

Hodnocení letního teplotního a vlhkostního profilu propasti Macocha

**Tomáš Litschmann
Jaroslav Rožnovský
Jiří Hebelka**

Abstract

This contribution study the air temperature and humidity profiles during summer period on Macocha abyss. Presented are average values and also distribution of temperatures during typical days with clear sky. Also are processed average daily courses of temperature and humidity.

Key words: Macocha abyss, air temperature, relative humidity.

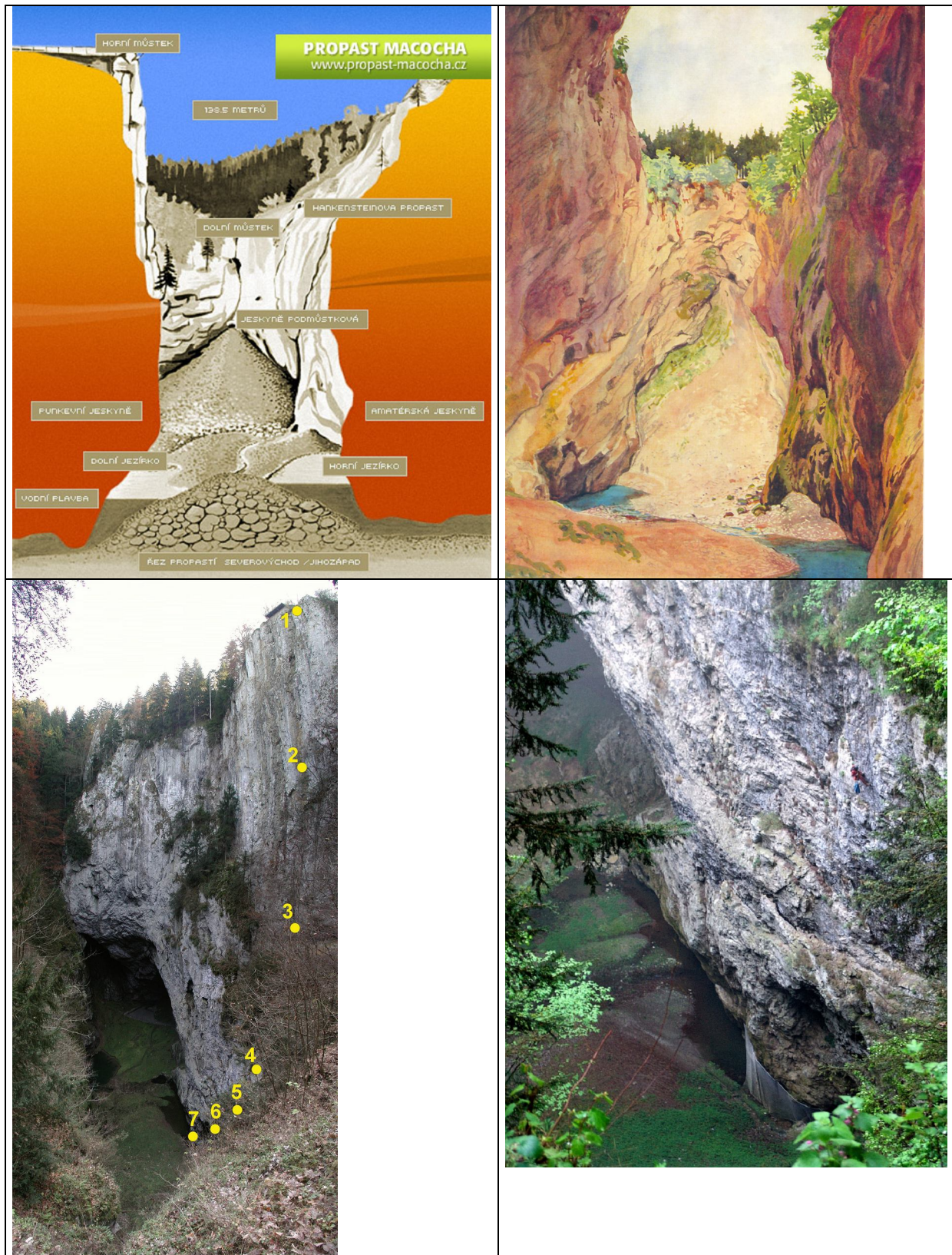
Abstrakt

Příspěvek podává podrobné vyhodnocení teplotních a vlhkostních poměrů naměřených stabilně umístěnými registrátory ve vertikálním profilu propasti Macocha v letním období roku 2008. Zpracovány jsou jak průměrné hodnoty za celé zpracované období, tak i denní chody obou prvků a zpracovány jsou i některé typické dny s radiačním režimem počasí. Jak lze poměrně logicky předpokládat, teplota vzduchu je nejnižší na dně propasti a směrem vzhůru se zvyšuje, stejně tak i variabilita obou prvků. Vlhkost vzduchu je naopak nejvyšší na dně a směrem vzhůru se snižuje. Jelikož je propast orientována podélnou osou přibližně ve směru SZ – JV, dosahují sluneční paprsky do největší hloubky v období kolem 10 hodiny LEČ a proto i maximum teploty v této oblasti nastává ve stejnou dobu, směrem k povrchu se posouvá do poledních až odpoledních hodin. Vzhledem k tomu, že jsou registrátory umístěny na svislé stěně propasti přibližně v místech horního můstku a orientované k SV, dochází po východu nejprve k ozáření horních partií této stěny a teplota vzduchu začíná vzrůstat. Čím více je tato stěna ozářena, zvyšuje se i rychlost anabatického proudění a dochází k rozrušení původně inverzního zvrstvení vzduchu. To má za následek, že po počátečním vzestupu teplot v horních partiích propasti dojde k přechodnému poklesu, avšak již po 11. hodině LEČ dochází k obnovení inverze a teploty ve spodní části (přibližně od hloubky 50 m) začínají opět klesat, nad touto úrovní, kam ještě sahá turbulentní výměna s okolní atmosférou, začínají opět stoupat a kopírují přibližně chod teploty na volném prostranství, ovšem s nižšími hodnotami teploty.

U vlhkosti vzduchu je možno pozorovat, že na dně propasti leží vrstva nasyceného vzduchu s velmi malou denní amplitudou, směrem k povrchu vlhkost klesá nejprve pozvolna, od hloubky 60 m je pak úbytek vlhkosti výraznější. V denním chodu jsou pak největší změny pozorovány opět ve svrchních vrstvách, směrem do hloubky se amplituda vlhkosti snižuje.

Úvod

Macocha, ačkoliv není nejhlubší propastí u nás, je nejrozsáhlejším a pravděpodobně nejznámějším krasovým jevem v České republice. Od roku 1914 je nedílnou součástí veřejnosti přístupných jeskyní Punkevních. Samotná propast vznikla s největší pravděpodobností prolomením zesláblé klenby obrovského podzemního dómu, protékaného ponornou říčkou Punkvou. Splynutím krasové sníženiny na povrchu s jeskyní se otevřela vertikální dutina o dnešní hloubce 138,5 m. Mohutné rozměry propasti umožňují denní osvětlení celé prostory a proto ji v krasové klasifikaci řadíme k propastem typu "light hole". Toto se odráží i v podmínkách klimatických a vegetačních. Ponorná říčka Punkva, která protéká dnem propasti, vzniká soutokem celé řady ponorných vodotečí, které protékají na území vápenců od severu a východu a spojují se v komplexu jeskyně Amatérské (délka jejích dosud známých chodeb je přes 30 km). Nejvýznamnější jsou Sloupský potok a Bílá voda. Hloubka propasti (po hladinu jezírka na dně) je 138,4 m, největší délka 281 m, největší šířka 126 m, délka vlastního jícnu je 114 m. V příčném profilu (obr. 1) lze rozeznat téměř kolmou skalní stěnu, obrácenou k SV, protilehlá strana je tvořena nejprve pozvolnějším svahem, který opět přechází do téměř kolmé skalní stěny.



Obr. 1:

Vlevo nahoře - příčný průřez propastí Macocha. Převzato ze serveru www.propast-macocha.cz.

Vpravo nahoře - první vyobrazení dna Macochy. Akvarel K. Kostrela z r. 1903

Vlevo dole – skalní stěna Macochy s rozmístěním jednotlivých měřících bodů (měřítka je nelineární)

Vpravo dole – instalace registrátorů do stěny Macochy Dr. Zajíčkem

Je zajímavé, že ačkoliv tato propast po staletí přitahovala pozornost speleologů, geomorfologů, hydrologů, básníků, malířů, vybíračů nejrůznějších poplatků, sebevrahů a turistů, z hlediska mikroklimatického zůstává stále ještě poměrně neprobádána, přestože představuje poměrně výrazný konkávní tvar reliéfu, v němž na formování mikroklimatických poměrů působí celá řada faktorů, výrazně modifikujících rovnici energetické bilance. Proto byla k získání podrobnějších informací o mikroklimatu této propasti a okolí na začátku roku 2008 vybudována v rámci projektu „Stanovení závislosti jeskynního mikroklimatu na vnějších klimatických podmínkách ve zpřístupněných jeskyních ČR“ síť několika stanic, měřících základní meteorologické prvky – teplotu a vlhkost vzduchu, úhrn srážek, směr a rychlost větru, globální záření, tlak vzduchu, vlhkost a teplotu půdy. Součástí této sítě je i vertikální profil podél kolmé SV stěny propasti tvořený sedmi samostatnými datalogery, měřícími teplotu a vlhkost vzduchu, umístěnými ve speciálních stínítkách. Předmětem této studie je vyhodnocení teplotních a vlhkostních poměrů v propasti v průběhu letního období 2008 a jejich návaznost na údaje registrované stanicí na okraji propasti.

Materiál a metody

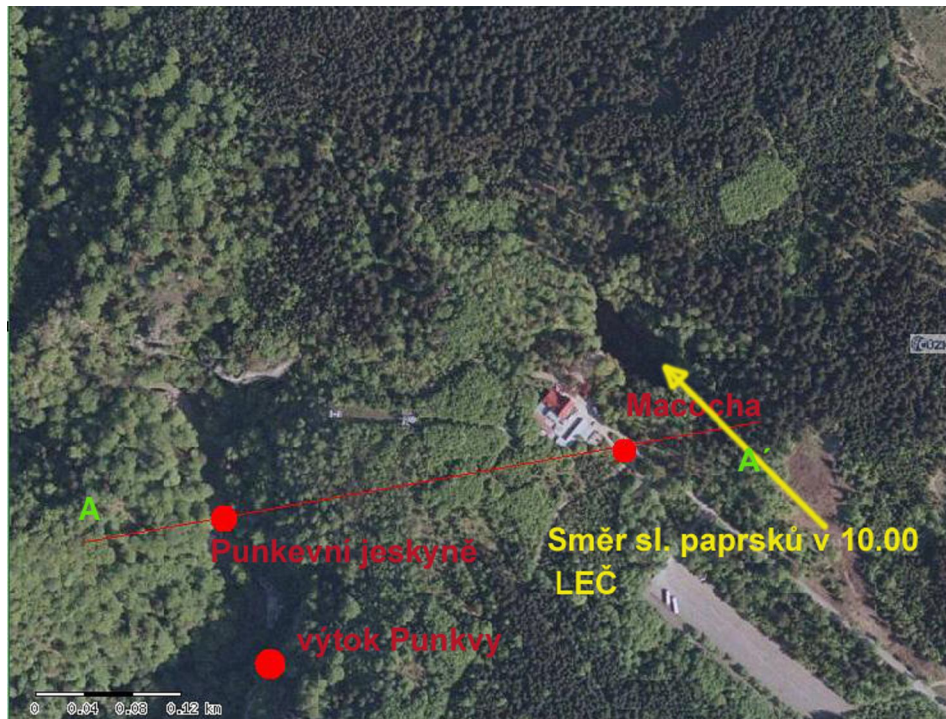
Vertikální profil pro měření teploty a vlhkosti vzduchu byl tvořen sedmi registrátory řady HOBO-PRO (Onset, USA) umístěných pod nerezovými kryty s dvojitou stěnou zavrtanými do svislé skalní stěny obrácené k SV. Vzdálenost registrátorů od stěny je 40 cm. Odečet údajů je prováděn pomocí horolezecké techniky (obr. 1). Kromě toho je v blízkosti okraje propasti nainstalována další meteorologická stanice. Tato stanice se nalézá na travnatém ostrůvku porostlém nízkými dřevinami poblíž příjezdové komunikace k Chatě na Macoše, charakterizuje vyšší části terénu. Stanice je vybavena standardním 10 m vysokým stožárem, na němž je měřena rychlost a směr větru. Vzdálenější okolí je tvořeno smíšeným lesem. Měření jsou další meteorologické prvky: teplota a vlhkost vzduchu, srážky, globální záření, vlhkost půdy, teploty půdy v hloubce 5, 20 a 30 cm, přízemní minimální teplota. Pohled na tuto stanici poskytuje obr. 2, celkový pohled na propast a vzájemná poloha dalších stanic je na obr. 3.

Stanice ležící u výtoku Punky z Punkevních jeskyní měří rovněž teplotu vody v této říčce, která protéká i dnem propasti a může se do jisté míry podílet na modifikaci mikroklimatu v blízkosti jejího dna.

Měření ve svislém profilu probíhají v patnáctiminutových intervalech a byla započata 15.5.2008. V tomto příspěvku jsou zpracovány údaje od tohoto data až do 31.8.2008, jsou tudíž reprezentativní pro značnou část letního období tohoto roku.



Obr. 2: Umístění stanice na horním okraji propasti



Obr. 3: Rozmístění jednotlivých meteorologických stanic v okolí propasti Macocha

Výsledky a diskuse

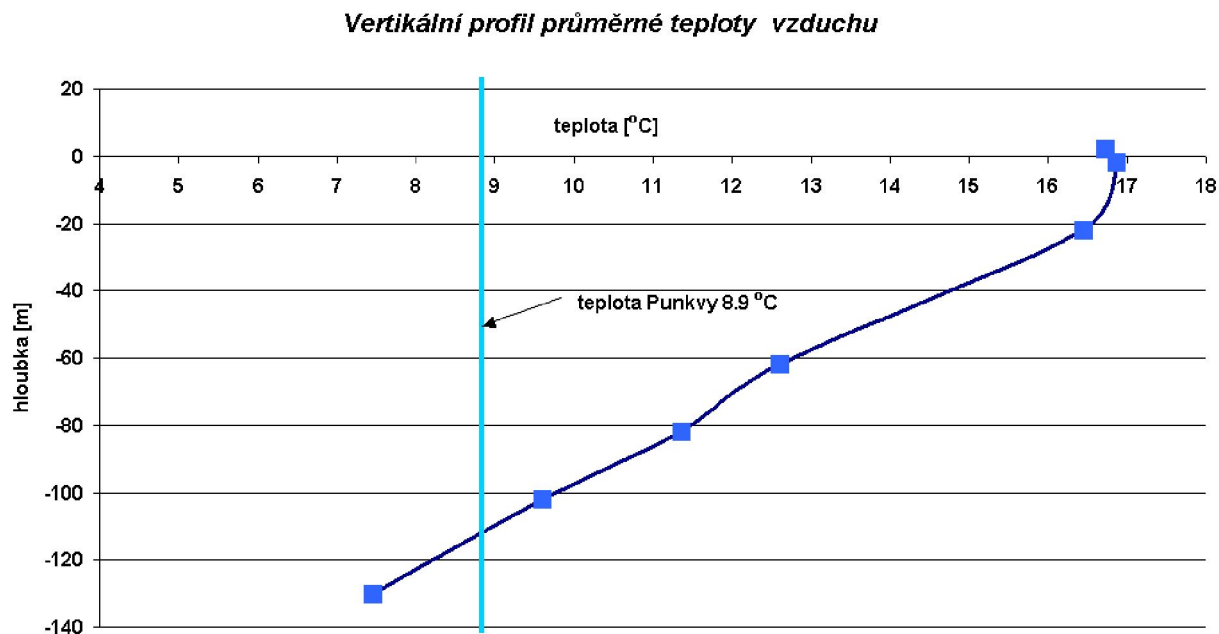
Teplotní poměry

Průměrná teplota vzduchu

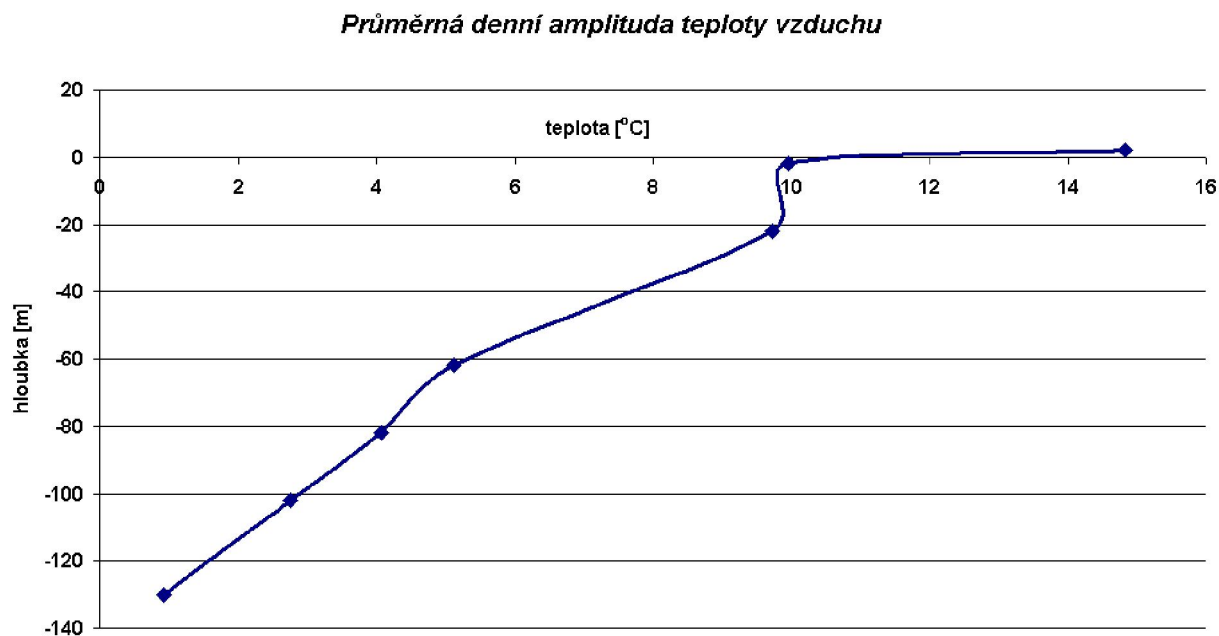
Jak je zřejmé z obr. 4, průměrná teplota vzduchu v propasti ve sledovaném letním období klesala od hloubky 20 m téměř lineárně až ke dnu, kde dosahovala hodnoty 7,5 °C, byla tudíž o něco nižší než je teplota Punkvy u výtoku za stejné časové období. Je to celkem logické zjištění, jelikož lze předpokládat, že ochlazování v této části nastává turbulentní výměnou, zatímco k oteplování dochází pouze kondukcí z vodní hladiny, popřípadě skalních stěn, která má nižší intenzitu.

Ve svrchní části propasti, která se zde nálevkovitě rozšiřuje, je průměrná teplota přibližně stejná jako na povrchu, což dokazuje poměrně intenzivní výměnu vzduchu s okolím.

Přestože jsou teploty vzduchu až do hloubky nejméně 20 m téměř totožné jako na povrchu, lze zde však pozorovat rozdíly ve variabilitě, jak dokazuje obr. 5. Na něm je znázorněna průměrná denní amplituda teploty vzduchu a je zřejmé, že opět od hloubky cca 20 m se lineárně snižuje směrem ke dnu, značný skok v amplitudě se pozoruje mezi horními partiemi propasti a okolním terénem. Na povrchu jsou v důsledku většího ovlivnění aktivním povrchem nižší minima a vyšší maxima teploty vzduchu než nad propastí, kde je ovlivnění aktivním povrchem podstatně nižší.



Obr. 4: Vertikální profil průměrné teploty vzduchu

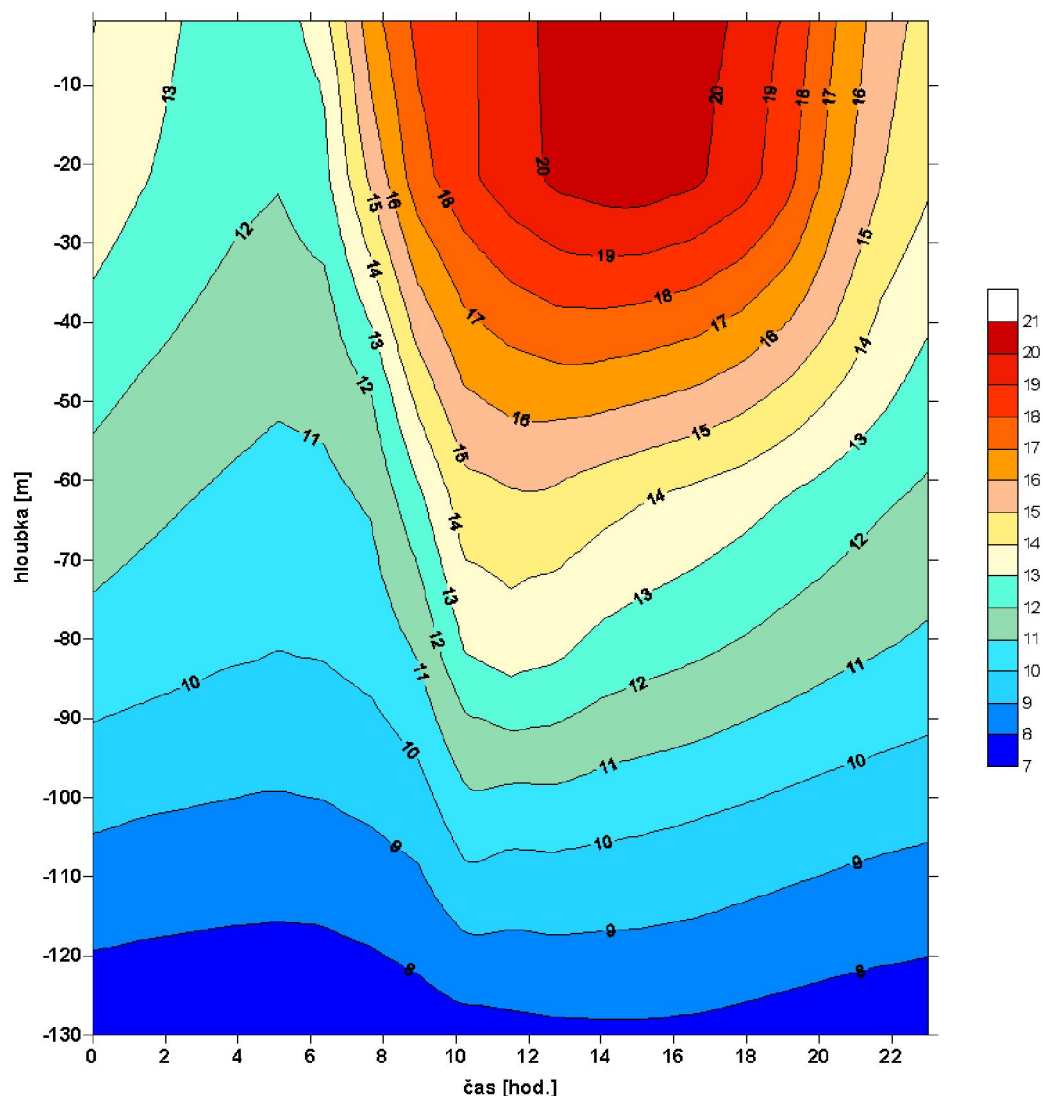


Obr. 5: Průměrná denní amplituda teploty vzduchu

Denní chod teploty vzduchu

Vykreslením průměrného denního chodu teploty vzduchu získáme plastický obraz o změnách této veličiny v jednotlivých hloubkách propasti, polohu maxim a minim a rovněž i amplitudu teploty. Na obr. 6 je pomocí izoterem vykreslena průměrná teplota v jednotlivých hloubkách v průběhu dne pomocí programu Surfer. Jako metoda, poskytující nejvěrohodnější vykreslení izoterem, se ukázala „Triangulation with linear interpolation“. Na uvedeném obrázku je názorně zachyceno, jak dochází

v nočních hodinách k postupnému zaplňování propasti studeným vzduchem, jehož zdrojnicí je podle našeho mínění především plošina kolem ústí propasti, částečně pak i mírněji ukloněné svahy v horní části. Nejnižších teplot je dosaženo v období kolem východu Slunce. Od této chvíle začíná být ozařována skalní stěna s umístěnými registrátory a teplota začíná pozvolna stoupat, se zvyšující se výškou Slunce nad obzorem dochází k prohřívání nižších vrstev. Toto ohřívání trvá do cca 10 hod. LEČ, kdy jsou sluneční paprsky rovnoběžné s podélnou osou propasti a zasahují tudíž nejhluběji, v období kolem letního slunovratu dopadají až na kousek dna v jeho SZ části. Od tohoto okamžiku již paprsky nedopadají přímo na skalní stěnu a teplota vzduchu se začíná opět pozvolna snižovat, přičemž pokles teploty je nejintenzivnější v úzké spodní části propasti s kolmými stěnami, v rozšířené vrchní části maxima teplot přetrvávají déle v důsledku intenzivnější turbulentní výměny vzduchu s okolní atmosférou, jak již bylo naznačeno výše.

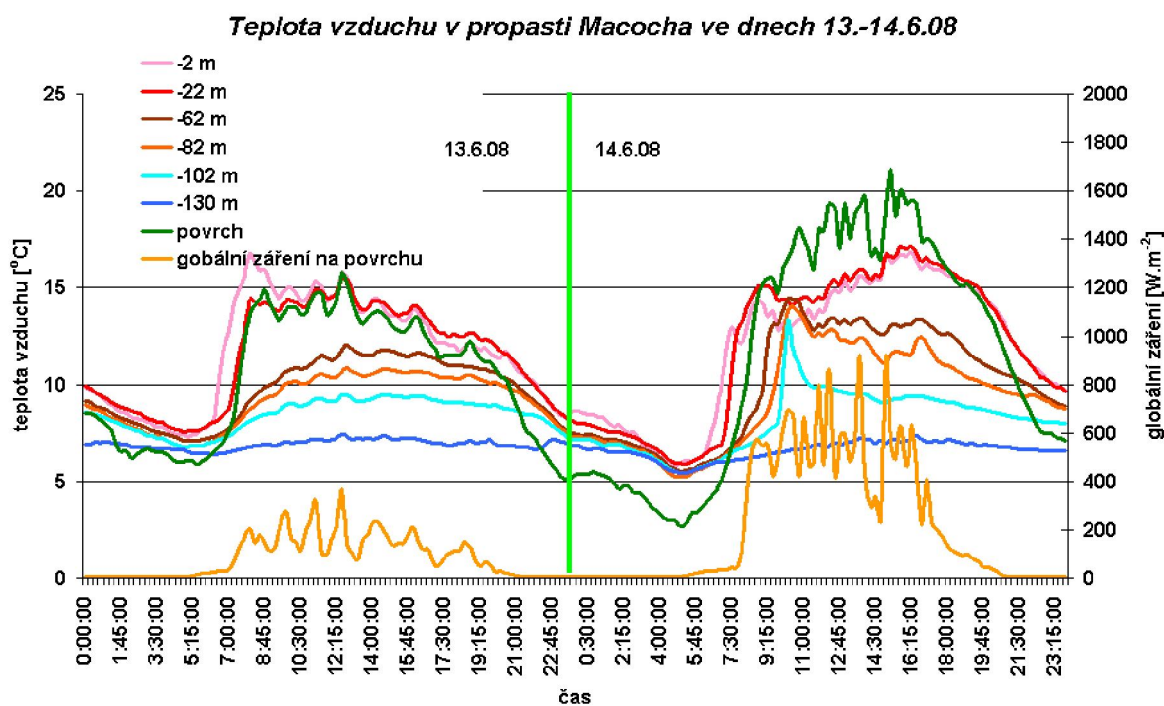


Obr. 6: Průměrné rozložení teploty vzduchu v průběhu dne, čas je v LEČ

Celý tento proces lze názorně dokumentovat na několika vybraných dnech s rozdílnými režimy počasí. Na obr. 7 jsou vykresleny chody teploty vzduchu v jednotlivých vrstvách v propasti a na povrchu včetně hodnot globálního záření ve dnech 13. a 14.6. 2008. Dne 13.6. převažovalo polojasné počasí s rychlostmi větru $2 - 3 \text{ m.s}^{-1}$, teplota vzduchu až do hloubky nejméně 20 m kopírovala poměrně těsně teplotu vzduchu na povrchu, turbulentní výměnou došlo postupně ke zvýšení teploty i v hlubších částech propasti a vytvořilo se zde poměrně ploché maximum teploty, které trvalo až do večerních hodin. Po západu Slunce došlo k vyjasnění a snížení rychlosti proudění, teplota vzduchu na povrchu

začala poměrně rychle klesat a v ranních hodinách dosáhla minima 2.7 °C. Tento studený vzduch začal postupně stékat do propasti, až kolem 5. hodiny ranní byla zaznamenána téměř izotermie v celém vertikálním profilu propasti. Nedošlo k vytvoření žádného jezera studeného vzduchu, jak by se dalo předpokládat, naopak teplota uvnitř propasti byla o několik stupňů vyšší než na přilehlé náhorní plošině a vytvořil se tak spíše ostrov teplého vzduchu. Vyšší teplotu v propasti lze vysvětlit jednak tím, že vzduch klesající do propasti se adiabaticky otepluje, toto oteplení může dosáhnout hodnoty 1 až 1,2 °C. Další zdroje tepla je nutno hledat v okolním skalním masívu a též i v teplotě protékající Punkvy. To vše potvrzuje, že chladný vzduch na dně Macochy v tomto období je spíše alochtonního než autochtonního původu.

Po východu Slunce dne 14.6. se začala postupně prohřívát skalní stěna obrácená k SV a teplota přilehlého vzduchu začala postupně vzrůstat i v hlubších vrstvách. Se zvyšující se mocností ohřátého vzduchu zesilují vzestupné proudy, které postupně nahrazují již ohřátý vzduch v horní části propasti a teplota zde začíná pozvolna klesat, až kolem 10. hodiny LÉČ dojde k vyrovnání teplot téměř v celém svislém profilu podél skalní stěny, s výjimkou nejhlubší části. V následujících hodinách ve svrchní části propasti pak teploty opět začínají stoupat, tak jak se zvyšuje i teplota vzduchu v okolí, od 60-ti m níže nejprve mírně klesají a pak stagnují, ve večerních hodinách dochází k poklesu.



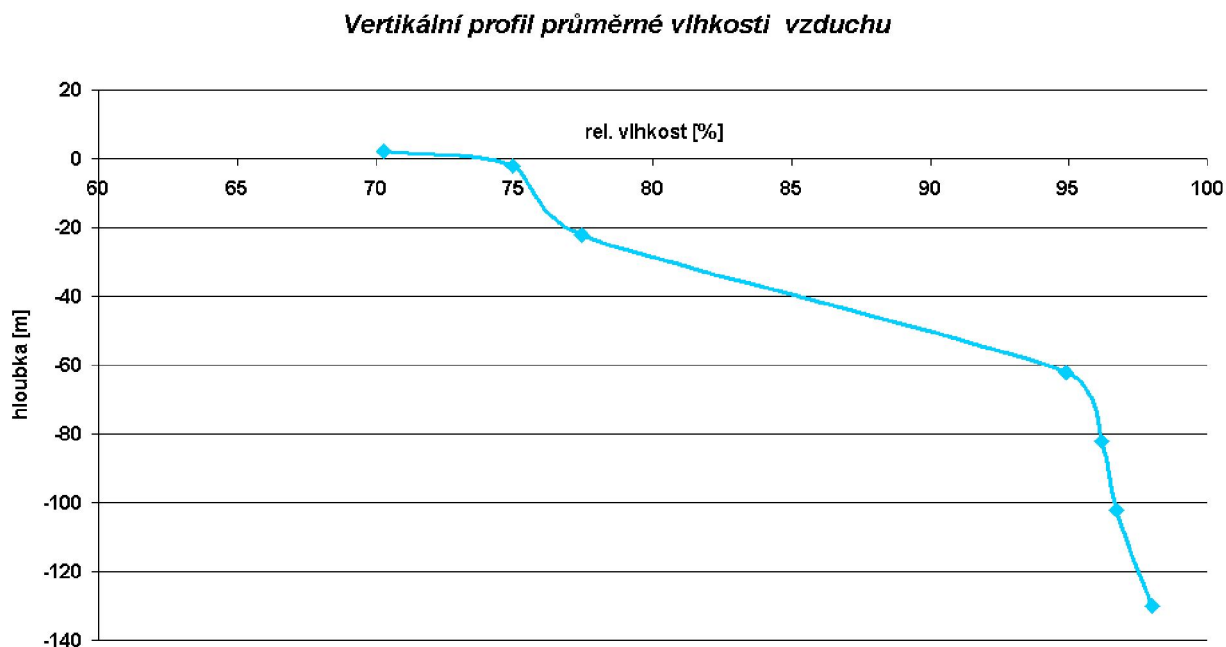
Obr. 7: Teplota vzduchu v propasti Macocha ve dnech 13. - 14.6.2008

Vlhkostní poměry

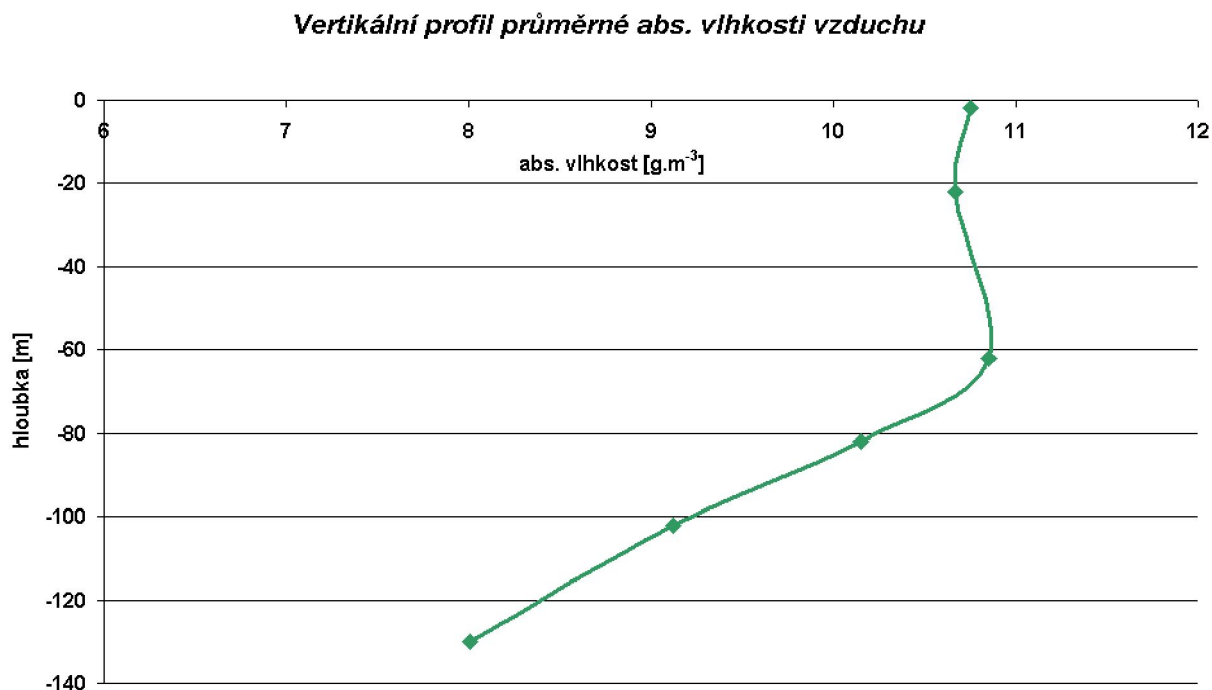
Průměrná vlhkost vzduchu

Obdobné zpracování, jako bylo použito u teploty vzduchu, je aplikováno i na jeho vlhkost. Na rozdíl od teploty vzduchu zde není jednoduchá lineární závislost, jak je zřejmé z obr. 8, v horní části propasti je rel. vlhkost vzduchu přibližně o 5 % vyšší než na volném prostranství, směrem do hloubky však poměrně rychle vzrůstá a od 60 m jsou již hodnoty nad 95 % a směrem ke dnu ještě mírně vzrůstají, vzduch se tak blíží hranici nasycení. Jelikož je rel. vlhkost vzduchu i funkcí jeho teploty a nemůže přesáhnout hranici 100 %, doplňující informace přináší další veličina, kterou je absolutní vlhkost. Na obr. 9 jsou průměrné hodnoty této veličiny opět ve vertikálním profilu propasti. Zde lze vysledovat, že až do hloubky 60 m se udržuje poměrně konstantní absolutní vlhkost, od této hloubky se směrem ke dnu lineárně snižuje v závislosti na tom, jak v této oblasti klesá teplota vzduchu

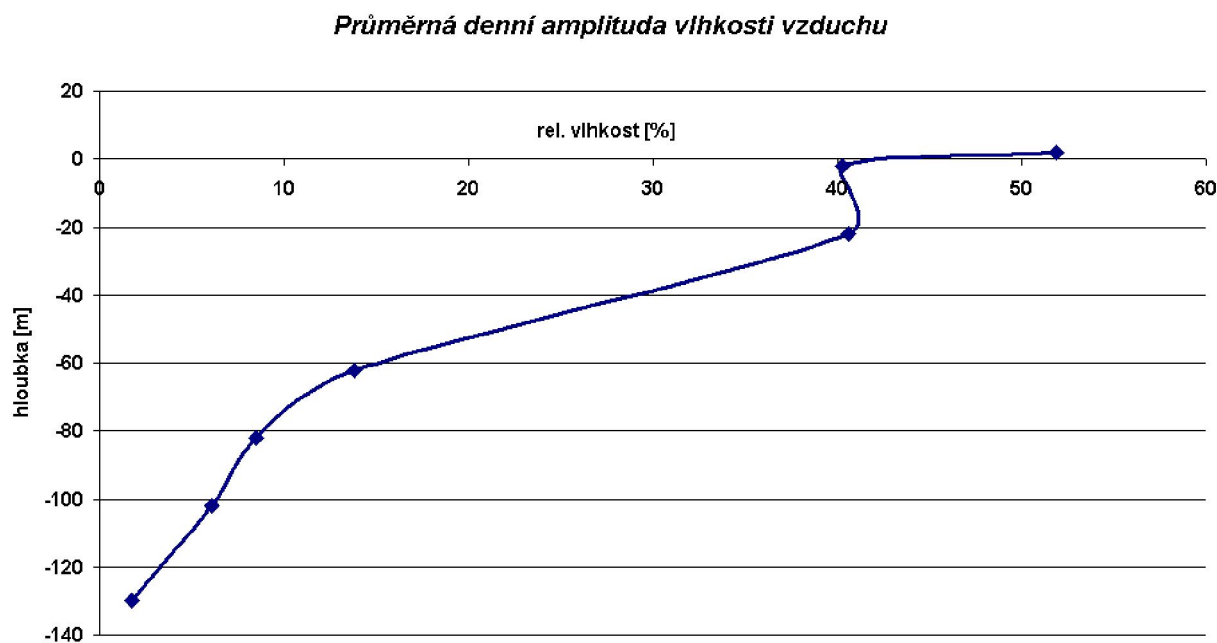
Variabilita relativní vlhkosti vzduchu v profilu propasti, vyjádřená průměrnou denní amplitudou, vykazuje téměř totožné rysy se stejnou veličinou pro teplotu. Na dně propasti je změna pouze několik %, směrem k povrchu průměrná amplituda vzrůstá až na hodnoty kolem 40 % rel.vlhkosti ve svrchní 20 - 40 m silné vrstvě. Na povrchu je pak průměrná amplituda opět vyšší a přesahuje 50 % rel. vlhkosti.



Obr. 8: Vertikální profil průměrné vlhkosti vzduchu



Obr. 9: Vertikální profil průměrné absolutní vlhkosti vzduchu



Obr. 10: Průměrná denní amplituda relativní vlhkosti vzduchu

Denní chod vlhkosti vzduchu

Vykreslením denního chodu můžeme podrobněji poznat změny v rozložení rel. vlhkosti vzduchu veličiny v průběhu dne v jednotlivých vrstvách. Podobně jako pro teplotu vzduchu je to názorně pomocí izolinií provedeno na obr. 11. Na něm je možno najít podobnost s denním chodem teploty vzduchu, poněvadž jak známo, denní chod relativní vlhkosti vzduchu je většinou inverzní k chodu teploty vzduchu. Rozdíl je však možno spatřovat v tom, že relativní vlhkost je ve svých maximálních hodnotách omezena stavem nasycení, tj. hodnotou 100 %. Proto nepřekvapuje, že poměrně značná část propasti, přibližně od hloubky 60 m, je po značnou část dne vyplněna vzduchem s rel. vlhkostí nad 96 %, v průběhu dne se ve střední části snižuje na 92 %. Směrem k ústí propasti, kde se zvětšuje amplituda teploty vzduchu, se zvyšuje rovněž i amplituda vlhkosti vzduchu. Minimum vlhkosti vzduchu je v hloubce pozorováno opět kolem 10. hodiny LEC, směrem k povrchu se minimum posouvá a nejnižších hodnot je dosahováno v odpoledních hodinách, kdy se vyskytují nejnižší hodnoty i nad povrchem okolního terénu.

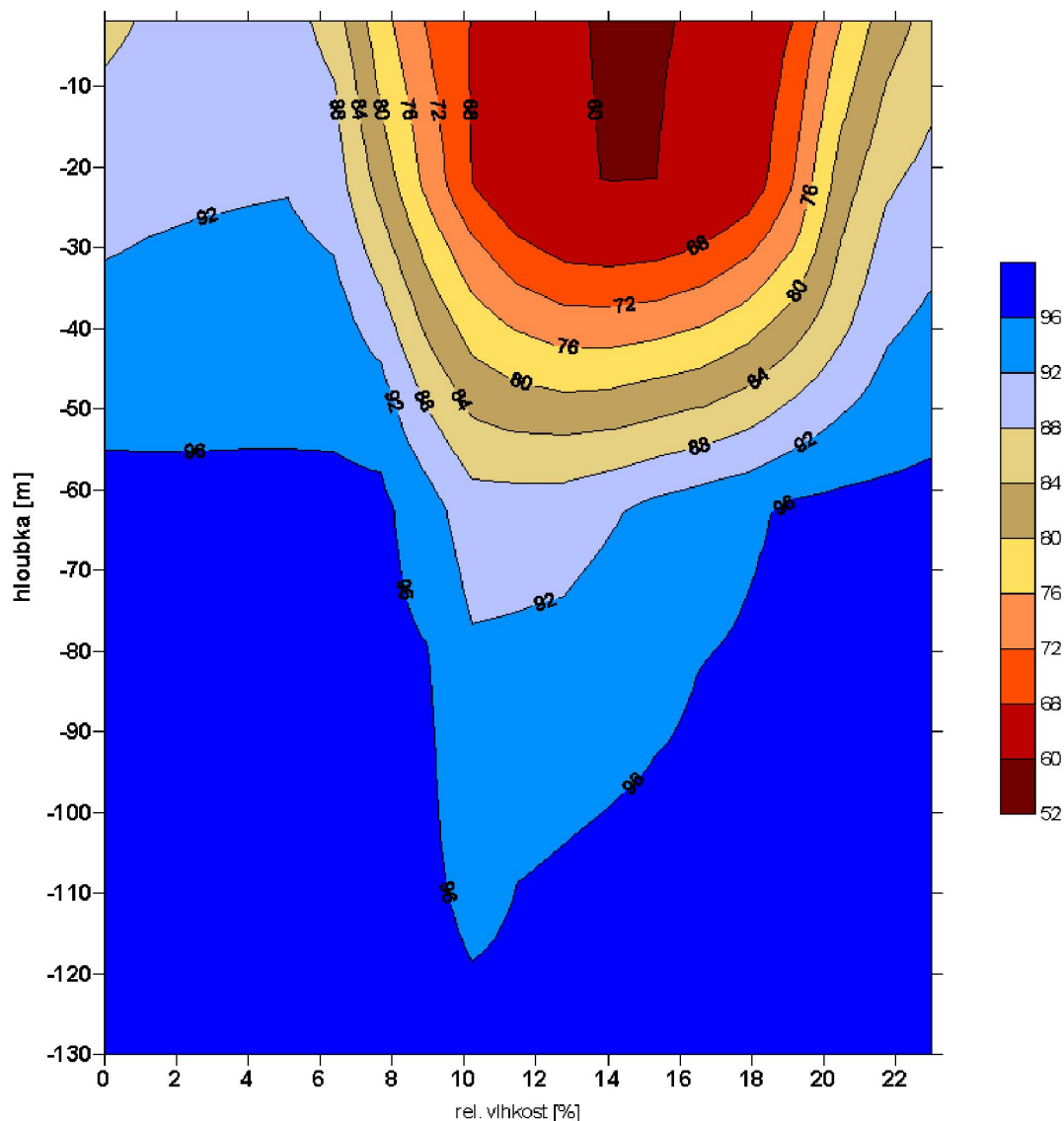
Závěr:

V předloženém článku byla vyhodnocena první měření z dataloggerů nainstalovaných podél svislé SV stěny propasti Macocha a registrujících v pravidelných 15-ti minutových intervalech teplotu a vlhkost vzduchu za období od 15.5. do 31.8.2008. Ukazuje se, že ve svrchní rozšířené části propasti probíhá intenzivnější výměna vzduchu s okolní atmosférou, ve spodní zúžené části k výměně vzduchu dochází v důsledku klesajícího studeného vzduchu za situací, kdy na okolním povrchu je jeho teplota nižší než na dně propasti.

Za jasných dnů, kdy je v ranních hodinách ozářena SV stěna, dochází k výstupným proudům vzduchu podél ní a přibližně kolem 10. hodiny nastává maximum teploty vzduchu v hlubších částech a minimum vlhkosti vzduchu. Směrem k povrchu se tyto extrémy posouvají do odpoledních hodin, tak jak je vzduchu ovlivňován okolní atmosférou.

Je zřejmé, že propast Macocha je trojrozměrným, poměrně rozsáhlým útvarem, takže je velmi obtížné popsat její teplotní a vlhkosní poměry pouze na základě několika bodových měření v jedné svislé

linii. K detailnějšímu poznání by bylo zapotřebí provádět i další měření na protilehlých stěnách. Přesto provedené zpracování může poskytovat relevantní údaje zejména pro hlubší části propasti a pro období bez výraznějšího vlivu přímého záření.



Obr. 11: Průměrné rozložení relativní vlhkosti vzduchu v průběhu dne, čas je v LEČ

Poděkování

Práce vznikla jako součást řešení projektu MŽP ČR „Stanovení závislosti jeskynního mikroklimatu na vnějších klimatických podmínkách ve zpřístupněných jeskyních ČR“, SP/2d5/07.

Děkujeme RNDr. Petru Zajíčkovi za provedení náročné instalace registrátorů v propasti Macocha a sběr dat za použití horolezecké techniky.

Literatura:

Absolon, K.: Moravský kras 1. ACADEMIA, Praha 1970, vyd. 1., 418 s.

Carrasco, F., et al.: Control of environmental parameters for management and conservation of Nerja Cave (Malaga, Spain). Acta Carsologica, 31/1, Ljubljana, 2002, s. 105 - 122

Cigna, A., A.: Modern trend in cave monitoring. Acta Carsologica, 31/1, Ljubljana, 2002, s. 35 - 54

- Forbes, J.: Air Temperature and Relative Humidity Study: Torgac Cave, New Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies* 60(1), 1998:, s 27-32.
- Hebelka J., Piasecki J., Sawiński T., in press: „Air exchange in the Kateřinská Cave – first contribution“; sborník referátů - 6 Scientific Conference “Resarch, Utilization and Protection of Caves”.
- Jernigan , J. W. , Swift, R.J.: A mathematical model of air temperature in Mammoth Cave, Kentucky. *Journal of Cave and Karst Studies* 63(1), 2001: s. 3-8.
- Kunský, J.: Fyzický zeměpis Československa. SPN, vyd., 1., 1968, 537 s.
- Litschmann, T., Rožnovský, J.: Vliv krasového reliéfu na modifikaci vybraných meteorologických prvků. In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed): „Bioklimatologické aspekty hodnocení procesů v krajině“, Mikulov 9. – 11.9.2008, ISBN 978-80-86690-55-1
- Piasecki J., Hebelka J., Łęcarski T., 2002: „Struktura atmosfery w otoczeniu Punkievnych Jaskiń w Moravskim Krasie (Atmospheric Structure in Surrounding of Punkva Caves in Moravian Karst)“; [w:] „Výskum, Využívanie a Ochrana Jaskýň” – sborník referátů, t. 3, s. 139 - 144;
- Piasecki J., Hebelka J., Pflitsch A., Łęcarski T., 2002: „Powolne ruchy powietrza a rozkład pola temperatury powietrza w systemach jaskiniowych (Slow Air Movements versus Air Temperature Distribution in the Caves)“; [w:] „Výskum, Využívanie a Ochrana Jaskýň” – sborník referátů, t. 3, s. 117 -122;
- Piasecki J., Hebelka J., Pflitsch A., Łęcarski T., 2002: „Powolne ruchy powietrza w systemach jaskiń o statycznych cechach klimatu na przykladzie Jaskini Niedźwiedziej i Jaskiń Punkewnych (Slow Air Movements within Static Climate Features as shown in the Niedźwiedzia Cave and Punkva Caves)“, [w:] “Speologický Průzkum a Výzkum v Chráněných Krajinných Oblastech”, sborník referátů, (IX. ročník), s. 98 -107;
- Stoeva, P., Stoev, A: Cave air temperature response to climate and solar and geomagnetic activity. MEM. S.A.It., Vol. 76, 2005, s. 1042 - 1047