalo ve dvou etapách. Během prvních měření v letech 2008–2010 (později nazvaných etapou I) bylo sledováno pět podzemních stanovišť a záznam probíhal spojitě a automaticky. Z důvodu nejasnosti výsledků a nemožnosti popsat teplotní režim v celých jeskyních následovala v letech 2013–2015 zásadnější etapa II, kdy bylo provedeno 8 čtvrtletních nespojitých měření na více než 50-ti stanovištích, s vyšší přesností a v souvislosti s měřením koncentrací oxidu uhličitého. V roce 2015 byla částečně započata etapa III s návratem k samočinným čidlům s vyšší přesností než měla čidla v etapě I (v této práci dále nepopisováno).

2.1.1. Měření automatickými čidly v letech 2008–2010 (etapa I)

Od 9. srpna 2008 do 1. září 2010 byla v jeskyních umístěna čidla Omega RD-Temp-XT sledující během čtyř měřicích kampaní teplotu vzduchu po 2 resp. 3,5 a 4 hodinách s rozlišovací schopností 0,35 °C a s přesností uváděnou výrobcem $\pm 0,2$ °C. Dvě čidla snímala teploty na hypotetickém dynamickém okruhu v jeskyni Čerínka. První čidlo v nároží chodeb na Prvním horizontu nedaleko pod vchodem a druhé čidlo na opačné straně jeskyně v dómku *Apsida* ve spodním úseku *Větrné chodby* (pro místní jména části jeskyní viz obr. 2). Očekávan byl slabý výkyv podle principu „dynamického okruhu“. Trojice čidel odečítala *Arnoldku*. První bylo umístěno v *Mezižebříkové chodbě* 22 m pod *Horním vchodem*, „protipólem“ k němu bylo čidlo v *Jídelně* v přímém větrném směru mezi *Vstupní* a *Bludnou chodbou*. Třetí čidlo snímalo nejnižší ze všech v místě minimálně ovlivňovaném přítomností speleologů na dně propasti *Dračí tlama* v *Panoptikálním tahu*. Od čidla byl očekáván spíše konstantní výstup vzhledem k předpokladu statického chování „tahu“. Poslední čidlo měřilo venkovní teplotu, první tři série v portálu jeskyně *Gabriela* a při čtvrté sérii bylo přemístěno na severně orientovaný balkón trafostanice v areálu *Solvayových lomů*, neboť k jeskyni se postupně přiblížilo čelo výsypky. Čidla byla řádně očíslována, aby během manipulací nemohlo dojít k záměnám a po dobu snímání na stanovištích byla ukryta v plastových krabicích.

2.1.2. Měření teplot 2013–2015 (etapa II)

Od března 2013 do ledna 2015 probíhalo na vybraných místech *Arnoldky* a *Čerínky* pravidelné čtvrtletní měření teplot a koncentrací oxidu uhličitého. Vzhledem ke snadnému ovlivňování teploty vzduchu na stanovišti měřičem byly po jeskyních týden před první

sadou měření rozmístěny stojící PET-lahve o objemu 1,5 l naplněné vodou s úkolem zakonzervovat teplotu v okamžiku úkonu měření. Po aklimatizaci teplotních „konzerv“ proběhla první sada měření a s odstupem zhruba čtvrt roku ještě dalších sedm. Mimo měření na lahvích byla zjišťována také teplota aktuálních vodních akumulací (ty ale mohou být ovlivněny odparem nebo přítokem vody jiné teploty).

Stanovišť PET bylo vytipováno 19 v Čerínce a 33 v *Arnoldce*. Podle vývoje pohledu na průběžné výsledky měření byla v *Arnoldce* před pátou sadou ještě doplněna čtyři další stanoviště lahví. Na počátku měření byla v jeskyních zvýšená hladina podzemní vody, a proto čtyři stanoviště na osazení teprve čekala (PET 8, 11, 12, 50). Před druhou sadou zasáhly střední Čechy extrémní srážky (červen 2013), což vedlo k dosažení historicky nejvyšších vodních stavů od objevu jeskyní (KOLČAVA 2013). Během druhé sady měření byla proto zcela zatopena stanoviště PET 9, 10, 49, lahve 13 a 18 plavaly na hladinách. Extrémní hladina v *Arnoldce* setrvala až do podzimu 2013, tedy překrývala v čase i třetí sadu měření. V případě plovoucích lahví byla měřena teplota jezer. Původně plánované umístění PET 12 do síně *U Krápníku* nebylo možné realizovat ani před závěrečnou osmou sadou (obr. 1), proto byla láhev náhradně umístěna do síně *U Sněhuláka* (12*). Zajímavostí může být přenesení PET 11 výkyvem hladiny jezera z *Jezerního domu* do plazivek nad *Netopýřím domem* dokazující nesymetrické stoupání nebo klesání hladiny ve prospěch jedné nebo druhé větve *Hlavního tahu*.

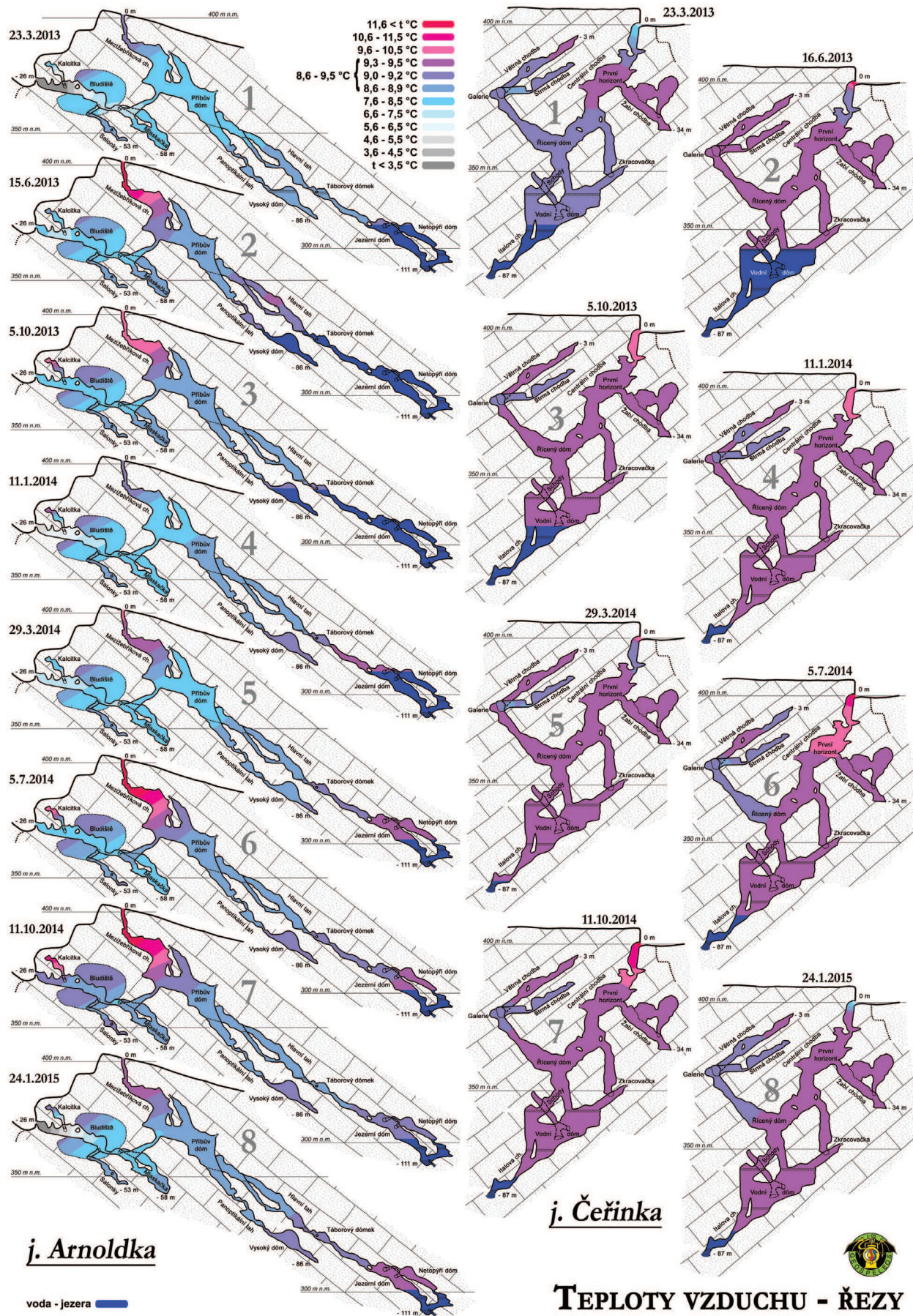
Pro každou sadu měření byl následně vyhotoven barevný plán aktuálního stavu teplot (ukázky na obr. 2 a 3). K měření bylo zpočátku (březen a červen 2013) užito elektronických teploměrů Greisinger GMH 3230 a GHM 3210 o rozlišení 0,1 °C a přesnosti udávané výrobcem $\pm 0,03$ % z měřené hodnoty a kontrolně analogového laboratorního rtuťového teploměru o dělení 0,1 °C s možností odečtu na 0,05 °C. Od třetí sady bylo používáno pouze 2–4 ks analogových rtuťových teploměrů, které vykazovaly stabilnější chování měřených hodnot na stanovišti (obr. 4).



Obr. 4. Irena Zapletalová při měření teploty rtuťovým teploměrem na stanovišti Čekaná (č. 37) v Čerínce. Foto Petr Vodička, 11. října 2014.

Fig. 4. Irena Zapletalová is taking temperatures using a mercury thermometer at Čekaná site (bottle no. 37) in the Čerínka Cave. Photo by P. Vodička, October 11, 2014.

Abysme se vyvarovali teplotní difference mezi dnem a hrdlem PET-lahví v řádu desetin °C, byly jak senzory elektronických teploměrů, tak analogové trubice vymezeny pevně připojenými víčky našroubovatelnými na hrdla lahví, čímž měření teploty proběhlo vždy ve stejné výšce každé láhve. Veškeré teploměry byly před měřením vzájemně komparovány a zjištěné odchylky byly zohledněny v průběžných výpočtech.

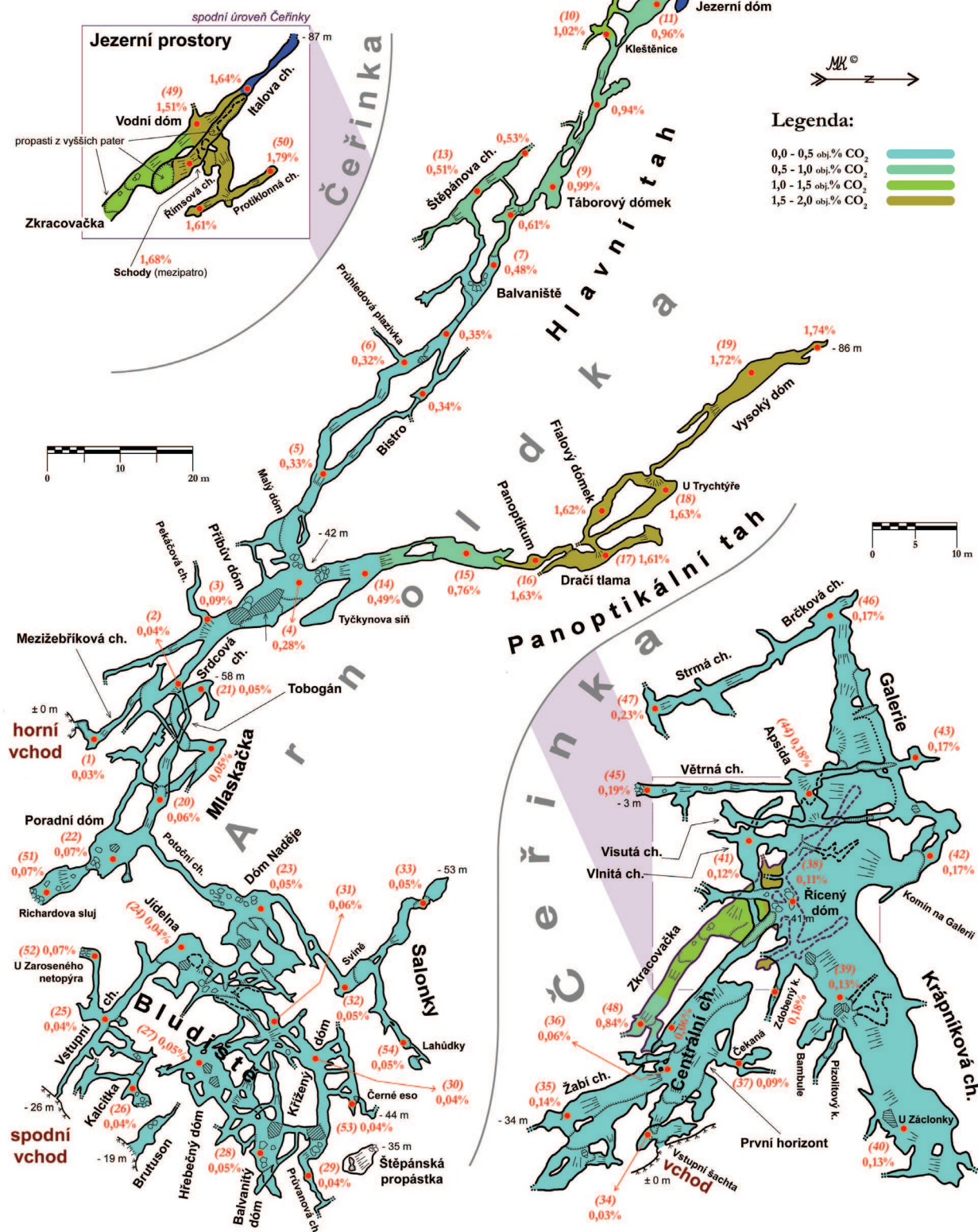


Obr. 3. Soubor řezů jeskyněmi Arnoldkou a Čerínkou s vyznačením vývoje teplot vzduchu za měřené období 2013–2015.
 Fig. 3. A set of cross-sections of the Arnoldka and Čerínka caves showing the evolution of temperatures in the years 2013–2015.

ARNOLDKA + ČEŘINKA

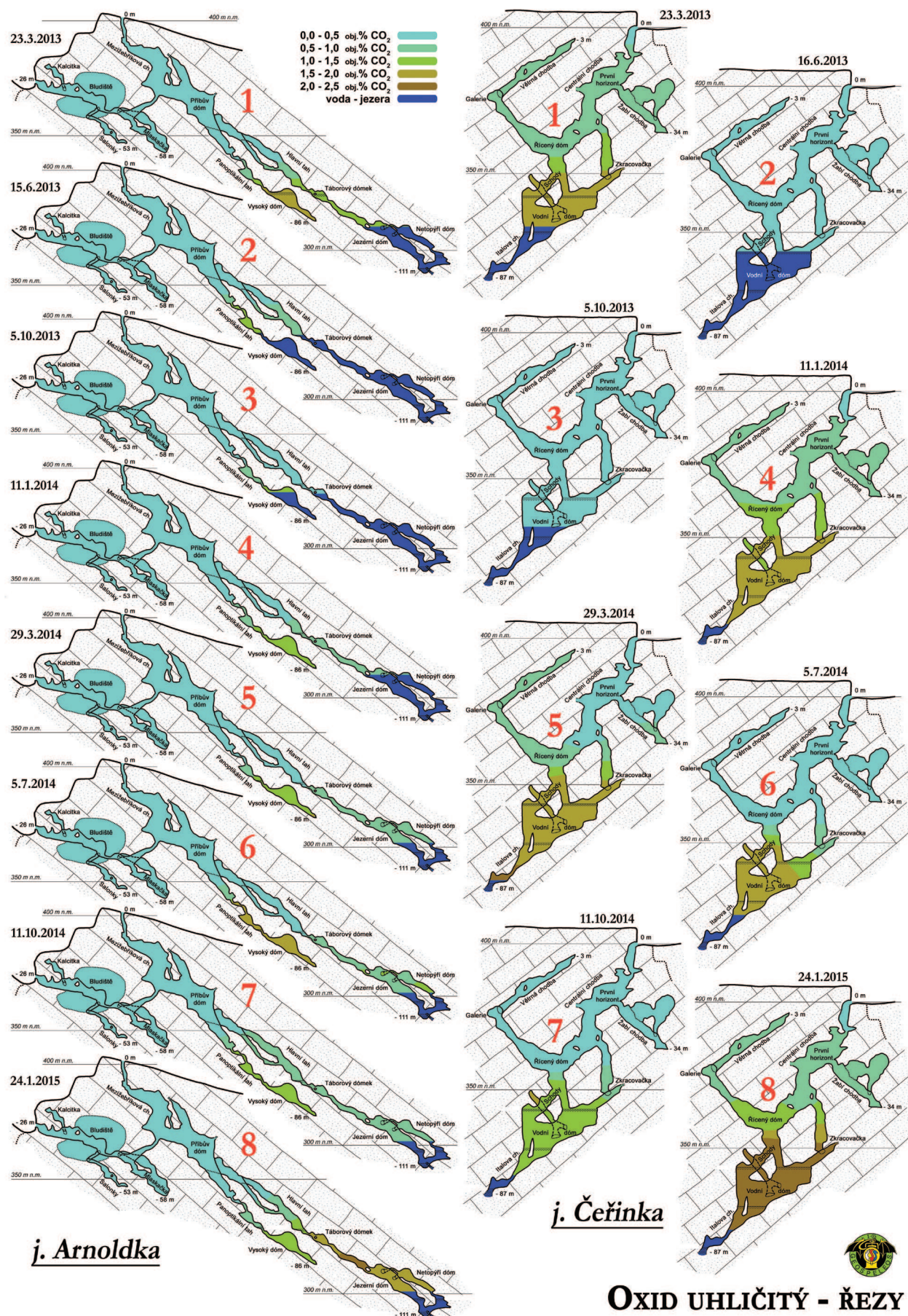
OXID UHLÍČITÝ DNE 5.7.2014

PŮDORYS



Obr. 5. Půdorysné schéma jeskyní Arnoldka a Čeřinka s vyznačením měřených stanovišť a výsledných hodnot koncentrací CO₂ šesté sady měření ze dne 5. července 2014. Rozdíly vyznačuje barevné odstupňování.

Fig. 5. A schematic plan view of the Arnoldka and Čeřinka caves showing the measurement sites and the resulting values of CO₂ concentrations yielded by measurements from July 5, 2014 (sixth set). Differences are distinguished by a colour gradient.



Obr. 6. Soubor řezů jeskyněmi Arnoldkou a Čerínkou s vyznačením vývoje koncentrací CO₂ za měřené období 2013–2015.

Fig. 6. A set of cross-sections of the Arnoldka and Čerínka caves showing the evolution of CO₂ concentrations in the years 2013–2015.

2.2. Měření objemové koncentrace oxidu uhličitého

V souladu se čtvrtletním měřením teplot vzduchu bylo od března 2013 do ledna 2015 prováděno v obou jeskyních také zjišťování koncentrací CO_2 . Bylo vybráno zhruba 22 míst v Čerince a 46 v Arnoldce v několika případech proměnných podle aktuální hydrologické situace a vývoje pohledu na průběžné výsledky. Měření probíhalo pokud možno vždy ve dvou částech konkrétní jeskyně současně, aby nedocházelo k vzájemnému ovlivnění. Pro každou sadu měření byl také následně vyhotoven barevný plán aktuálního stavu koncentrací CO_2 (ukázky na obr. 5 a 6).

K měření bylo použito výhradně elektronických detektorů. Nejčastěji byl používán detektor Airwatch PM1500 v počtu 1–2 kusů s rozlišením jedné setiny a uváděné přesnosti 0,05 obj. %. Po měření částí s vyššími koncentracemi CO_2 ho však bylo nutné určitou dobu vysycovat na „čistším“ vzduchu, aby měření v další částech s nižšími koncentracemi nebyly zkreslené; výrobce uvádí rozsah 0–5 obj. %. Přístroj je vybaven alarmem od 0,5 obj. %. Dále byly použity tyto detektory: Indoor Air Quality Monitor PS32 firmy Sensotron, který měří velmi přesně (v řádu ppm), ale rozsahem pouze do 0,5 obj. %, byl použitelný pouze v prostorách s nižšími koncentracemi. Detektor Oldham C2000 s rozlišením setiny % a s přesností 0,05 obj. % (pro rozsah 0,0–0,5 %) a 0,1 obj. % (při měření 0,5–5,0 %). Po komparaci s ostatními jsme u tohoto přístroje byli nuceni zavést opravy s lineárním průběhem; tento přístroj je rovněž vybaven alarmem. Detektor Oldham MX2100 měřící v rozlišení desetiny % a v rozsahu 0,0–5,0 obj. % o přesnosti 0,1 obj. % (pro rozsah 0,0–3,0 %) a dále $\pm 10\%$ z měřené hodnoty; vybaven alarmem od 0,5 obj. %. Alternativně (a nikdy ne samostatně) byl použit detektor Ventis MX4 měřící kyslík O_2 s přesností 0,5 obj. %; CO_2 byl poté dopočítán jako úbytek O_2 (v porovnání s hladinou O_2 před vstupem do jeskyně).

2.3. Měření objemové aktivity radonu

Objemová aktivita radonu (OAR) byla v jeskyních na Paní hoře zjišťována v několika kratších časových úsecích a to několika způ-

soby. Jednak bylo dne 11. července 2008 užito přenosné ionizační průtokové komory Radonic 01 (objem 8l), skrze kterou je aktivně čerpán vzduch (včetně dceřiných produktů přeměny); kontinuální měření ionizačního proudu umožňuje sekundový záznam s rozlišením 2 Bq/m^3 ; rozsah přístroje je $50\text{--}12\,000 \text{ Bq/m}^3$. Komorou byl prověřován okamžitý stav úseku Arnoldky: Příbův dóm – Balvaniště na Hlavním tahu (zde setrvání cca hodinu a čtvrt) – opět Příbův dóm (setrvání 5 minut) – síň nad Panoptikem (setrvání zhruba půl hodiny); viz obr. 7.

Dále bylo prováděno kontinuální měření OAR přístrojem Radim 3A, který OAR měří spektrometricky polovodičovým detektorem s povrchovou bariérou na základě počtu α -částic emitovaných při přeměně jeho prvního dceřiného produktu izotopu polonia ^{218}Po z profiltrovaného vzduchu s radonem, který samovolně prošel k detektoru difúzí. Přístroj byl umístěn nejprve dvakrát v Arnoldce: v Táborevém dómku na Hlavním tahu (11.7.–2.8.2008) a v Jidelně v Bludišti (8.–24.9.2008). O šest let později pak v Říceném dómu Čerinky (23.8.–20.9.2014), odkud byl 20.9.2014 přenesen do Dračí tlamy v Panoptikálním tahu Arnoldky, kde 30. září zaznamenal pouze několik hodnot až o 1 řád vyšších, neboť došlo ke zkratu baterie vlivem kondenzace vody (obráz. 8). Záznam přístroje probíhal s krokem měření 30 minut a vždy byly zaznamenány také relativní vlhkost, teplota a atmosférický tlak. Výrobce udává přesnost měření OAR: 30 ± 6 , 300 ± 19 , $3000 \pm 60 \text{ Bq/m}^3$ a přesnost snímání tlaku 3 hPa. Dne 11. července 2008 v Arnoldce a o den později v Čerince byl proveden jednorázový odběr vzorků jeskynního ovzduší do ionizačních komůrek (objem 0,25l), jejichž proměřením byla po 15 minutách od uzavření určena okamžitá hodnota OAR na daném stanovišti. Tato metoda byla od počátku považována pouze za doplňkovou.

Současně proběhl odběr vzorků vápence, kalcitu a sedimentů v jeskyních a v lomu v jejich blízkosti pro stanovení hmotnostní aktivity radioizotopů draslíku, thoria, radia (a cesia) metodou laboratorní spektrometrie gama.



Obr. 7. Záběr z průběhu měření OAR ionizační komorou Radonic 01 – transport komory Panoptikálním tahem jeskyně Arnoldka dne 11. července 2008. Foto Lukáš Němeček.

Fig. 7. Radonic 01 device measurements in parts of the Panoptikální tah (the Panoptical Passage) in the Arnoldka Cave on July 7, 2008. Photo by Lukáš Němeček.



Obr. 8. Stanoviště přístroje Radim 3A během měření „koncentrace“ radonu v roce 2014 v Říceném dómu (Čerinka, vlevo) a Dračí tlamě (Arnoldka, vpravo). Na stanovištích bylo nutností zamezit skapové vodě vtékat do ochranné schrány přístroje. Foto Karel Křtěn.

Fig. 8. Instrument Radim 3A during the measurement of radon “concentration” in the Řícený dóm (Rockfall Dome, Čerinka Cave, left) and the Dračí tlama (Dragon's Mouth, Arnoldka Cave, right) in the year 2014. The device was protected against drip water. Photo by Karel Křtěn.

3. Výsledky a diskuse

3.1. Výsledky měření teplot vzduchu v jeskyních na Paní hoře

3.1.1. Měření teplot v letech 2008–2010 (etapa I)

Výsledky měření automatickými čidly Omega v letech 2008–2010 znázorňuje obr. 9, kde vývoj teplotní situace podzemních stanovišť zobrazuje graf v detailu (obr. 9A) a jejich porovnání s venkovní teplotou pak obr. 9B. V některých okamžicích však výsledky nebyly příliš přesvědčivé. Čidla trpěla výpadky a snímáním místy nesmyslných hodnot (např. čidlo na *Prvním horizontu* hned v úvodu první série), ačkoliv při počáteční komparaci nevykazovala výraznější odchylky. Nicméně, uvedme alespoň několik závěrů, které z těchto měření vyplynuly (ostatní data je možné dohledat na www.geospeleos.com):

- a) průměrné teploty vzduchu v jeskyních cca 9 °C odpovídají průměrné teplotě ovzduší v oblasti zaznamenané meteostanicí Chrštenice–Na Radosti (viz tab. 1);
- b) ve sledovaném období se čidlem měřená venkovní teplota vzduchu pohybovala v rozmezí od -16,3 °C (27.1. 2010) do +32,5 °C (23.7. 2009), tj. v intervalu 48,8 °C;
- c) čidlo na stanovišti *Apsida* v Čeřince zaznamenávalo převážně konstantní hodnoty, ale vždy o cca 0,5 °C nižší než čidlo na *Prvním horizontu*;
- d) čidla na „dynamickém okruhu“ *Arnoldky* reagovala na velké výkyvy venkovních teplot téměř bezprostředně (v řádu prvních hodin; např. 27.1. 2010 a 11.6. 2010);
- e) čidlo na stanovišti *Dračí tlama* vykazovalo v druhé sérii měření nevysvětlitelný, pravděpodobně ale chybový teplotní nárůst až o 2 °C.

Tab. 1. Průměrné roční teploty vzduchu na meteostanici Chrštenice–Na Radosti.

Table 1. Average annual air temperatures at the Chrštenice–Na Radosti meteorostation.

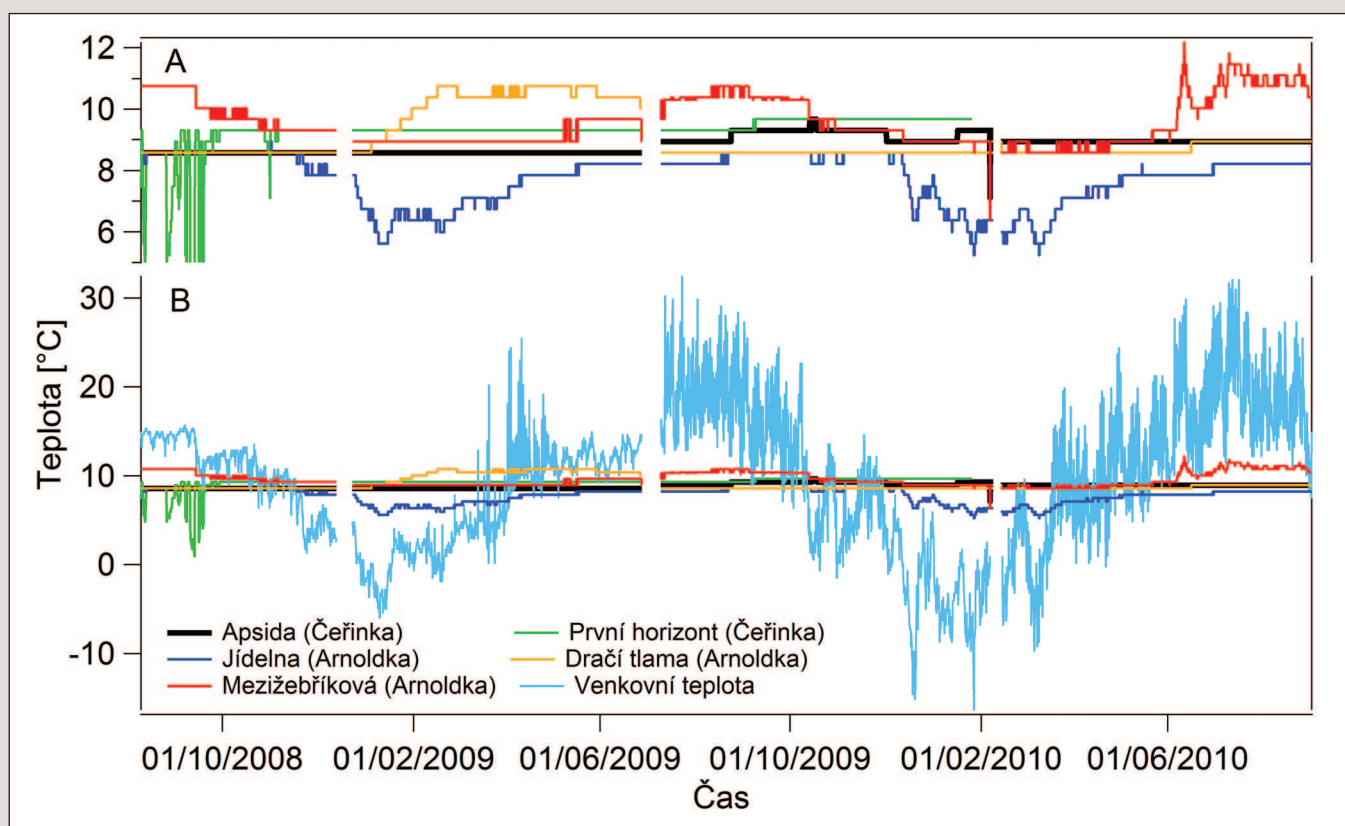
rok	průměrná roční teplota
2008	+9,1 °C
2009	+8,9 °C
2010	+7,7 °C
2011	+9,1 °C
2012	+9,0 °C
2013	+8,6 °C
2014	+10,0 °C
celkový průměr	+8,91 °C

Bylo zřetelné, že pro hlubší pochopení teplotní situace v jeskyních je nutné v další etapě použít metodu s vyšší přesností a spolehlivostí.

3.1.2. Teploty vzduchu v Arnoldce (2013–2015; etapa II)

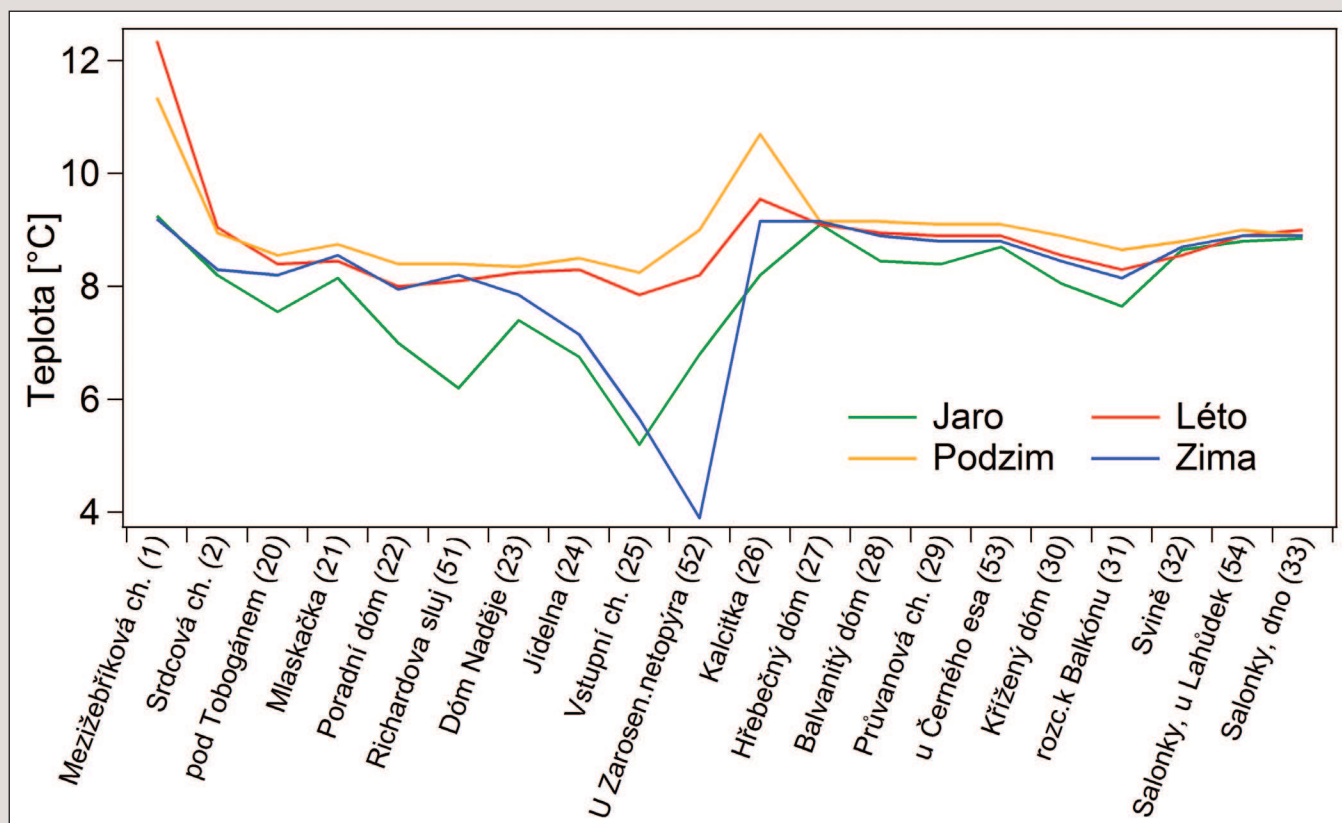
Výsledné měřené hodnoty uvádí tab. 2. Grafické zpracování výsledků pak zobrazuje ukázka na obr. 2 a jednoduchý, ale kompletní záznam teplot formou barevně odstupňovaných řezů na obr. 3. Protože v etapě II bylo v obou jeskyních zvoleno dohromady přes 50 měřicích stanovišť, byla pro jasnější vyhodnocení tato stanoviště rozdělena do bloků podle charakteristických jeskynních pasáží.

Jeskyně *Arnoldka* byla rozdělena na bloky (A) „*Bludiště*“ (od *Mezižebříkové* a *Srdcové chodby* přes prostory *Mlaskačky* po všechna stanoviště ve vlastním *Bludišti* a *Saloncích*), (B) „*Hlavní tah*“



Obr. 9. Teplotní série měřené v letech 2008–2010 pomocí automatických čítačů Omega. A: změny pouze v jeskyních, B: porovnání s venkovní teplotou. Mezery v kontinuitě grafu jsou okamžiky, kdy měření neprobíhalo, neboť byla čidla z důvodu stahování dat a dobití baterií na stanovištích nepřítomna.

Fig. 9. Temperature series measured using Omega automated counters in 2008–2010. A: Variations in the caves only, B: Compared with outdoor temperatures. Gaps in the graph continuity are due to download of data, replacement of batteries and other servicing.



Obr. 10. Průměrné sezónní teploty vzduchu na „dynamickém tahu“ (úsek Mezižebříková chodba – Bludiště) v jeskyni Arnoldka v letech 2013–2015; datový blok (A).

Fig. 10. Average seasonal air temperatures at the “dynamic passage”, sites from the Mezižebříková Corridor to the Bludiště (Labyrinth) in the Arnoldka Cave in the years 2013–2015 (green line – spring, red – summer, yellow – autumn, blue – winter); data block (A).

(od Příbova dómu do Jezerního dómu a okolních prostor v nejnižším místě jeskyně) a (C) „Panoptikální tah“ (od Příbova dómu do Vysokého dómu). Zatímco bloky dat (B) a (C) reprezentují dva nezávislé „tahy“, které jsou minimálně ovlivněny přímým prouděním vzduchu, jak bude popsáno dále, blok (A) je většinou silně podřízen dynamickému proudění mezi horním a spodním vchodem (nepřetržitě otevřené vletové otvory pro netopýry), jejichž vzájemné převýšení činí 26,5 m.

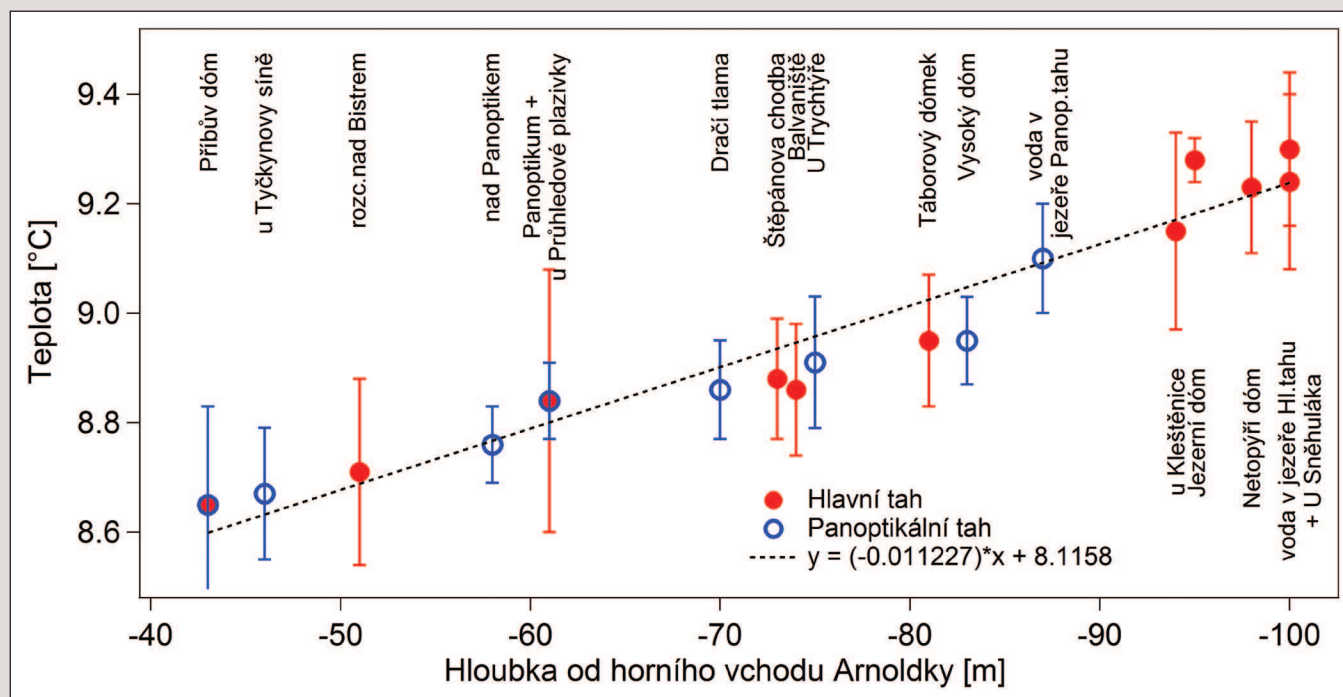
Obrázek 10 zachycuje průměrné sezónní teploty naměřené na stanovištích bloku (A). Je zde vidět, na kterých stanovištích se nejvíce projevují teplotní změny a kudy je tedy dovnitř nasáván teplý resp. studený vzduch. Teplý vzduch je vtahován v létě a na podzim, a to hlavně horním vchodem, který v grafu identifikuje Mezižebříková chodba (1). V menší míře je teplý vzduch vtahován také přes Kalcitku (26), která komunikuje s povrchem prostřednictvím malé samostatné jeskyně Brutuson (ev. č. 24-051) přes oddělující zával mezi nimi.

Naopak studený vzduch je nasáván v okolí Vstupní chodby (25), která přichází od spodního vchodu, a také v okolí Richardovy sluje (51) (na jaře). Podíl Richardovy sluje na ventilaci jeskyně mohl být v minulosti vyšší, ale přiléhající suťový svah s ventarolou v lomové stěně byl v roce 2012 zasypán odvalet. V zimě teplotně „vyčnívá“ podchlazené stanoviště v chodbě U Zaroseného netopýra (52), která pravděpodobně komunikuje s nedalekou rovněž v lomu ležící „ventarolou s liškou“ (v otvoru byla spatřena liška). Horní vchod a do jisté míry také Kalcitka se v zimním období chovají jako výdušné.

Sezónně je tedy jasně zřejmá teplotní změna způsobená prouděním vzduchu mezi oběma vchody s přispěním podružných ventarol ve stěnách lomu. Teplota v Mezižebříkové chodbě pod horním

vchodem začíná stoupat na jaře (viz obr. 9), kdy průměrná venkovní teplota překročí hranici cca 9°C. Během horkého léta může výjimečně do Srdcové chodby přitékat vzduch ohřátý i nad 12°C (např. 11.6.2010). Tento jev ovlivní Jídelnu v Bludišti, kde se teplota vzduchu začne „odspodu“ blížit k průměrné roční teplotě ovzduší v jeskyni, kterou však nepřekročí. Na podzim se proudění vzduchu pozvolna obrací a podchlazuje okolí Jídelny, jak ukazují měření z let 2008–2010 (obr. 9), tak z let 2013–2015 (obr. 10). Vedle Jídelny jsou proudícím vzduchem ovlivněny hlavně prostory jako Poradní dóm (22) nebo Dóm Naděje (23), ve kterých zřejmě dochází k větší kumulaci studeného vzduchu (obr. 10). V dalších prostorách vlastního Bludiště sledujeme slabší sezónní vývoj ve směru Křížený dóm (30) – Balvanitý dóm (28) – Průvanová chodba (29) s rozdílem krajních hodnot např. 1,1°C pro poslední jmenované stanoviště. Tento poznatek lze vysvětlovat buď vhodnou konfigurací prostor vůči hlavním směrům ventilace nebo ovlivnění proudění další ventarolou z lomu – Štěpánskou propástkou (ev. č. 24-032), která je však od r. 2012 rovněž zasypána výsypkou. Mezi ní a Arnoldkou byl proveden radiotest (KOLČAVA a ZAPLETAL 2008). Naproti tomu v těsné blízkosti jmenovaného „tahu“ zůstává teplotně téměř izolován Hřebečný dóm (27), kde rozdíl krajních naměřených hodnot činí pouhé 0,2°C. V prostorách bezprostředně navazujících na Bludiště, kterými jsou sestupné větve Mlaskačka (21) a Salonky (33), jsou také teploty stabilnější, ale prostory svojí morfologií připomínají více statické prostředí „tahů“ v datových blocích (B) a (C). Salonky s přístupovou chodbou menšího profilu vykazují samozřejmě větší teplotní stabilitu než více přístupnější Mlaskačka.

Změna teplot v Bludišti a okolí je prokazatelně způsobována klasickou komínovou cirkulací (způsobenou rozdílnou hustotou



Obr. 11. Průměrná teplota vzduchu ± směrodatná odchylka (ze všech měření) na Hlavním a Panoptikálním tahu v Arnoldce v letech 2013–2015. Přerušovaná čára ukazuje regresní lineární přímkou s korelací $R^2 = 0,94$; datové bloky (B) a (C).

Fig. 11. Average air temperatures ± standard deviation (from all measurements) at the Hlavní tah (Main passage) and the Panoptikální tah (Panoptical passage) in the Arnoldka Cave in the years 2013–2015. The dashed line shows a linear regression with a correlation $R^2 = 0,94$; data blocks (B) and (C).

vzduchu při různých teplotách) mezi ventilačními vstupy, které jsou v různých nadmořských výškách (<http://www.geospeleos.com/Lokality/Arnoldka/2426-ProuděníHorníVchodMayk2013.jpg>). Ve většině prostor „dynamického tahu“ nalézáme také vyschlé jeskynní sedimenty – pravděpodobný důsledek proudění vzduchu.

Narozdíl od *Bludiště* nejsou „tahy“ (B) a (C) v *Arnoldce* příliš ovlivňovány dynamickým prouděním mezi vchody a podmínkami v nich se spíše blíží relativní stabilitě statického prostředí. Z tohoto důvodu jsou bloky (B) a (C) ideální ke vzájemnému porovnávání hladin teplot vzduchu a CO_2 v závislosti na hloubce.

Na obr. 11 je dobře vidět, že průměrná teplota vzduchu (ze všech měření) na *Hlavním* a *Panoptikálním tahu* stoupá se vzrůstající hloubkou v obou blocích víceméně stejně. Pokud data spojíme a proložíme lineární funkcí (silná korelace $R = 0,97$), získáme rovnici pro výpočet nárůstu průměrné teploty prostředí v obou větších, přičemž průměrný nárůst je cca $1,1^\circ\text{C}$ na 100 m. Celkově to ukazuje, že teplota vzduchu v „tazích“ *Arnoldky* je velmi stabilní a je ovlivňována především přenosem tepla z vody (včetně vzdušné vlhkosti) a geologického podloží (geotermický gradient). Teplota venkovního vzduchu má pravděpodobně vliv pouze občasné a nepřímý. Pozornému oku neunikne, že v levé a pravé části grafu je rozptyl měření na jednotlivých stanovištích větší než v centru zobrazení, které reprezentuje hloubku cca 60/70 až 90 m (je to zároveň oblast větší četnosti úžin). Výše položená stanoviště (vlevo) navazují nad *Příbovým dómem* na „dynamický tah“ bloku (A) a jsou v určitém režimu ovlivňována sezónním rytmem (*Hlavní tah* do větší hloubky než *Panoptikální tah*). Děje se tak především v zimním období „naléváním“ chladnějšího vzduchu do relativně objemného *Příbova dómu*, jak lze vysledovat z obr. 3. Nejhlubší partie *Hlavního tahu* (vpravo) jsou naopak kontrolovány teplotou „jezerní“ vody. Její teplotní vývoj např. během povodně 2013 lze nalézt v tab. 2. Protože tzv. geotermický stupeň, který udává ve svislém směru vzrůst teploty jeskynního prostředí cca o 1°C na každý 33. metr hloubky,

pozorujeme u „tahů“ *Arnoldky* jen velmi omezeně (vliv má zřejmě také typ horniny), domníváme se, že stěžejní chod teploty vzduchu u bloků (B) a (C) řídí teplota podzemní vody a průběžný přísun ochlazeného vzduchu z „akumulátoru“ *Příbova dómu*. Toto rovnoměrnost ovlivňování přenosem tepla z horniny, z vody a vzduchu je v souladu s pozorováním, které uvádí LUETSCHER a JEANNIN (2004; viz kap. 1.3.). Protože oba „tahy“ jsou ve spodních částech ovlivňovány velmi obdobně, předpokládáme existenci volných jeskynních prostor pod současným nejnižším místem *Panoptikálního tahu*, přes které je v neustálém tepelném kontaktu s podzemní vodou.

Srovnání sezónních změn teplot vzduchu v „tazích“ (B) a (C) a v *Bludišti* (A) na obr. 12A jasně demonstruje rozdíl v kolísání teploty ve třech hlavních částech *Arnoldky*. Zatímco dynamický systém *Bludiště* (včetně *Mezižebříkové chodby*) má největší rozptyl teplot, na kterém je však zřejmá sezónní variace (nejnižší teploty na jaře a v zimě, nejvyšší v létě a na podzim), tak teploty na „tazích“ žádné významné sezónní změny nevykazují. Také sezónní rozptyl teplot v „tazích“ je výrazně menší než v *Bludišti*, přičemž v *Panoptikálním tahu*, který má „horší průchodnost“ než *Hlavní tah*, je rozptyl teplot nejmenší. Z toho důvodu lze také zvýšení teploty na automatickém čidle Omega v *Dračí tlamě* během podzimu 2009 (etapa I, obr. 9) považovat spíše za měřicí chybu čidla než za reálnou skutečnost, protože během sezónních měření v letech 2013–2015 jsme takovou teplotní anomálii nepozorovali na žádném ze stanovišť v *Panoptikálním tahu* a ani pro takové zvýšení nemáme věrohodné vysvětlení.

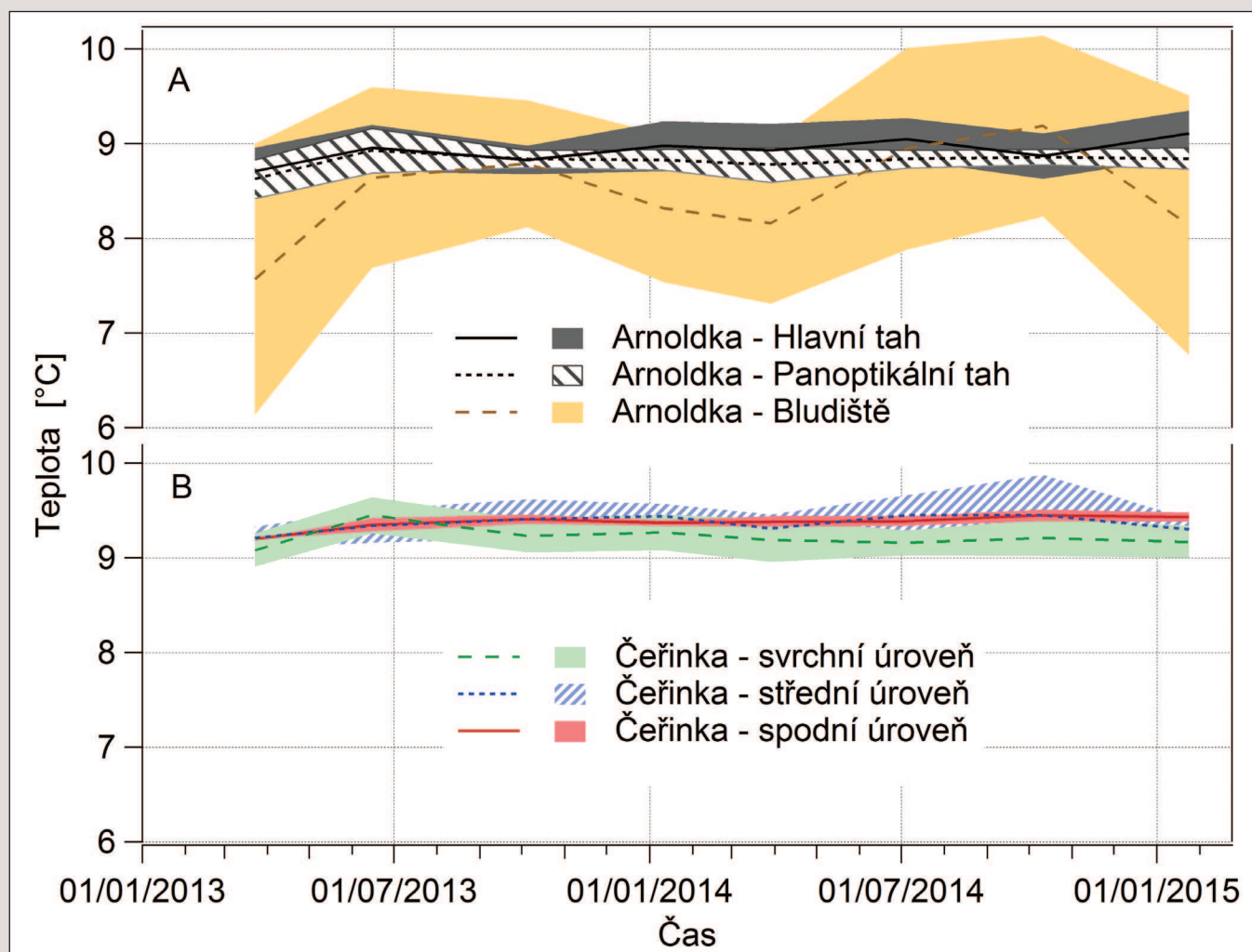
3.1.3. Teploty vzduchu v Čerínce (2013–2015; etapa II)

Podobně jako v *Arnoldce*, byla také data z *Čerínky* (obr. 2 a 3) pro vyhodnocení rozdělena na tři bloky (tab. 2), a to podle skloněných „pater“ na (D) „střední úroveň“ (*Centrální chodba* od vchodu, *Žabí chodba*, *Řícený dóm*, *Krápníková chodba* a okolí), (E) „svrchní úroveň“ (*Galerie* a příslušné chodby nad ní) a (F) „spodní úroveň“ (*Zkracovačka* a okolí *Vodního dómu*; úsek, kam je nutné slaňovat).

Tab. 2. Souhrn výsledných měřených teplot vzduchu v etapě II [°C].

Table 2. A summary of the resulting measurements of air temperatures [°C] in the Arnoldka and Čerínka caves.

číslo PET	lokalizace	nadmořská výška [m n. m.]	číslo nejbližšího měřického bodu	číslo a datum měření							
				1	2	3	4	5	6	7	8
				23.3. 2013	15./16.6. 2013	5.10. 2013	11.1. 2014	29.3. 2014	5.7. 2014	11.10. 2014	24.1. 2015
-	venkovní teplota, průměr	-	-	-2	+23	+9	+5	+16	+24	+16	0
blok A: Arnoldka / Horní vchod – Mlaskačka – Bludiště – Salonky („větrný okruh“)											
1	Mezižebříková chodba	388	6	9,0	11,8	10,2	9,0	9,5	12,9	12,5	9,4
2	Srdcová chodba	370	144	7,9	9,0	8,7	8,1	8,5	9,1	9,2	8,5
20	pod Tobogánem	357	147	7,5	8,2	8,4	8,2	7,6	8,6	8,7	8,2
21	Mlaskačka	344	320	8,1	8,7	8,6	8,5	8,2	8,2	8,9	8,6
22	Poradní dóm	359	151	6,9	7,8	8,3	7,9	7,1	8,2	8,5	8,0
51	Richardova sluj	369	155	neosaz.	neosaz.	neosaz.	neosaz.	6,2	8,1	8,4	8,2
23	Dóm Naděje	362	160	7,0	8,1	8,1	7,8	7,8	8,4	8,6	7,9
24	Jídlna	366	165	5,7	8,1	8,3	7,3	7,8	8,5	8,7	7,0
25	Vstupní chodba	370	168	3,3	7,5	7,8	6,2	7,1	8,2	8,7	5,1
52	U Zárosého netopýra	373	176	neosaz.	neosaz.	neosaz.	neosaz.	6,8	8,2	9,0	3,9
26	Kalcitka	378	186	8,0	8,7	10,3	9,3	8,4	10,4	11,1	9,0
27	Hřebečný dóm	369	213	9,0	9,0	9,1	9,2	9,2	9,2	9,2	9,1
28	Balvanitý dóm	365	243	8,2	8,9	9,1	8,8	8,7	9,0	9,2	9,0
29	Průvanová chodba	359	281	8,1	8,8	9,0	8,8	8,7	9,0	9,2	8,8
53	u Černého esa	363	261	neosaz.	neosaz.	neosaz.	neosaz.	8,7	8,9	9,1	8,8
30	Křížený dóm	365	266	7,8	8,4	8,8	8,4	8,3	8,7	9,0	8,5
31	rozcestí k Balkónu	366	209	7,2	8,0	8,5	8,1	8,1	8,6	8,8	8,2
32	Svině	359	304	8,6	8,4	8,7	8,6	8,7	8,7	8,9	8,8
54	Salonky - u Lahůdek	355	312	neosaz.	neosaz.	neosaz.	neosaz.	8,8	8,9	9,0	8,9
33	Salonky	350	308	8,8	8,9	8,8	8,9	8,9	9,1	9,0	8,9
blok B: Arnoldka / Hlavní tah (Přibův dóm – síň U Krápníku)											
3	Pekáčová chodba	369	137	8,4	8,6	8,8	8,5	8,5	8,9	9,0	8,7
4	Přibův dóm	359	19	8,3	8,6	8,8	8,7	8,5	8,8	8,8	8,7
jez.	Přibův dóm - jezírko	360	136	sucho	8,8	sucho	sucho	sucho	sucho	sucho	sucho
5	rozcestí nad Bistrem	351	23	8,4	9,0	8,7	8,7	8,7	8,8	8,6	8,8
6	u Průhledové plazivky	341	79	8,7	9,4	8,7	8,8	8,8	8,85	8,6	8,9
7	Balvanistě	328	31	8,7	9,0	8,8	8,9	8,9	8,9	8,7	9,0
13	Štěpánova chodba	329	71	8,8	8,9	8,9	8,9	8,9	9,0	8,7	9,0
9	Táborový domek	321	36	8,8	zatop.	zatop.	9,1	9,0	9,0	8,8	9,0
10	u Kleštěnice	308	42	8,9	zatop.	zatop.	9,4	9,2	9,2	9,0	9,2
11	Jezerní dóm	307	44	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	neosaz.	9,25	neosaz.	9,3
8	Netopýří dóm	304	56	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	neosaz.	9,3	9,1	9,3
12*	U Sněhuláka	302	54	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	neosaz.	neosaz.	neosaz.	9,3
jez.	U Sněhuláka - jezero	kolísání	-	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	9,4	9,4	9,2	9,4
12	U Krápníku	297	51	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.
jez.	Hlavní tah - jezero	kolísání	-	9,1	9,0	9,1	9,3	9,4	9,4	9,2	9,4
blok C: Arnoldka / Panoptikální tah (Přibův dóm – Vysoký dóm)											
14	u Tyčkynovy síně	356	94	8,4	8,7	8,75	8,7	8,6	8,7	8,8	8,7
15	nad Panoptikem	344	98	8,6	8,8	8,75	8,8	8,7	8,8	8,8	8,8
16	Panoptikum	341	102	8,8	9,0	8,8	8,8	8,8	8,8	8,8	8,9
17	Dračí tlama	332	108	8,7	9,0	8,85	8,9	8,8	8,85	8,9	8,9
18	U Trychtýře	327	118	8,8	9,2	8,9	8,9	8,8	8,9	8,9	8,9
19	Vysoký dóm	319	127	8,8	zatop.	zatop.	9,0	8,9	9,0	9,0	9,0
jez.	Panoptikální tah - jezero	kolísání	-	neměř.	9,2	9,0	neměř.	9,1	sucho	sucho	sucho
blok D: Čerínka / střední úroveň (vchod – Centrální ch. – Řícený dóm – Krápníková ch.)											
34	Vstupní šachta	392	5	9,0	9,0	9,9	9,65	9,0	9,9	10,5	9,5
36	První horizont	379	10	9,3	9,5	9,5	9,5	9,5	9,6	9,4	9,4
35	Žabí chodba	368	102	9,3	9,3	9,4	9,4	9,4	9,4	9,3	9,3
37	Čekaná	379	111	9,3	9,3	9,3	9,5	9,5	9,5	9,3	9,3
38	Řícený dóm	359	19	9,2	9,4	9,3	9,4	9,3	9,25	9,3	9,3
41	Vlnitá chodba	360	73	9,1	9,2	9,3	9,2	9,3	9,3	9,2	9,2
39	Kráp. ch. pod Bambulí	364	82	9,2	9,5	9,3	9,4	9,2	9,3	9,3	9,2
40	U Zláclonky	367	88	9,3	9,5	9,3	9,5	9,3	9,4	9,3	9,2
blok E: Čerínka / svrchní úroveň (Galerie – Větrná ch. / Strmá ch.)											
42	Komín na Galerii	379	27	9,1	9,4	9,3	9,35	9,3	9,25	9,3	9,2
43	Galerie - proti Větrné	381	49	9,0	9,8	9,2	9,5	9,3	9,2	9,2	9,2
44	Apsida	384	52	9,1	9,5	9,3	9,25	9,3	9,3	9,4	9,1
45	Větrná chodba	396	55	9,4	9,4	9,5	9,4	9,5	9,2	9,5	9,5
46	Brčková chodba	380	46	8,9	9,3	9,0	9,0	8,9	8,95	9,0	9,0
jez.	Brčková chodba - jezírko	379	40	neměř.	neměř.	neměř.	neměř.	8,9	9,0	9,0	9,0
47	Strmá chodba	389	44	9,0	9,3	9,1	9,1	9,1	9,2	9,1	9,2
blok F: Čerínka / spodní úroveň (Zkracovačka – Jezerní prostory)											
48	Zkracovačka	355 ?	-	9,2	9,3	9,35	9,35	9,4	9,4	9,4	9,4
49	Vodní dóm	333	126	9,2	zatop.	9,45	9,35	9,5	9,4	9,5	9,4
50	Protiklonná chodba	348 ?	137	neosaz.	zatop.	9,4	9,4	9,4	9,35	9,4	9,4
jez.	Čerínka - jezero	kolísání	-	9,2	9,4	9,45	neměř.	neměř.	9,45	9,5	9,5



Obr. 12. Průměrné sezónní změny teplot vzduchu (čára) ± směrodatné odchylky (plocha) v jednotlivých částech jeskyní. A: jeskyně Arnoldka, B: jeskyně Čerínka.

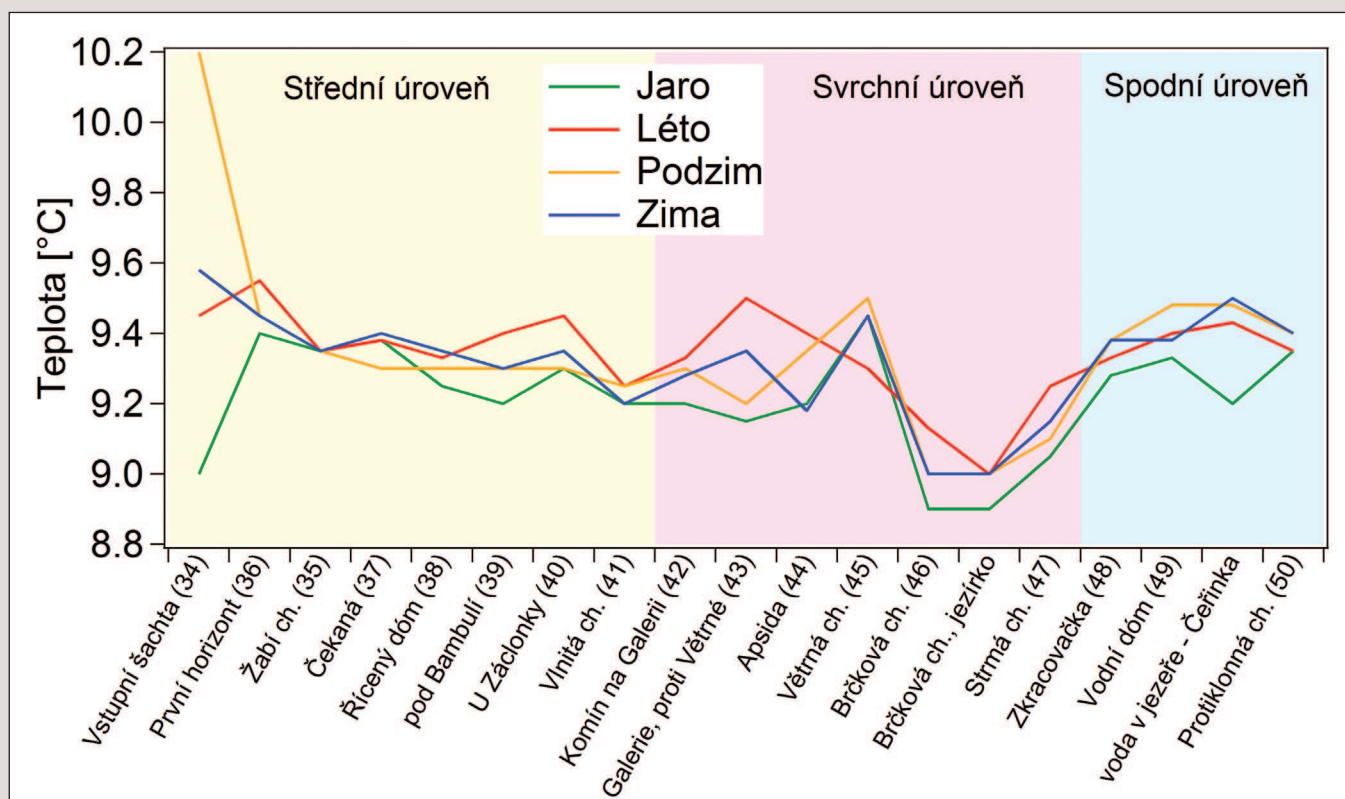
Fig. 12. Average seasonal air temperature variations (lines) ± standard deviation (areas) in different parts of the caves (A) Arnoldka, (B) Čerínka.

Jak ukazuje srovnávací obr. 12B, nalézáme průměrné teploty vzduchu ve všech úrovních jeskyně Čerínka velmi stabilní (pohybují se v rozmezí cca $\pm 0,5^\circ\text{C}$), a to zvláště pokud je porovnáváme s teplotním rozptylem v Arnoldce (obr. 12A). Vyšší rozptyl teplot na střední úrovni Čerínky (D) je způsoben hlavně rozdíly teplot ve Vstupní šachtě (34). Nejmenší rozptyl teplot ve spodní úrovni Čerínky (F) je očekávaný, ale vliv na něj má i skutečnost, že zde bylo nejméně stanovišť (4 včetně teploty jezera). Komplexně jsou však teploty vzduchu v Čerínce o $0,4^\circ\text{C}$ vyšší než v teplotně stabilních „tazích“ Arnoldky (B)+(C), a to ve všech sezónách (obr. 12). Přestože je spodní část (F) jeskyně Čerínka vytvořena v kotýzských vápencích lochkovského souvrství, bohatých na křemité rohovce (ostatní datové bloky obou jeskyní jsou ve vápencích pražského souvrství), nepovažujeme za pravděpodobné, že by rozdíl v teplotách byl způsoben právě vedením tepla v horninách. Příznivější vysvětlení rozdílu průměrných teplot vzduchu ve špatně větraných statických částech Čerínky a Arnoldky spatřujeme spíše v rozdílných teplotách vody (částečně skapové, ale hlavně „jezerní“), která je pravděpodobně hlavním mediátorem přenosu tepelné energie. Tab. 2 ukazuje, že průměrné teploty vody v jezeře Čerínky byly lehce vyšší než v Arnoldce, což mimo jiné hovoří o tom, že jezero v Čerínce může dosahovat větší hloubky než v Arnoldce (závislost teploty podzemní vody na hloubce). Přenos tepla z podzemní vody (jezerní, vztlínající) do ovzduší je tak pravděpodobně hlavním mechanismem ovlivňujícím

teploty vzduchu na většině stanovišť Čerínky. BRUTHANS (1999) ale na základě měření konduktivity nachází shodu skapů s jezerem v Čerínce, zatímco původ jezera v Arnoldce nachází v hlubší struktuře synklinály. Druhý rozdílný faktor spatřujeme v pravděpodobné absenci akumulací chladnějšího vzduchu, jakým díky dynamickému oběhu disponuje Arnoldka.

Pokud se podíváme na sezónní změny teplot v Čerínce na všech měřených stanovištích (obr. 13), tak opět vidíme největší změny ve Vstupní šachtě (34), avšak od ní hlouběji je jeskyně již teplotně „zazátkována“ a teploty ovzduší např. na Prvním horizontu (36) nebo na Čekané (37) jsou již na průměrných hodnotách jako v ostatních částech jeskyně.

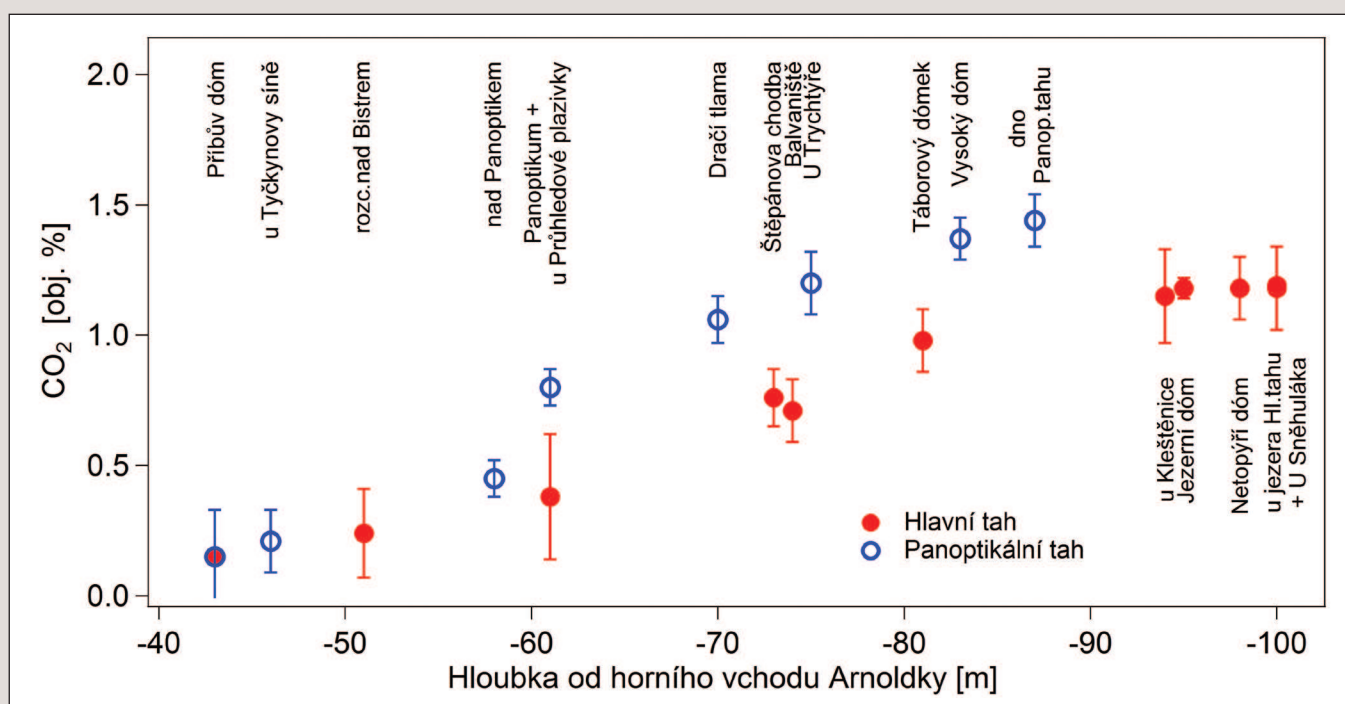
Z hlediska průměrných teplot vzduchu v Čerínce však „vyčnívá“ stanoviště v Brčkové chodbě (46), které má stabilně nižší teplotu (v průměru o $0,33^\circ\text{C}$) než ostatní části jeskyně. Nižší teplota v tomto místě je zvláště překvapivá, neboť se jedná o svrchní úroveň Čerínky (E), ale protože je stabilní ve všech sezónách, tak není pravděpodobně způsobena kolísáním venkovní teploty. Určitým vysvětlením by mohla být varianta, že nižší teplotu zde způsobuje voda, která má v Brčkové chodbě silný skap a mimo jiné vytváří na dně chodby jezírko dlouhé cca 6 m, které má přitom prakticky stejnou teplotu jako je teplota vzduchu (obr. 13). Přenos tepla mezi skapovou vodou a vzduchem se jeví jako nejlepší vysvětlení tohoto lokálního teplotního minima. Alternativní hypotézou je komunikace



Obr. 13. Sezónní změny průměrných teplot vzduchu na stanovištích v Čerínce v letech 2013–2015. Zleva doprava: datové bloky (D), (E) a (F).
Fig. 13. Seasonal variations (green line – spring, red – summer, yellow – autumn, blue – winter) of average temperatures at different sites in the Čerínka Cave in the years 2013–2015. From left to right: data blocks (D, yellow background), (E, purple background) and (F, light blue background).

Brčkové a navazující Strmé chodby s neznámými prostory, o nichž bylo uvažováno také při výsledcích radiotestu (KOLČAVA a ZAPLETAL 2008), které by mohly dotovat tuto část jeskyně chladnějším vzdu-

chem. Pokud by dotace byla formou vody, platily by obě alternativy současně. Dále je zajímavé, že se v datovém bloku (E) nachází i průměrně nejteplejší místo – Větrná chodba (45), což způsobuje



Obr. 14. Průměrné koncentrace CO₂ ± směrodatná odchylka (ze všech měření) na Hlavním a Panoptikálním tahu v Arnoldce v letech 2013–2015; datové bloky (B) a (C).

Fig. 14. Average CO₂ concentrations ± standard deviations (from all measurements) at the Hlavní tah (Main passage) and the Panoptikální tah (Panoptical passage) in the Arnoldka Cave in the years 2013–2015; data blocks (B) and (C).

zřejmě pozice blízko pod povrchem (nejkratší vzdálenost z chodby k povrchu činí 8,8 m). V rámci svrchní úrovně Čerínky (E) tak zároveň mezi stanovišti *Větrná chodba* a *Brčková chodba* existuje nejvyšší teplotní gradient v jeskyni, nepočítáme-li těsné okolí vchodu.

3.2. Výsledky měření koncentrace oxidu uhličitého

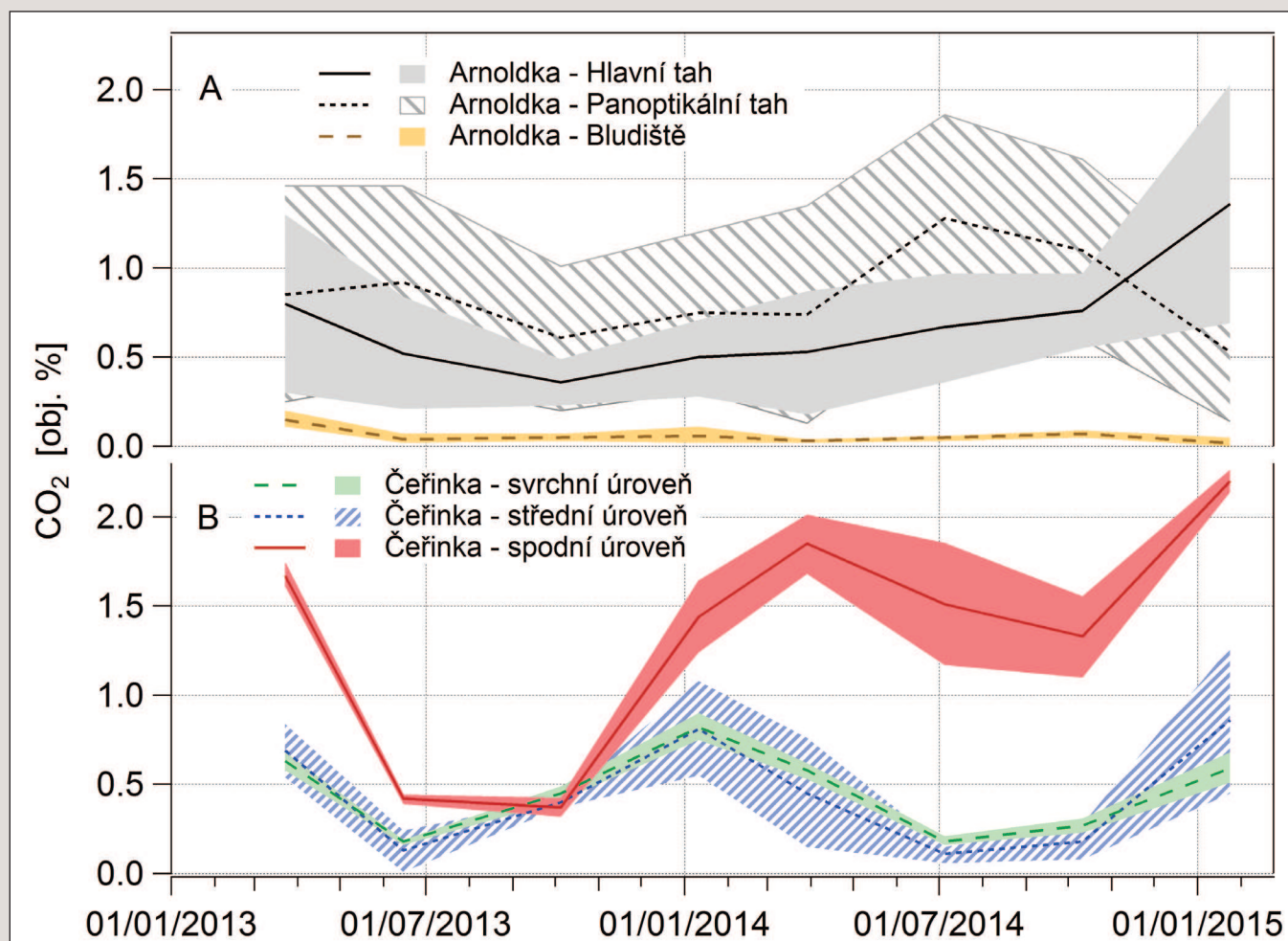
Výsledné měřené hodnoty objemových koncentrací CO_2 v obou jeskyních jsou uvedeny v tab. 3. Ukázkou grafického zpracování výsledků je půdorysné schéma na obr. 5. Kompletní, ale velmi zjednodušený záznam všech výsledků je pak zobrazen řezy na obr. 6.

3.2.1. Koncentrace CO_2 v Arnoldce

Podobně jako u teplot vzduchu jsme v *Arnoldce* porovnávali závislost koncentrací CO_2 na hloubce v blocích (B) a (C), čili v *Hlavním* a *Panoptikálním tahu* – viz obr. 14. Podle očekávání koncentrace CO_2 se vzrůstající hloubkou roste, ale na rozdíl od teplot (obr. 11) nejsou koncentrace CO_2 ve stejných hloubkách shodné. Zhruba od hloubky -60 m od vchodu *Arnoldky* jsou vyšší koncentrace CO_2 v *Panoptikálním tahu*, což je zhruba místo, kde se nachází průlez do *Panoptika*. Důvody mohou být: 1/ „natékání“ CO_2 do *Panoptika* z neznámých prostor, např. v pokračování předpokládané tektonické poruchy jv. směrem k závalu v *Dómu Naděje* v *Bludišti*; 2/ zhoršená ventilace přes úžiny (plazivky) v okolí *Panoptika*; 3/ kvantitativní rozdíl v uvolňování CO_2 ze skapů mezi „tahu“; 4/ kombinace všech variant. V prostoru nad *Panoptikem* je setrvale vyšší skap vody, kte-

rá následně úžinou směrem do *Panoptika* vymývá řídké sedimenty a zároveň tvoří v *Panoptiku* menší občasně jezírko. Lze si představit, že právě ona zde může být potenciale hlavním distributorem CO_2 . Prostor *Panoptikum* spolu s oběma navazujícími plazivkami tvoří v podélném profilu tvar písmene „U“ a tato kompozice pravděpodobně navíc snižuje ventilační schopnosti níže položených prostor. Pokud je tedy vyšší koncentrace CO_2 v *Panoptikálním tahu* způsobena ztíženější ventilací vzduchu než na *Hlavním tahu* a zároveň teploty jsou ve stejných hloubkách zhruba ve shodě (obr. 11), pak se zdá, že teplota je v těchto pasážích jeskyně řízena hlavně přestupem tepla z geologického podloží a vody (jezero, skap, vzdušná vlhkost) než díky obměně vzduchu, což je proti závěrům kap. 3.1.2. v mírné opozici.

Sezónní změny CO_2 v *Arnoldce* (obr. 15A) nejsou příliš patrné. Výše uvedené sezónní změny teploty v bloku (A) *Bludišti* (obr. 12A) jsou způsobeny výměnou a prouděním vzduchu (průvanem) mezi spodním a horním vchodem, čehož důsledkem jsou celoročně nízké koncentrace CO_2 v *Bludišti* (obr. 15A), které jsou téměř na úrovni venkovních koncentrací. Během všech měření nepřekročila koncentrace CO_2 na „větrném okruhu“ a v jeho okolí, včetně nejnižších míst *Mlaskačky* a *Salonků*, 0,5 obj. %. Naopak, slabá ventilace v *Hlavním* a *Panoptikálním tahu* *Arnoldky* se projevuje ve zvýšených hodnotách koncentrací CO_2 . Sezónní variabilitu CO_2 v „tazích“ je, i díky velkému rozptylu hodnot, obtížné analyzovat, ale u *Panoptikálního tahu* lze objektivně vysledovat vyšší koncentrace CO_2 v létě



Obr. 15. Průměrné sezónní změny koncentrací CO_2 (čára) $\pm$ směrodatné odchylky (plocha) v jednotlivých částech jeskyní. A: jeskyně Arnoldka, B: jeskyně Čerínka.

Fig. 15. Variations in average seasonal CO_2 concentrations (lines) $\pm$ standard deviation (areas) in different parts of the caves (A) Arnoldka, (B) Čerínka.

Tab. 3. Souhrn výsledných měřených koncentrací CO₂ [obj. %].Table 3. A summary of the resulting measurements of CO₂ concentrations [vol. %] in the Arnoldka and Čerínka caves.

číslo PET	lokalizace	nadmořská výška [m n. m.]	číslo nejbližšího měřického bodu	číslo a datum měření							
				1	2	3	4	5	6	7	8
				23.3. 2013	15./16.6. 2013	5.10. 2013	11.1. 2014	29.3. 2014	5.7. 2014	11.10. 2014	24.1. 2015
blok A: Arnoldka / Horní vchod – Mlaskačka – Bludiště – Salony („větrný okruh“)											
1	Mezižebříková chodba	388	6	neměř.	0,03	0,08	0,16	0,02	0,03	0,06	0,03
2	Srdcová chodba	370	144	0,21	0,03	0,08	0,14	0,01	0,04	0,06	0,03
20	pod Tobogánem	357	147	0,18	0,03	0,04	0,10	0,03	0,06	0,06	0,1
21	Mlaskačka	344	320	0,18	0,04	0,04	0,12	0,03	0,05	0,06	0,03
22	Poradní dóm	359	151	0,16	0,03	0,03	0,06	0,03	0,07	0,06	0,03
51	Richardova sluj	369	155	neměř.	neměř.	neměř.	neměř.	neměř.	0,05	0,07	0,0
23	Dóm Naděje	362	160	0,15	0,03	0,04	0,04	0,03	0,05	0,06	0,03
24	Jídlna	366	165	0,11	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,06	0,0
25	Vstupní chodba	370	168	0,10	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,06	neměř.
52	U Zaroseného netopýra	373	176	neměř.	neměř.	neměř.	neměř.	neměř.	0,07	0,11	neměř.
26	Kalcitka	378	186	neměř.	neměř.	0,06	0,03	neměř.	0,04	0,05	neměř.
27	Hřebečný dóm	369	213	0,13	0,04	0,04	0,03	0,03	0,05	0,06	0,0
28	Balvanitý dóm	365	243	0,10	0,05	0,04	0,03	0,03	0,05	0,07	0,0
29	Průvanová chodba	359	281	0,12	0,04	0,04	0,03	0,03	0,04	0,08	0,0
53	u Černého esa	363	261	neměř.	neměř.	neměř.	neměř.	0,03	0,02	0,08	0,0
30	Křížený dóm	365	266	0,12	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,09	0,0
31	rozcestí k Balkónu	366	209	0,11	0,05	0,04	0,03	0,04	0,06	0,07	0,0
32	Svině	359	304	0,21	0,10	0,07	0,03	0,05	0,05	0,06	0,03
54	Salony - u Lahůdek	355	312	neměř.	0,09	neměř.	0,03	0,04	0,05	0,11	0,03
33	Salony	350	308	0,23	0,05	0,08	0,08	0,04	0,05	0,12	0,04
blok B: Arnoldka / Hlavní tah (Příbův dóm – síň U Krápníku)											
3	Pekáčová chodba	369	137	0,22	0,07	0,08	0,14	0,02	0,09	0,06	0,03
4	Příbův dóm	359	19	0,23	0,13	0,08	0,18	0,01	0,28	0,23	0,03
5	rozcestí nad Bistrem	351	23	0,19	0,13	0,26	0,16	0,01	0,33	0,51	0,3
6	u Průhledové plazivky	341	79	0,20	0,58	0,41	0,30	0,06	0,32	0,60	0,6
-	Bistro	337	83	neměř.	neměř.	neměř.	0,39	0,14	0,34	0,67	0,8
-	rozcestí pod Bistrem	337	28	neměř.	0,68	0,45	0,39	0,30	0,35	0,68	0,8
7	Balvaniště	328	31	1,06	0,78	0,40	0,64	0,45	0,48	0,68	1,2
13	Štěpánova chodba	329	71	1,13	0,83	0,46	0,67	0,50	0,51	0,70	1,3
-	Štěpánova ch. - dno	323	70	1,10	zatop.	0,43	0,63	0,59	0,53	0,70	1,4
-	pod Struhadlem	324	34	neměř.	zatop.	neměř.	neměř.	0,67	0,61	0,72	1,8
9	Táborový domek	321	36	1,25	zatop.	0,40	0,70	0,81	0,99	0,81	1,9
-	rozcestí nad Kleštěnicí	316	39	neměř.	zatop.	zatop.	0,72	neměř.	0,94	0,97	2,0
10	u Kleštěnice	308	42	1,27	zatop.	zatop.	0,68	0,85	1,02	0,98	2,1
11	Jezerní dóm	307	44	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	0,87	0,96	0,99	1,9
-	Jezerní dóm - u jezera	302	47	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	0,88	0,96	0,98	1,9
8	Netopýří dóm	304	56	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	0,88	0,98	0,94	1,9
12*	U Sněhuláka	302	54	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	0,89	1,04	0,94	1,9
12	U Krápníku	297	51	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.	zatop.
blok C: Arnoldka / Panoptikální tah (Příbův dóm – Vysoký dóm)											
14	u Tyčkovny síně	356	94	0,20	0,19	0,16	0,16	0,01	0,49	0,42	0,03
15	nad Panoptikem	344	98	0,20	0,91	0,30	0,38	0,15	0,76	0,70	0,17
16	Panoptikum	341	102	0,40	1,14	0,45	0,53	0,39	1,63	1,45	0,40
17	Dračí tlama	332	108	0,89	1,29	0,86	0,90	0,91	1,61	1,40	0,61
-	Fialový domek	328	113	1,32	1,37	0,91	1,09	1,12	1,62	1,40	0,71
18	U Trychtýře	327	118	1,25	1,39	0,97	1,02	1,14	1,63	1,42	0,78
19	Vysoký dóm	319	127	1,61	zatop.	1,12	1,22	1,46	1,72	1,46	1,02
-	Panoptikální tah - dno	315	130	1,57	zatop.	zatop.	1,31	1,51	1,74	1,45	1,04
blok D: Čerínka / střední úroveň (vchod – Centrální ch. – Řícený dóm – Krápníková ch.)											
34	Vstupní šachta	392	5	0,50	0,03	0,38	0,47	0,04	0,03	0,04	0,49
36	První horizont	379	10	0,57	0,03	0,39	0,64	0,11	0,06	0,06	0,63
35	Žabí chodba	368	102	0,63	0,38	0,38	0,66	0,59	0,14	0,22	0,75
37	Čekaná	379	111	0,56	0,05	0,37	0,69	0,11	0,09	0,08	0,66
-	Centrální - u Zkracovačky	368	15	neměř.	0,03	0,39	neměř.	0,18	0,06	0,09	0,64
38	Řícený dóm	359	19	0,91	0,18	0,39	1,22	0,84	0,11	0,26	1,15
41	Vlnitá chodba	360	73	0,85	0,13	0,43	1,17	0,70	0,12	0,27	1,75
-	Zdobený komín	362	153	neměř.	neměř.	neměř.	neměř.	0,72	0,18	0,27	neměř.
39	Kráp. ch. pod Bambulí	364	82	0,79	0,17	0,45	0,91	0,67	0,13	0,27	1,15
40	U Zláclonky	367	88	0,69	0,15	0,38	0,74	0,58	0,13	0,23	0,55
blok E: Čerínka / svrchní úroveň (Galerie - Větrná ch. / Strmá ch.)											
42	Komín na Galerii	379	27	0,69	0,17	0,40	0,89	0,63	0,17	0,27	0,65
43	Galerie - proti Větrné	381	49	0,59	0,17	0,46	0,83	0,58	0,17	0,27	0,50
44	Apsida	384	52	neměř.	0,18	0,50	0,87	0,59	0,18	0,27	0,65
45	Větrná chodba	396	55	neměř.	0,20	0,50	0,74	0,53	0,19	0,25	0,55
46	Brčková chodba	380	46	0,62	0,17	0,41	0,72	0,52	0,17	0,22	0,50
47	Strmá chodba	389	44	neměř.	neměř.	0,44	0,88	0,62	0,23	0,35	0,70
blok F: Čerínka / spodní úroveň (Zkracovačka - Jezerní prostory)											
48	Zkracovačka	355 ?	?	1,60	0,40	0,38	1,56	1,59	0,84	0,93	2,13
49	Vodní dóm	333	126	1,70	0,43	0,34	1,64	1,93	1,51	1,28	2,28
50	Protiklonná chodba	348 ?	137	1,72	zatop.	0,44	1,23	1,78	1,79	1,54	2,19
-	Římsová chodba	345 ?	134	neměř.	zatop.	0,33	1,22	1,77	1,61	1,27	2,16
-	Schody	350	122	neměř.	neměř.	neměř.	neměř.	1,99	1,68	1,50	2,25
-	Italova chodba	321	129	zatop.	zatop.	zatop.	1,55	2,02	1,64	1,44	2,19

oproti zimním měsícům, což je v souladu s neobvykleji pozorovanou výměnou CO_2 díky různým hustotám teplého a studeného vzduchu (FARCHILD a BAKER 2012).

Při porovnávání jednotlivých sad měření vybočuje stav při rekordně vysokých hladinách jezer po povodni v polovině června 2013, kdy došlo k poklesu koncentrací CO_2 v zatápěných statických částech jeskyní. Tento stav se během následného opadu hladin do podzimu 2013 ještě mírně prohluboval (obr. 6). Během 3. sady měření v říjnu 2013 bylo v prostorách v blízkosti aktuálních hladin zjištěno v *Táborovém dómku* na *Hlavním tahu* v bloku (B) a v *Jezerních prostorách Čerínky* v bloku (F) koncentrace pod 0,5 obj. %. V *Panoptikálním tahu* v bloku (C) se v okolí síně *U Trychtýře* koncentrace pohybovala okolo 1 obj. %.

3.2.2. Koncentrace CO_2 v Čerince

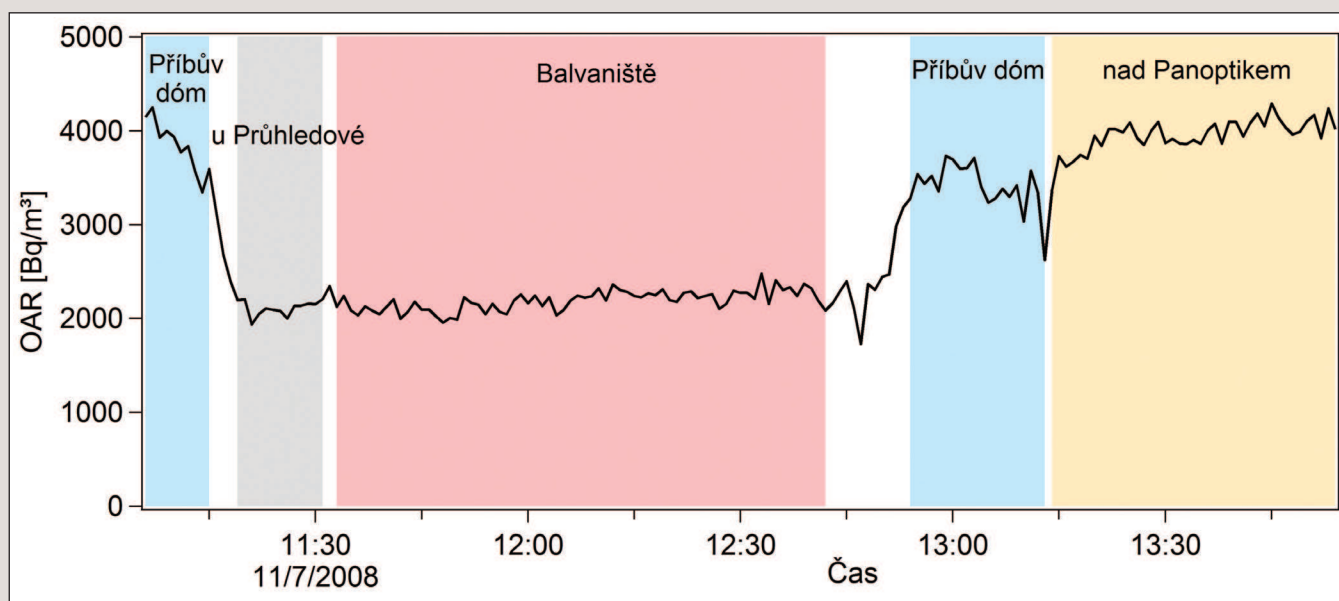
Více než změny teplot je v Čerince zcela evidentní sezónní kolísání CO_2 – viz obr. 15B. Podle očekávání jsou vyšší koncentrace CO_2 na spodní úrovni v bloku (F). Propastovitý průběh jeskyně se vchodem nahoře a s dynamickým prouděním pouze v teoretické úvaze odkazuje obměnu vzduchu jen na sezónní (zimní) rytmus a dává předpoklad nejvyšších koncentrací CO_2 v prostoru *Vodního dómu* a okolí. To je způsobeno tím, že oxid uhličitý je těžší než vzduch a dochází k jeho kumulaci právě v nejnižších partiích jeskyně, jak již zaznělo v kap. 1.4.

Zajímavým zjištěním, které plyne z obr. 15B, je ale skutečnost, že ve všech úrovních Čerínky jsou vyšší koncentrace CO_2 v zimě a na jaře, zatímco v letních měsících jsou koncentrace CO_2 na minimu. Ve statických jeskyních, kde dochází k sezónní obměně CO_2 , to bývá většinou naopak – vyšší koncentrace v létě a nižší v zimě (např. KOWALCZYK a FROELICH 2010). Vysvětlení by bylo možné hledat ve slabé dynamické ventilaci, kterou by jeskyně musela disponovat. Ještě před r. 2008 byl občasné pozorován slabý průvan v oblasti *Krápníkové chodby* a to v *Pizolitovém komínu* (např. dne 13.1.2007) a především v místě *U Záclonky*, kde se nachází vrt ze 3. etáže, jehož ústí mělo vůči vchodu převýšení 8 m. V r. 2008 však byla příslušná část lomu zasypána odvalem a tyto ventilace s prav-

děpodobností zcela zanikly; rovněž teploty se v *Krápníkové chodbě* v II. etapě měření chovaly staticky.

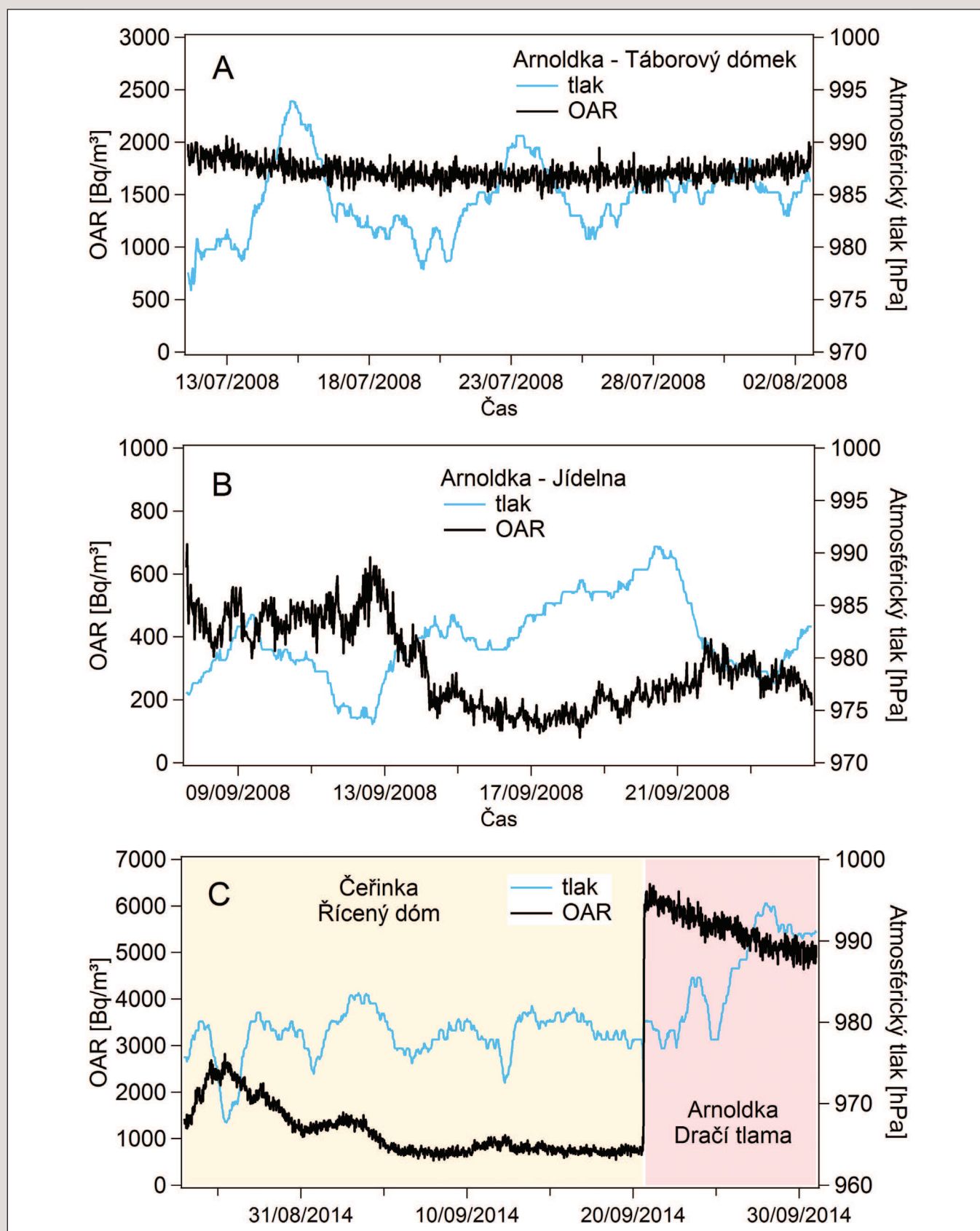
K pomalé ventilaci v Čerince by tedy nejpravděpodobněji mohlo docházet mezi vchodem a *Větrnou chodbou*, jejíž horní „slepý“ konec je nejbližší k povrchu *Paní hory* (8,8 m), a jak napovídá jméno chodby, již objevitelé zde cítili slabý pohyb vzduchu. Ten by také mohl vysvětlovat výskyt sušších sedimentů v chodbě a jejím blízkém okolí oproti ostatním částem jeskyně. Mezi koncem *Větrné chodby* a povrchem *Paní hory* byla radiotestem zjištěna velmi dobrá průchodnost signálu na konkrétní ostře ohraničené místo (KOLČAVA a ZAPLETAL 2008). Geodetické zaměření toto místo usazuje téměř přesně nad konec chodby, který je tvořen stěnou ze suti tmelené jeskynními sedimenty a budící dojem závalu. Lze tedy uvažovat, že zde existuje zcela nebo částečně vyplněný komín na povrch a při průchodnosti vzduchu skrze jeho výplň by dynamiku proudění vyvolávalo převýšení 6,7 m mezi vchodem do jeskyně a tímto místem nad *Větrnou chodbou*. Vzduch hypoteticky procházející mikrotřlinami ve výplni a uvádějící v chod velmi slabou ventilaci by pak snižoval hladinu CO_2 v jeskyni. Jak bylo ukázáno na obr. 12B jsou teploty v Čerince stabilní, z čehož plyne, že k výměně CO_2 v této jeskyni dochází velmi pozvolna (a nikoliv tak dynamicky jako v bloku (A) v *Arnoldce*). Letní nízké koncentrace CO_2 v Čerince tak lze vysvětlit možnou ventilací vzduchu. Otázkou zůstává, proč je v zimních měsících koncentrace CO_2 vyšší a nedochází ke zpětné ventilaci mezi vchodem a potencionálním vyústěním *Větrné chodby* – na povrchu *Paní hory* nad jeskyní totiž nikdy nebyl v zimě pozorován „mastný flek“ v odtátém sněhu, který by značil proudění teplého vzduchu z podzemí ven. Jako hypotéza se nabízí možné zneprůchodnění porů v připovrchové zóně např. zmrazením ledu a tím přerušení ventilace v zimních měsících. Ve stagnujícím ovzduší by se postupně koncentroval CO_2 z různých zdrojů (skap, venkovní atmosféra, uvolňování ze sedimentů aj.).

V literatuře je jako hlavní období pro ventilaci jeskyní, a tím i nižších hodnot CO_2 (ale také radonu), uváděna zima (FARCHILD a BAKER 2012), ale byly popsány i případy jeskyní, kdy je dominantním obdobím pro ventilaci léto – nižší koncentrace v letních



Obr. 16. Záznam objemové aktivity radonu ionizační komorou Radonic 01 pořízený dne 11. července 2008 v úsecích Hlavního a Panoptikálního tahu pod Příbůvým dómem v jeskyni Arnoldka.

Fig. 16. Radon concentration variations recorded by Radonic 01 device in parts of the Hlavní tah (Main Passage) and the Panoptikální tah (Panoptical Passage) in the Arnoldka Cave on July 11, 2008.



Obr. 17. Objemová aktivita radonu měřená přístrojem Radim 3A. A: v Táborovém domečku (stan. 9) ve statické části jeskyně Arnoldka (Hlavní tah), B: v Jídelně (stan. 24) na dynamickém okruhu jeskyně Arnoldka, C: v Říčeném dómu (stan. 38; Čeřinka – vlevo) a následně v Dračí tlamě (stan. 17; Arnoldka, Panoptikální tah – vpravo).

Fig. 17. Radon concentrations measured with Radim 3A device. A: a homothermic part in the Arnoldka Cave which is named the Táborový domek (Camp House, Site 9, the Main Passage), B: a dynamic circuit in the Arnoldka Cave which is called the Jídelna (Dining Room, Site 24, the Labyrinth), C: the Říčený dóm (Rockfall Dome, Site 38; the Čeřinka Cave – left) and subsequently the Dračí tlama (Dragon's Mouth, Site 17; the Panoptical Passage in the Arnoldka Cave – right).

měsících uvádí např. FAIMON, ŠTELCL a SAS (2006) pro *Císařskou jeskyni* v Moravském krasu nebo SÁNCHEZ-MORAL et al. (1999) pro španělskou *Altamiru*, kde v létě pozorovali zvýšení koncentrací CO_2 při deštích. V případě *Čerínky* by hypotetické zastavení ventilace mohla způsobovat každá srážková voda v pórech. Přestože nejvyšší srážkové úhrny ve středních Čechách bývají v květnu až srpnu, jsou v létě deštivá období střídána suchými a horkými, kdy je připo- vrchová zóna schopná vyschnout, zatímco vlhké podzimy a zimy udržují póry zaplněné vodou a vzduch tak nemůže ventilovat. Relativně suché prostředí *Větrné chodby* bez viditelného drénování vody ze „závalu“ lze vysvětlit případnou komplikovaností zaplněných prostor nad chodbou a odtoku vody jinam, např. směrem ke *Strmé chodbě*, kde je prostředí naopak velmi vlhké.

3.3. Výsledky měření objemové aktivity radonu (OAR)

3.3.1. OAR v jeskyních na Paní hoře

Prvotní výsledky měření OAR z července 2008 z kontinuálně měřeného profilu v části statických bloků (B) a (C) v *Arnoldce* pomocí komory Radonic 01 zobrazuje obr. 16. Jak je z grafu patrné, byla aktuální úroveň OAR proměnná s jednotlivými stanovišti. Ve střední části *Hlavního tahu* před úžinami (u *Průhledové plazivky* a níže v *Balvaništi*) se objemová aktivita pohybovala okolo 2 kBq/m^3 , zatímco nad úžinami *Panoptikálního tahu* (prostoru nad *Panoptikem*), byl zjištěn téměř dvojnásobek. Rozdíl mezi „tahy“ nápadně připomíná podobný nesoulad jako u měřených koncentrací CO_2 a lze i pravděpodobně dospět k podobným závěrům (viz kap. 3.2.1.). Zvýšené hodnoty OAR blíží *Panoptikálnímu tahu* byly ale zaznamenány již v *Příbové domě*, kde se oba „tahy“ rozdělují.

Rozdíl mezi blokem (B) a (C) vyplývá také z doplňkového odběru vzorků ovzduší (tab. 4), kde je mimo jiné viditelný nárůst OAR v závislosti na vzrůstu hloubky „tahů“ – (B): *Jezerní dóm* → *Jezero*; (C): *Dračí tlama* → *Vysoký dóm*. Kromě odběrů ale proběhla ve spodních částech „tahů“ podstatnější a dlouhodobější měření na dvou stanovištích a to pomocí přístroje Radim 3A. Na obr. 17A je záznam z *Táborového dómku*, který se nachází zhruba v polovině úžin *Hlavního tahu* v bloku (B). OAR se zde v létě pohybovala v rozmezí $1,5\text{--}2 \text{ kBq/m}^3$, což zhruba koresponduje s údaji předchozích typů měření. Zajímavostí je ale netečnost OAR vůči kolísání atmosférického tlaku. Stanovištěm v bloku (C), rovněž zhruba v centru úžin tentokrát ale na *Panoptikálním tahu*, bylo dno propasti *Dračí tlama*. Počátkem podzimu zde byl zjištěn pohyb hodnot OAR v rozmezí $5\text{--}6 \text{ kBq/m}^3$, což je oproti *Táborovému dómku* přibližně trojnásobek, jak ukazuje graf na obr. 17C. Necháme-li stranou odběrové ionizační komůrky, které nemusí hovořit o celkové situaci na místě a jejichž výsledné hodnoty jsou ovlivnitelné ab-

sorpci prachových částic v okamžiku odběru, tak jsou tyto hodnoty nejvyšší, co jsme v jeskyních na *Paní hoře* naměřili, což na grafu ještě umocňuje předcházející spojitě navazující měření v *Říceném dómu Čerínky*. Hodnoty ale opět korespondují s předchozím zjištěním o nerovnováze mezi „tahy“. Je zde navíc zaznamenán sestupný trend OAR na úkor tlakového vzestupu. Koncentrace radonu v této části jeskyně není ovlivněna atmosférickým tlakem.

Na „dynamickém okruhu“ *Arnoldky* v bloku (A) byl přístroj Radim 3A umístěn v *Jidelně* v *Bludišti* (obr. 17B). „Hlídal“ přelom léta a podzimu a zaznamenal hodnoty v rozmezí $0,1\text{--}0,6 \text{ kBq/m}^3$, tedy hodnoty relativně nízké. Z toho zřetelně vyplývá, že na stavu koncentrace Rn se podobně jako u CO_2 zásadně podílí ventilace jeskynních prostor. V grafu je také pěkně vidět negativní korelace mezi atmosférickým tlakem a OAR, tedy možná schopnost tlaku ovlivňovat uvolňování radonu z horninového prostředí a pohyb vzdušných mas. K dokreslení situace v bloku (A) mohou přispět ještě vzorky z odběrových komůrek na dně *Salonků* a *Mlaskačky* (tab. 4), které již zachytily hodnoty blízké *Hlavnímu tahu*, a které tedy ukazují na statictější prostředí v nejnižších místech tohoto bloku.

Situaci v *Čerince* věrohodně popisuje pouze záznam přístroje Radim 3A v letním období v *Říceném dómu* v bloku (D). Graf na obr. 17C ukazuje kolísání OAR v rozmezí $0,6\text{--}2,8 \text{ kBq/m}^3$ v určité závislosti na tlakových podmínkách. Při porovnání s *Arnoldkou* připomíná záznam mezistupeň mezi statickými bloky (B) a (C) a dynamickým (A), což může způsobovat nezřetelná ventilace řízená propustností výplně nad *Větrnou chodbou* nebo možnost „odtoků“ radonu do několik metrů vzdálené propasti směrem do *Vodního dómu*. Z odběrů ionizačními komůrkami v *Čerince* však vyplývá v průměru vyšší OAR oproti *Arnoldce* (tab. 4); např. nejvyšší údaj byl zaznamenán právě v *Říceném dómu* – $22,5 \text{ kBq/m}^3$. K přesnějšímu posouzení situace v této jeskyni by tedy bylo nutné provést dlouhodobé měření na více stanovištích.

3.3.2. Porovnání výsledků OAR a poznámky ke zdrojům Rn na Paní hoře

Pro porovnání zjištěných výsledků uvedme, že v přízemní atmosféře je OAR zhruba $0,01\text{--}0,05 \text{ kBq/m}^3$. Průměrná koncentrace radonu v obydlích v ČR, stanovená z dosud provedených měření, je přibližně $0,2 \text{ kBq/m}^3$. PLACHÝ (1986) uvádí pohyb OAR v jeskyních v rozmezí cca $1,5\text{--}7,4 \text{ kBq/m}^3$. Z práce ŠLÁDKA (2009) vyplývají hodnoty OAR ve zpřístupněných jeskyních ČR v létě průměrně $4,4 \text{ kBq/m}^3$ (průměr zvyšují extrémy, např. $22,5 \text{ kBq/m}^3$ v *Bozkovských j.*), v zimě pak průměrně $1,2 \text{ kBq/m}^3$. Tyto hodnoty jsou srovnatelné s výsledky naměřenými v jeskyních na *Paní hoře*. V nedostatečně větraných dolech v *Jáchymově* bylo naměřeno

Tab. 4. OAR ze vzorků ovzduší odebraných ionizačními komůrkami 11.–12.7. 2008.

Table 4. Radon concentrations in air samples collected using ionization chambers on July 11–12, 2008.

místo odběru vzorku	číslo nejbližšího měřického bodu	nadmořská výška bodu [m n. m.]	objemová aktivita Rn [kBq/m^3]
Arnoldka (A), Mlaskačka „dno“	320	344,82	2,6
Arnoldka (A), Salonky „dno“	308	350,93	2,6
Arnoldka (B), Jezerní dóm	44	307,93	2,6
Arnoldka (B), Jezero „dno“	50	293,88	4,5
Arnoldka (C), Dračí tlama	108	332,81	8,3
Arnoldka (C), Vysoký dóm	128	317,32	13,5
Čerinka (D), Řícený dóm	19	359,10	22,5
Čerinka (D), U Záclonky	88	367,22	5,3
Čerinka (E), Brčková chodba	46	380,94	8,7

Tab. 5. Hmotnostní aktivita radionuklidů v horninách a krasových výplních Paní hory.
Table 5. Mass activity of radionuclides in rocks and karst fills at Pani hora Hill.

místo odběru vzorku	nejbližší měřický bod	typ vzorku	draslík ⁴⁰ K		thorium ²²⁸ Th		radium ²²⁶ Ra		cesium ¹³⁷ Cs	
			[Bq/kg]	± ch	[Bq/kg]	± ch	[Bq/kg]	± ch	[Bq/kg]	± ch
vzorky odebrané v jeskyních:										
Arnoldka (B), Jezerní dóm	47	kalcitová žíla	5,70	1,75	2,00	0,12	0,07	0,13	ne	
Arnoldka (B), U Krápníku	51	výplň s černými polohami	174,24	6,39	12,11	0,32	9,52	0,32	ne	
Arnoldka (C), Tyčkynova síň	94	jesk. sediment	589,85	20,26	99,76	2,09	32,05	0,78	ne	
Arnoldka (A), Jídelna	165	jesk. sediment	673,02	20,75	93,55	1,78	30,19	0,71	ne	
Čeřinka (E), Brčková chodba	46	jesk. sediment	439,12	15,97	115,83	2,28	18,76	0,61	ne	
Čeřinka (D), U Záclonky	88	jesk. sediment	359,02	11,90	80,76	1,53	17,10	0,50	ne	
Čeřinka (D), Žabí chodba	102	jesk. sediment	108,37	6,94	19,29	0,56	5,94	0,43	ne	
vzorky odebrané mimo jeskyně:										
lom, při ústí Štěpánské propásky	loděnický vápenec		88,56	4,00	6,66	0,20	6,43	0,22	0,29	0,13
lom, stěna u Štěpánské propásky	zvětralý řeporyjský vápenec		746,05	22,78	55,33	1,12	6,97	0,31	2,44	0,27
lom, stěna u Štěpánské propásky	řeporyjský vápenec		394,42	12,66	24,67	0,57	4,14	0,25	3,36	0,18
lom, suťový svah v koutě s. od Arnoldky	zvětralý klastický sediment červené barvy pravděp. řeporyjský vápenec		552,30	17,37	40,68	0,88	14,19	0,39	ne	
lom, suťový svah v koutě s. od Arnoldky	dvorecko-prokopský vápenec		404,23	12,98	15,51	0,38	36,46	0,66	ne	
lom, suťový svah v koutě s. od Arnoldky	dvorecko-prokopský vápenec – žlutý		702,28	21,62	50,26	1,07	46,76	0,92	11,23	0,42
halda	řeporyjský vápenec		190,61	6,68	11,49	0,37	0,64	0,17	ne	

také 270 kBq/m³ (KAFKA et al. 2003), resp. 500 kBq/m³ (např. SKURČÁKOVÁ 2009), což se samozřejmě s prostředím krasových jeskyní nedá srovnávat.

Jak již bylo řečeno a jak z předchozího vyplývá, hlavním zdrojem Rn v jeskyních jsou především jeskynní sedimenty (v prostorách *Paní hory* převládají jíly, které jsou zřejmě z nemalé části autochtonního původu). Ke koncentraci radonu méně přispívá Ra obsažené v horninách, ve kterých jsou jeskyně vytvořeny (vápence, dolomity), a kterými jsou v jeskyních na *Paní hoře* spodnosedonkové vápence. KADLECOVÁ a BARNET (1999) uvádějí v rámci Českého krasu zjištění relativně vysokých OAR (80–300 kBq/m³) ve spodnosilurských černých břidlicích želkovického souvrství, které se nachází cca 350–400 m v hloubce kolmé na vrstevní sled pod bází stupně prag (výpočet z KOVANDA et al. 1984); v okolí báze pragu jsou jeskyně na *Paní hoře*. Teoretický výstup radonem kontaminovaných vod po některém ze zlomů do jeskyní, který by bylo možné uvažovat, se nám ale zdá nepravděpodobný (krátký poločas přeměny Rn vs. dlouhodobá cirkulace hlubokého oběhu vod v lokalitě; nízká koncentrace Rn ve *Svatojanském vývěru*; příliš velká hloubka pod bází kolektoru; dobrá rozpustnost Rn v chladné vodě). Měřením hmotnostní aktivity odebraných horninových vzorků z jeskyní a lomu na *Paní hoře* (tab. 5) byla orientačně zjištěna úroveň přirozené ra-

dioaktivity zdejšího horninového prostředí. Pro přesnější pohled by samozřejmě byla nutná analýza daleko většího množství vzorků. Z porovnání s měřením v turisticky zpřístupněných jeskyních v Čechách (ZIMÁK a ŠTELCL 2005) a části Slovenska (*Demänovské jaskyne*, *Bystrianská*, *Harmanecká*, *jaskyňa Driny* a dalších, ZIMÁK, ŠTELCL a HLAVÁČ 2002) plyne několik pravděpodobných závěrů. Analyzované vzorky z *Paní hory* mají oproti ostatním porovnávaným lokalitám mírně zvýšené množství izotopu draslíku ⁴⁰K (srovnatelné s koněpruským silurem a nekrasovými metamorfy Chýnova). Dále pak povětšinou nižší až výrazně nižší (triasové karbonáty Karpat) obsah radia ²²⁶Ra srovnatelný s Koněprusy a vyšší oproti Chýnovu. A většinou velmi zvýšený obsah thoria ²²⁸Th proti všem ostatním lokalitám (kromě sedimentů *Lepivé chodby* v *Chýnovské jeskyni*) a to např. až cca 35krát proti Harmanci. Rozdíl v thoriu je i oproti vápencům koněpruského devonu, což lze vysvětlit obsahem příměsí v „barevných“ vápencích vyššího pragu, v nichž jsou jeskyně *Paní hory* z nemalé části vytvořeny. Z analýzy je patrné, že vyšší hodnoty vykazují hnědočervené řeporyjské vápence (zastižené v *Arnoldce* bloky (B) a (C)) a nadložní dvorecko-prokopské vápence než pestrobarevné loděnické, v nichž je vytvořena větší část bloku (A) v *Arnoldce* a blok (E) v *Čeřince*. Vyšší koncentrace ²²⁸Th upozorňuje na možnou vyšší koncentraci ²²⁰Rn (thoronu), jehož obvyklý

podíl v jeskyních se předpokládá do 10 % z měřené koncentrace ^{222}Rn (radonu). Tuto skutečnost by bylo vhodné ověřit v další etapě měření. Vzorek sedimentů ze stanoviště *Žabí chodba* v *Čeřince* vybočuje svými nižšími hodnotami a na základě přítomnosti písčité frakce lze uvažovat, že je směsí jeskynních sedimentů s povrchovými splaveninami. Zajímavostí je celkově nízká přítomnost radioizotopů v žíle hydrotermálního kalcitu v *Jezerním dómu* na *Hlavním tahu Arnoldky*, což ale odpovídá běžným resp. velmi nízkým hodnotám koncentrací radionuklidů v kalcitech.

4. Shrnutí nejzajímavějších výsledků a závěry

Analýza výsledků z měření teplot vzduchu, oxidu uhličitého a radonu ukázala, že jeskyně na *Paní hoře* se z hlediska změn klimatu od sebe navzájem liší.

V samotné jeskyni *Arnoldka* je přítomen jak dynamický ventilační okruh (*Bludiště*), tak klimaticky téměř statické části (především *Hlavní* a *Panoptikální tahu*). V oblasti *Bludiště* bylo pozorováno největší kolísání teplot vzduchu a zároveň nejnižší koncentrace CO_2 a Rn, což je způsobeno ventilací vzduchu vyvolanou „komínovým efektem“ mezi horním a spodním vchodem s přispěním několika okolních podružných ventarol. V „tazích“ pod *Příbovým dómem* dochází s přibývajícím hloubkou k přestupu tepla ventilací již jen sporadicky. Důležitou oslabující roli v tom hrají úseky s úžinami. Tepelná energie ve spodních částech „tahů“ je tak majoritně řízena vodou (jezerní, skapovou, vlhkostí) a teplem horninového prostředí, což se s nabývajícím hloubkou projevuje postupným nárůstem teploty o cca $0,1^\circ\text{C}/10\text{ m}$, a to v obou tazích *Arnoldky* zhruba rovnoměrně.

Teplota v *Čeřince* (*Palachově propasti*) je v průměru o cca $0,4^\circ\text{C}$ vyšší než v teplotně stabilních částech *Arnoldky*. Možnou spojitost lze hledat v různé teplotě podzemní vody, která je přes jeskynní jezera pravděpodobně schopná podstatně ovlivňovat teplotu vzduchu ve statických částech, a zároveň v absenci „akumulátoru“ chladnějšího vzduchu, který v *Arnoldce* představuje *Příbův dóm* dotovaný během zimního směru proudění chladným vzduchem z *Bludiště*. V *Čeřince* se teplotně výrazněji odchyluje oblast *Brčkové chodby* a okolí, což je pravděpodobně způsobeno infiltrující vodou ve formě zde velmi obvyklého skapu.

Z hlediska *Arnoldky* a koncentrací CO_2 pozorujeme podle očekávání vyšší koncentrace ve statických částech. Na *Hlavním tahu* však není zřetelný žádný charakteristický trend, zatímco v *Panoptikálním tahu* lze dedukovat vyšší letní a nižší zimní koncentrace CO_2 , což je charakteristické pro výměnu vzduchu díky různým hustotám během různě teplých sezon.

Zajímavé jsou sezónní variace CO_2 v *Čeřince*, kde jsme zaznamenali nižší koncentrace CO_2 v létě zatímco vyšší v zimě, což je opačný trend než je pozorováno u většiny jeskyní, ale nikoliv zcela neobvyklé. Jako možné vysvětlení nabízíme slabou ventilaci mezi hlavním vchodem a hypotetickým vyústěním *Větrné chodby* na povrchu *Paní hory* během letních období, která snižuje hodnoty CO_2 v celé jeskyni. V chladných zimních měsících, kdy má docházet k reverznímu toku vzduchu, pravděpodobně dochází k utěsnění ventilačních mikrotrhlin ve *Větrné chodbě* (ledem nebo vodou tekoucí dolů proti směru ventilace), čímž se jeskyně stává statickou a dochází k postupnému navyšování CO_2 především biogenního původu.

V obou jeskyních se po dobu sledování maximální koncentrace CO_2 pohybovaly kolem 2 obj. %. Z několika stanovišť měření Rn vyplynuly částečně podobné závěry jako u CO_2 . Zatímco v *Bludišti Arnoldky* se na nízké úrovni koncentrace Rn zásadně podílí dynamika jeskynní ventilace, ve statických částech jsou koncentrace Rn až o jeden řád vyšší a málo proměnné. Ve statických větvích byla zjištěna nerovnováha koncentrací mezi stanovišti na *Hlavním*

a *Panoptikálním tahu* ve výši dvoj až trojnásobku ve prospěch druhého. Situace v *Čeřince* připomíná mezistupeň mezi statickými větvemi a dynamickým okruhem *Arnoldky*, což může způsobovat hypotetická propustnost vzduchu ve výplni mezi *Větrnou chodbou* a povrchem.

Maximální hodnoty věrohodných měření objemové aktivity radonu prováděných vždy v časovém úseku léto – podzim dosáhly v *Hlavním tahu Arnoldky* a v *Čeřince* $2\text{--}3\text{ kBq/m}^3$, respektive v *Panoptikálním tahu Arnoldky* 6 kBq/m^3 , což jsou hodnoty zvýšené, ale i tak srovnatelné s některými turisticky zpřístupněnými jeskyněmi v horninách devonského stáří.

Zdrojem radonu v jeskyních na *Paní hoře* jsou především jeskynní sedimenty, méně pak vápence, v nichž jsou jeskyně vytvořeny. Vůči porovnávaným lokalitám mají některé sedimenty vyšší obsahy thoria, což vede k předpokladu vyššího podílu ^{220}Rn v celkové koncentraci radonu, než je obvyklé. Tato skutečnost by mohla být ověřena během dalších etap měření.

Další informace k tématu jsou k dohledání u příslušných lokalit na www.geospeleos.com.

Literatura:

- BARNET I., MIKŠOVSKÁ J. (1998): *Radon a geologie*. – Dostupné na: <http://www.vp-radon.cz/index.php?id=7092&lid=C-Z&oid=1190709>, 29.12.2009.
- BLAŽKOVÁ M. (2010): *Metodika k hodnocení geotermálního potenciálu v modelovém území Podkrušnohoří*. – Univerzita Jana Evangelisty Purkyně, Fakulta životního prostředí: 1–89. Ústí nad Labem.
- BRIESTENSKÝ M., THINOVÁ L., STEMBERK J., ROWBERRY M.D. (2011): The use of caves as observatories for recent geodynamic activity and radon gas concentrations in the Western Carpathians and Bohemian massif. – *Radiation Protection Dosimetry*, 145: 166–172.
- BRUTHANS J. (1999): *Hydrogeologické poměry Českého krasu severně od řeky Berounky*. – Nepublikovaná diplomová práce, Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze: 1–100. Praha.
- BRUTHANS J., FILIPPI M. (1999): Výzkum *Arnoldky* a dalších jeskyní lomu Čeřinka a otázky jejich vzniku a vývoje. – *Český kras*, XXV: 23–30. Beroun.
- CÍLEK V., SLAČÍK J., ŠMEJKAL V. (1992): Mineralogie a geochemie krasu. – In: PŘIBYL J., LOŽEK V., KUČERA B. et al.: *Základy karsologie a speleologie*: 42–55. Academia. Praha.
- FAIMON J., ŠTELCL J., SAS D. (2006): Anthropogenic CO_2 -flux into cave atmosphere and its environmental impact: A case study in the Císařská Cave (Moravian Karst, Czech Republic) – *Science of the Total Environment*, 369: 231–245.
- FARCHILD I.J., BAKER A. (2012): Air circulation. – In.: *Speleothem Science*: 122–137. Wiley-Blackwell.
- HEBELKA J., ROŽNOVSKÝ J. (Eds.) et al. (2011): *Stanovení závislosti jeskynního mikroklimatu na vnějších klimatických podmínkách ve zpřístupněných jeskyních České republiky*. – Správa jeskyní České republiky / Acta speleologica, 3/2011: 1–243. Příhonice.
- HROMAS J., KUČERA B. (1972): Propast na Čeřince v Českém krasu. – *Československý kras*, 22 (1970): 23–34. Praha.
- JANČAŘÍK A. (1976): Nástin dynamiky ovzduší v jeskyních na příkladu horních pater Koněpruských jeskyní. – *Český kras*, I: 7–17. Beroun.
- JANČAŘÍK A. (1977): Návštěvník – speleoklimatický činitel. – *Český kras*, II: 39–46. Beroun.
- JANČAŘÍK A. (1978): Klimatický model dynamické jeskyně. – *Český kras*, III: 38–50. Beroun.
- JANČAŘÍK A., BOTUR J. (1981): K dynamickému odporu proudění. – *Český kras*, VI: 53–57. Beroun.

- JANČAŘÍK A. (1982): Měření obsahu vodního aerosolu v jeskynním ovzduší. – *Český kras*, VII: 50–52. Beroun.
- KADLECOVÁ R., BARNET I. (1999): Objemová aktivita radonu ve známých pramenech Českého krasu. – *Zprávy o geologických výzkumech v roce 1998*: 119–121. ČGS Praha.
- KAFKA J. (Ed.) (2003): Větrání dolů – ochrana před ionizujícím zářením. – In: *Rudné a uranové hornictví České republiky*. – Anagram: 385–392. Ostrava.
- KOLČAVA M. (2004): Nový soupis krasových jevů skupiny 24 v Českém krasu. – *Český kras*, XXX: 4–44. Beroun.
- KOLČAVA M., ZAPLETAL J. (2008): Zpráva o činnosti speleologického klubu ZO ČSS 1-05 Geospeleos z období 2007–2008 v Českém krasu. – *Český kras*, XXXIV: 21–30. Beroun.
- KOLČAVA M. (2013): Sledování hladin podzemní vody v jeskyních na Paní hoře v Českém krasu a jejich abnormální stav v roce 2013. – *Český kras*, XXXIX: 13–24. Beroun.
- KOVANDA J., BRUNNEROVÁ Z., CHLUPÁČ I., HAVLÍČEK V., KLEIN V., KRÍŽ J., LOCHMANN Z., ŠALANSKÝ K., ŠEFRNA L., ŠTYCH J., TOMÁŠEK M., ZELENKA P. (1984): *Vysvětlivky k základní geologické mapě ČSSR 1:25 000, list 12-412 Rudná*. – Ústřední ústav geologický: 1–123. Praha.
- KOWALCZYK A. J., FROELICH P. N. (2010): Cave air ventilation and CO₂ outgassing by radon-222 modeling: How fast do caves breathe? – *Earth and Planetary Science Letters*, 289: 209–219.
- KVAPIL M. (2012): *Dynamika půdního CO₂*. – Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity. Vedoucí práce Jiří Faimon. Dostupné z <http://is.muni.cz>: 1–17. Brno.
- KUZYAKOV Y. (2006): Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. – *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 425–448.
- LANG M., FAIMON J., EK C. (2015): The relationship between carbon dioxide concentration and visitor numbers in the homothermic zone of the Balcarka Cave (Moravian Karst) during a period of limited ventilation. – *International Journal of Speleology*, 44 (2): 167–176.
- LARIO J., SOREL V. (2010): Microclimate monitoring of Pozaluga cave (Vizcaya, Spain): application to management and protection of show caves – *Journal of Cave and Karst Studies*, 72 (3): 169–180.
- LUETSCHER M., JEANNIN P.-Y. (2004): Temperature distribution in karst systems: the role of air and water fluxes – *Terra Nova*, 16: 344–350.
- PLACHÝ S. (1986): Problematika výskytu radonu (²²²₈₆Rn) v jeskyních. – *Český kras*, XII: 77–86. Beroun.
- PORSTENDÖRFER J. (1994): Properties and behaviour of radon and thoron and their decay products in the air – *Journal of Aerosol Science*, 25: 219–263.
- PŘIBIL M. (1999): Záhadná Amerika? 3. díl – Severní překop. – *Krasová deprese*, 7: 25–27. Praha.
- SÁNCHEZ-MORAL S., SOLER V., CAÑAVÉRAS J.C., SANZ-RUBIO E., VAN GRIEKEN R., GYSELS K. (1999): Inorganic deterioration affecting the Altamira Cave, N Spain: Quantitative approach to wall-corrosion (solutional etching) processes induced by visitors – *Science of the Total Environment*, 243/244: 67–84.
- SAS D., SLÁDEK P., NAVRÁTIL O. (2006): Radon and air ion balance. – *Czechoslovak Journal of Physics*, 56: D141–D148.
- SKOKANOVÁ K. (1986): Dceřiné produkty radonu v Koněpruských jeskyních. – *Český kras*, XII: 87–90. Beroun.
- SKURČÁKOVÁ Z. (2009): *Měření radonu v budovách a ochrana obyvatelstva*. – Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity. Vedoucí práce Marek Slobodník. Dostupné z <http://is.muni.cz>: 1–17. Brno.
- SLÁDEK P. (2009): Jeskynní mikroklima a radioaktivita. – In: HROMAS J. (Ed., et al., editoři řady Chráněná území MACKOVČIN P. a SEDLÁČEK M.): *Jeskyně, Chráněná území ČR XIV*: 107–116. AOPK ČR a EkoCentrum. Praha a Brno.
- SOBKOVÁ B. (2010): *Produkce CO₂ v půdách: denní cykly*. – Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta Masarykovy univerzity. Vedoucí práce Jiří Faimon. Dostupné z <http://is.muni.cz>: 1–11. Brno.
- VAUPOTIČ J. 2008. Nanosize radon short-lived decay products in the air of the Postojna Cave. – *Science of the Total Environment*, 393: 27–38.
- ZAPLETAL J., ZAPLETAL M., ŽÁK K. (2011): Nové speleologické objevy ve Studniční jeskyni u Bubovic. – *Český kras*, XXXVII: 55–59. Beroun.
- ZEMAN A., SUCHÝ V. (1999): Vztah hydrotermálních a krasových procesů v Českém krasu: Odpověď na diskuzní příspěvek K. Žáka. – *Český kras*, XXV: 63–67. Beroun.
- ZIMÁK J., ŠTELCL J., HLAVÁČ J. (2002): Přirozená radioaktivita horninového prostředí Harmanecké jeskyně. – *Aragonit*, 7 (1): 21–24. Žilina.
- ZIMÁK J., ŠTELCL J. (2005): Přirozená radioaktivita horninového prostředí v českých jeskyních zpřístupněných pro veřejnost (Bozkovské dolomitové jeskyně, Koněpruské jeskyně, Chýnovská jeskyně). – *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2004*: 126–129. Praha.
- ŽÁK K. (1999): Vztah hydrotermálních a krasových procesů v Českém krasu – diskuze. – *Český kras*, XXV: 53–63. Beroun.
- ŽÁK K., JÄGER O., KOMAŠKO A. (2009): Český kras. – In: HROMAS J. (Ed., et al., editoři řady Chráněná území MACKOVČIN P. a SEDLÁČEK M.): *Jeskyně, Chráněná území ČR XIV*: 155–233. AOPK ČR a EkoCentrum. Praha a Brno.
- Záznamové deníky ZO ČSS 1-05 Geospeleos lokalit: *Arnoldka*: 1. díl (1993–2001), 2. díl (2002–2011), 3. díl (od 2011) a *Čerínka*: 1. díl (1994–2002), 2. díl (2002–2013), 3. díl (od 2013) uložených v archivu Geospeleos v Kladně; pozn.: aktuální (3. díly) slouží přímo v jeskyních k dalším záznamům.