

VLIV KRASOVÉHO RELIÉFU NA MODIFIKACI VYBRANÝCH METEOROLOGICKÝCH PRVKŮ

Litschmann Tomáš¹, Rožnovský Jaroslav²

¹AMET Velké Bílovice, ²Český hydrometeorologický ústav, pobočka Brno

Abstrakt:

Krasový reliéf představuje poměrně různorodou mozaiku geomorfologických tvarů, vyskytujících se většinou na relativně malém území. K tomu přistupuje i výskyt víceméně rozsáhlých podzemních dutin, do určité míry propojených s okolní atmosférou. Nejinak je tomu i v Moravském krasu, rozkládajícím se severovýchodně od Brna v pásu širokém 3 – 5 km a dlouhém cca 24 km. Je tvořen střednodevonskými až svrchnodevonskými vápenci s rozsáhlými plošinami zbrázděnými hlubokými, korytovitými i kaňonovitými, většinou suchými údolími.

Jestliže z geomorfologického a speleologického hlediska je Moravský kras poměrně dobře probádán, nedá se to říci o klimatologických, zvláště pak topoklimatologických až mikroklimatologických poměrech, panujících v jednotlivých geomorfologických útvech a o jejich vztahu ke kryptoklimatu jeskyní. Proto byla 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. Použití citlivého sonického anemometru dovoluje měřit i poměrně malé rychlosti a směry větru v hlubokém údolí. Tyto stanice jsou umístěny na náhorní plošině v blízkosti propasti Macocha, u výtoku Punkvy z Punkevních jeskyní a uprostřed Pustého žlebu poblíž místa, nazývaného K. Absolonom „Zobany“. Ke srovnání je možno použít již dříve vybudovanou stanici na bezlesé Ostrovské náhorní plošině. Všechny tyto stanice jsou plně automatizovány s předáváním údajů prostřednictvím sítě GSM na webový server.

Předložená práce popisuje rozdíly v hodnotách meteorologických prvků a jejich charakteristik na jednotlivých měřících stanovištích. Uzavřená poloha na dně žlebového údolí a částečně i uprostřed lesů na Macoše přispívají ke snížení rychlostí větru, což se ve svých důsledcích projevuje i ve zvýšení maximálních teplot vzduchu, za některých situací dochází k tomu, že minimální teploty na dně žlebu jsou vyšší než na náhorních plošinách. Modifikace meteorologických charakteristik je do určité míry ovlivněna i rozvojem vegetace v průběhu roku.

Keywords: kras, mikroklima, globální záření, rychlost větru, teplota

Úvod:

Monitorování jednotlivých parametrů kryptoklimatu patří v současné době již k běžným postupům prováděných ve většině veřejně přístupných jeskyní u nás i v zahraničí. Cílem tohoto monitoringu bývá snaha sladit množství návštěvníků v jednotlivých skupinách a frekvenci vstupů tak, aby nedocházelo k výraznějšímu ovlivnění tohoto kryptoklimatu a narušení ekologické stability jeskynního systému. Kromě návštěvníků však hodnoty meteorologických veličin ovlivňuje do jisté míry i okolní prostředí. Mezi ním a jeskynním prostředím dochází k výměně hmoty a energie prostřednictvím

jednotlivých toků, jejichž směr a velikost je dána jejich gradienty. Je proto zřejmé, že je nutno kromě monitorování vnitřního prostředí provádět i měření parametrů venkovního prostředí v okolí jeskyní.

Přesto, že Moravský kras je unikátní přírodní oblast, nejsou na jeho území prováděna stabilní klimatologická měření. Pouze na třech místech probíhá měření srážek, zajišťované dobrovolnými pozorovateli. V rámci studia mezoklimatu byla proto vybudována síť klimatologických stanic, která od poloviny března 2008 nepřetržitě měří základní meteorologické prvky. Takto naměřené hodnoty z různých míst krasového území na poměrně malé ploše lze

kromě zamýšleného zpracování na poznání vzájemných vazeb mezi vnitřním a vnějším prostředím využít i k bližšímu poznání mezoklimatických podmínek jednotlivých biotopů typických pro krasový reliéf. Jestliže poznávání kryptoklimatu v jeskyních lze založit na dostatečně širokém počtu odborných prací, mikroklimatu krasového reliéfu se věnovalo doposud jen velmi málo studií.

Materiál a metody:

Popis studovaného území a polohy stanic:

Moravský kras je plošina, která je součástí Dražanské vrchoviny. Leží ve výšce 500 – 520 m n.m. Je tvořen střednosedonskými

až svrchnosedonskými vápenci, v němž jsou zahloubena údolí hluboká až 150 m. Moravský kras má podobu pruhu dlouhého 24 km a širokého 3 – 5 km, protáhlého od severu k jihu. Povrch Moravského krasu je zčásti pokryt reliktní červenicí, k níž se mísí spraš a čtvrtohorní zvětraliny vápenců. (Kunský, J., 1968). Je to právě poměrně značná vertikální členitost, která způsobuje rozdílnost mezo až mikroklimatických podmínek na poměrně malé ploše a s tím spojenou rozmanitost ve flóře a fauně.

Vzájemná poloha výše uvedených tří stanic je znázorněna na obr 1, jehož podkladem je fotosnímek studované oblasti.



Obr. 1 Polohy jednotlivých stanic v okolí propasti Macocha

Měření na účelových klimatologických stanicích bylo zahájeno mimo stanice Ostrov v polovině března 2008. Uvádíme bližší popis vybudovaných stanic:

Macocha

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. Měřeny 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.



Obr. 2 Stanice Macocha

Z obr. 2 lze získat podrobnější představu o její lokalizaci.



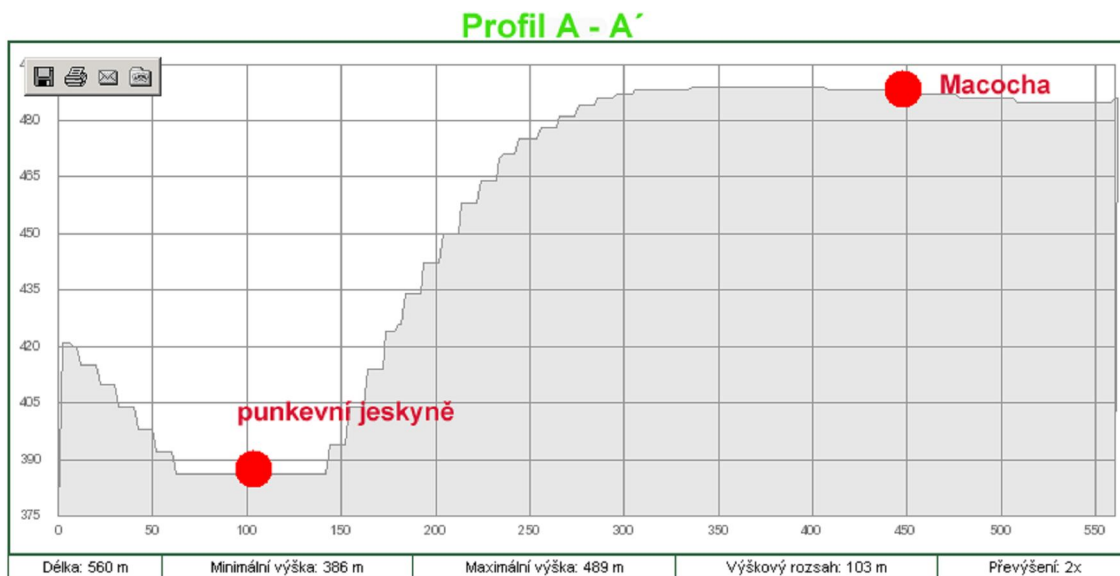
Obr. 3 Stanice Punkevní jeskyně

Punkevní jeskyně

Tato stanice je umístěna v mírně rozšířené části Pustého žlebu mezi vstupem do Punkevních jeskyní a lanovkou spojující Pustý žleb s Macochou, opět na travnatém ostrůvku uprostřed komunikace vedoucí po dně žlebu. Můžeme ji brát pro vyjádření vlivu terénních depresí v Moravském krasu. Širší okolí stanice je podobně jako na Macoše tvořeno porostem smíšených

dřevin. Rovněž rozsah měřených prvků je obdobný jako na stanici Macocha s tím rozdílem, že místo vlhkosti půdy je měřen tlak vzduchu, aby bylo možné srovnávat jeho dynamiku s hodnotami v jeskyni..

Vertikální profil spojnice mezi stanicí Macocha a Punkevní jeskyně je na obr. 3. Výškový rozdíl obou stanic je přibližně 134 m. Pustý žleb má v okolí stanice směr velmi blízký severojižnímu.



Obr. 4 Profil A – A' z obr. mezi stanicí Macocha a Punkevní jeskyně. Převzato z mapového serveru ÚHUL, nadmořská výška stanice je 354 m n.m., zřejmě v členitějším terénu ve žlebu digitální zpracování vykazuje mírné odchylky.

Výtok Punkvy

Tato stanice byla vybudována na levém břehu ponorné říčky Punkvy několik metrů od místa jejího výtoku z Punkevních jeskyní. Monitoruje se zde teplota a vlhkost vzduchu, globální záření, rychlost větru ve výšce 2 m a teplota Punkvy. Vzhledem k předpokládaným nízkým rychlostem

větru v tomto prostoru byl použit 2D sonický anemometr od firmy Gill, zatímco na všech ostatních stanicích je nainstalován anemometr s Robinsonovým křížem od firmy J. Tlustýák Praha.

Pohled v letním období na tuto stanici je na obr. 5.



Obr. 5 Stanice u výtoku Punkvy

Ostrov

Tato stanice je umístěna na otevřené náhorní plošině na okraji vesnice Ostrov u

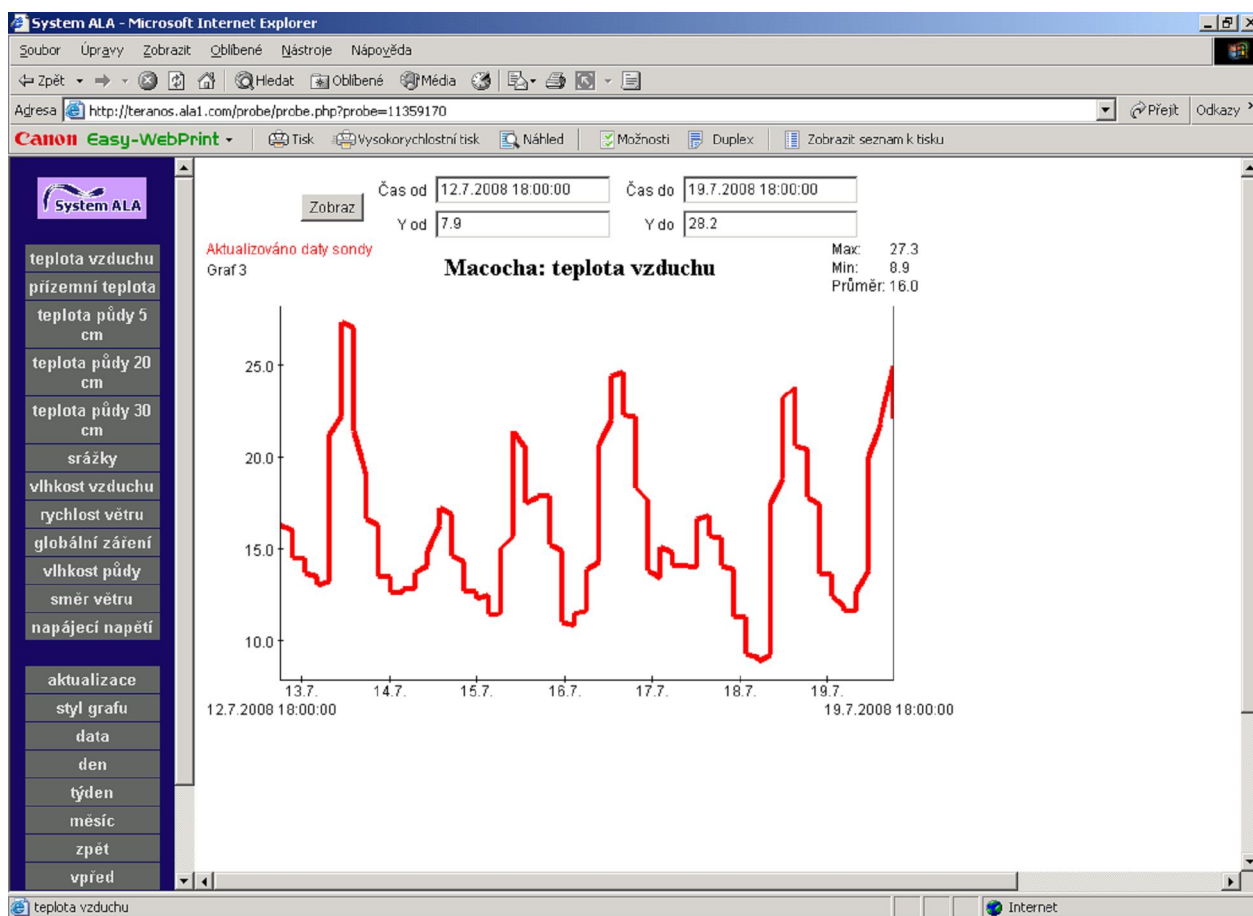
Macochy. Stanice je opět vybavena stožárem na měření směru a rychlosti větru o výšce 10 m, údaje o teplotě a vlhkosti

vzduchu jsou měřeny v klasické meteorologické budce. Pohled na tuto stanici je na obr. 5. Poloha této stanice nejvíce splňuje požadavky kladené na standardní klimato-

logickou stanici, a lze proto její údaje s výhodou používat jako údaje neovlivněné krasovým reliéfem.



Obr. 6 Stanice Ostrov u Macochy



Obr. 7 Znárodnění jednotlivých meteorologických prvků pro stanici Macocha na webovém serveru

Tab. 1 Souřadnice a nadm. výšky jednotlivých stanic

| Stanice | Zem. šířka | Zem. délka | Nadm. výška |
|------------------|-----------------|-----------------|-------------|
| Macocha | 49°22.850' s.š. | 16°43.787' v.d. | 488 m |
| Punkevní jeskyně | 49°22.321' s.š. | 16°43.516' v.d. | 354 m |
| Výtok Punkvy | 49°22.245' s.š. | 16°43.530' v.d. | 347 m |
| Ostrov | 49°23.155' s.š. | 16°45.441' v.d. | 505 m |

Všechny stanice jsou vybaveny solárním napájecím systémem a přenosem údajů prostřednictvím sítě GSM na webový server, z něž je možno si údaje stáhnout v datovém souboru anebo prohlížet na grafech za zvolené období. Aktualizace dat probíhá nejméně jednou denně, u stanice Macocha je to každou hodinu, takže oprávnění zájemci mají možnost sledovat podrobné změny ve vývoji jednotlivých meteorologických prvků na této stanici, zejména pak srážek, které jsou důležitým faktorem při bezpečnosti plaveb na řece Punkvě. Pohled na grafické znázornění jednotlivých veličin na webovém serveru je na obr. 7. Zpracováno bylo období od 14.3.2008 do 31.8.2008.

Výsledky a diskuse:

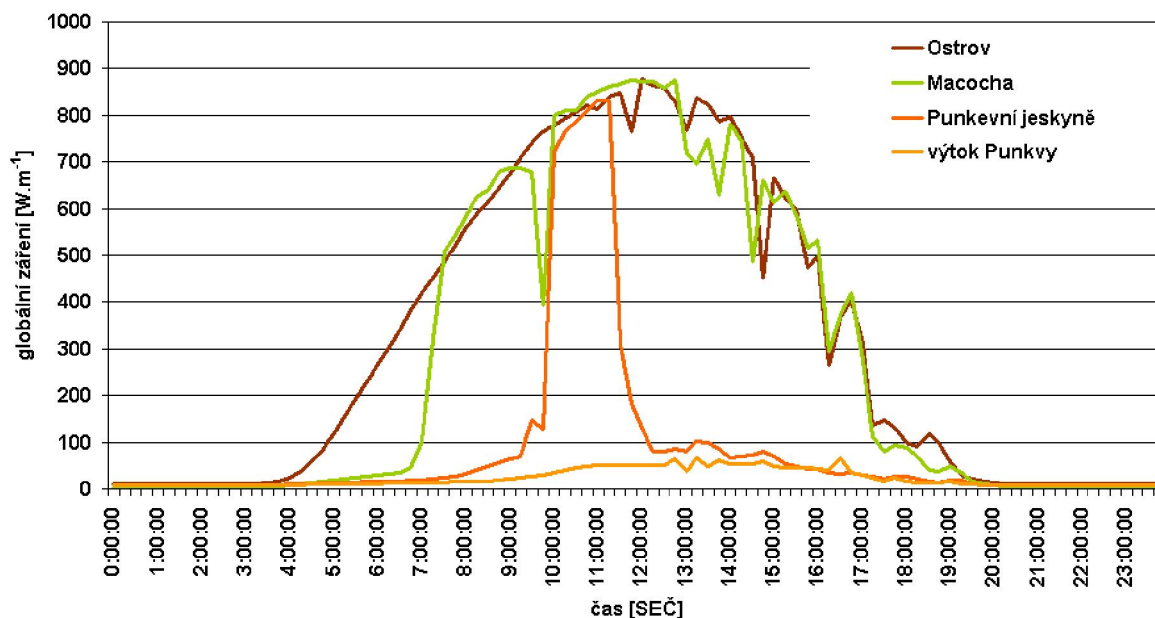
Globální záření

Dříve než provedeme zhodnocení radiačních poměrů na jednotlivých lokalitách za delší časové období, bude užitečné si nejprve prohlédnout obr. 8, na němž jsou vyneseny intenzity globálního záření dne 22.6.2008. Tento den byl vybrán proto, že je velmi blízko termínu letního slunovratu, navíc byl téměř jasný, jen s ojedinělým výskytem kupovité oblačnosti. Obrázek tak poskytuje jednak doklad správné činnosti pyranometrů, neboť v případech, kdy stanice nejsou zastíněny, se jejich hodnoty

téměř shodují (Ostrov, Macocha, Punkevní jeskyně), jednak poskytuje představu o zastínění horizontu za situace, kdy je Slunce nejvýše nad obzorem. Stanice Ostrov má pro tento den ideální horizont bez jakýchkoliv překážek na obzoru. Stanice Macocha je obklopena lesy tak, že pyranometr je zastíněný v ranních hodinách, v dalším průběhu dne dopadají sluneční paprsky přímo na pyranometr a hodnoty jsou téměř totožné se stanicí Ostrov. Naproti tomu ve žlebu jsou radiační poměry naprosto odlišné, přímé sluneční paprsky dopadají ve stanici Punkevní jeskyně pouze dvě hodiny před polednem, ve stanici Výtok Punkvy se vyskytuje pouze difúzní záření.

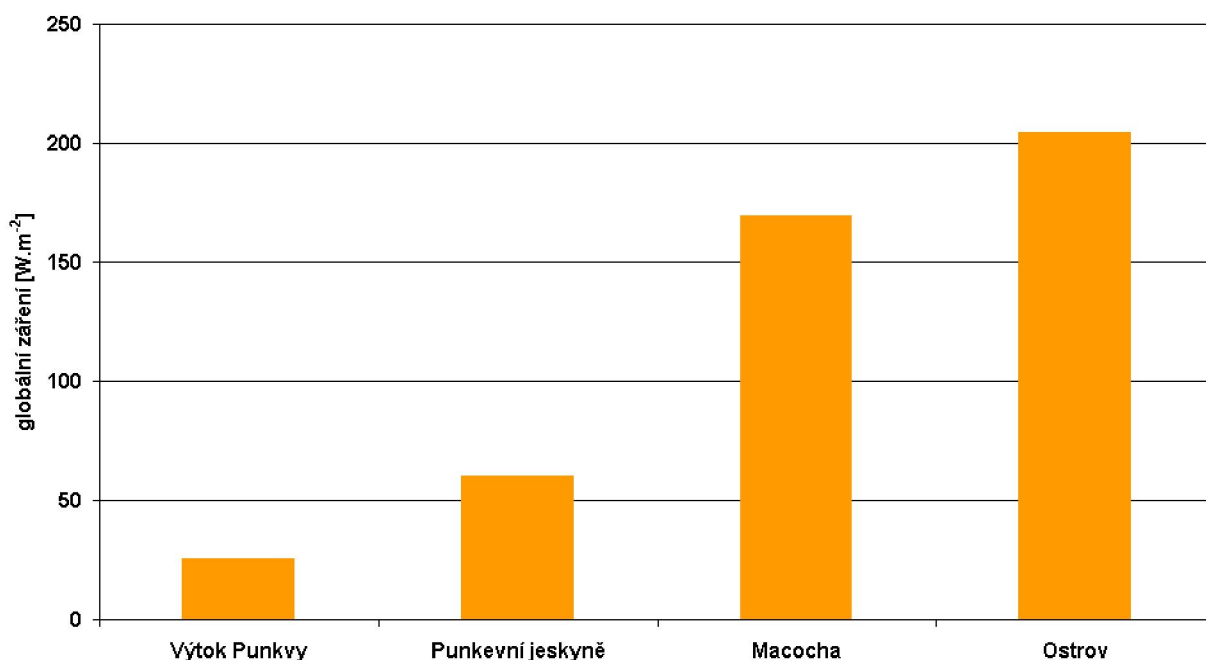
Rozdílné zastínění obzoru v průběhu roku na jednotlivých stanicích se projevuje i na celkovém množství dopadlého globálního záření za sledované období. Z obr. 9 vyplývá, že jestliže na stanici Macocha dopadá přes 80 % globálního záření, které je zaznamenáno na stanici Ostrov, na stanici Punkevní jeskyně je to již jen přes 30 % a na zcela zastíněné stanici Výtok Punkvy pouze 15 % záření dopadajícího na volné ploše. Toto rozdělení celkového příkonu radiační energie má svůj odraz i v hodnotách dalších meteorologických prvků, u nichž se pochopitelně kromě sníženého příkonu energie projevují i podobné faktory, jako je zastínění obzoru skalními masívy, popřípadě vegetací.

Globální záření dne 22.6.2008



Obr. 8 Průběh globálního záření na jednotlivých stanicích dne 22.6.2008

Průměrné globální záření na jednotlivých stanicích



Obr. 9 Průměrné hodnoty globálního záření za celé období na jednotlivých stanicích

Proudění vzduchu

Značná členitost terénu, v němž jsou dominantními prvky náhorní plošiny střídající se s úzkými a poměrně hlubokými žleby, ovlivňuje do značné míry i venti-

lační poměry jednotlivých studovaných lokalit. Dochází k modifikaci rychlostí větru i jeho směrů. Velmi názorně to dokumentuje obr. 10 s vyneseními průměrnými rychlostmi větru na jednotlivých stanicích.

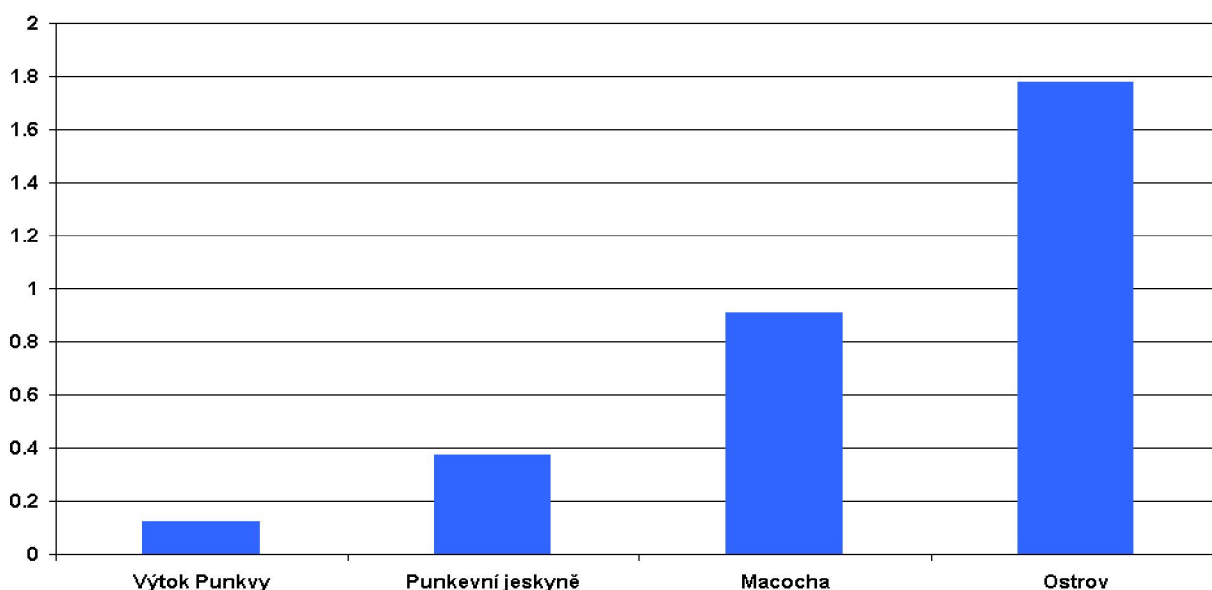
Zatímco na stanici Ostrov se průměrná rychlost větru za zpracované období pohybuje kolem 2 m.s^{-1} , na stanici Macocha je to vlivem okolních stromů již pouze polovina a ve žlebu se rychlost větru dále snižuje. Na stanici Punkevní jeskyně je již kolem 0.4 m.s^{-1} a u výtoku Punkvy, kde je nainstalovaný citlivý sonický anemometr, již pouhých 0.1 m.s^{-1} .

Přispívá k tomu jistě umístění anemometru ve výšce 2 m nad zemí, zastínění vegetací a úzké údolí, avšak vlivem četných zákrutů zde nedochází ke vzniku dýzového proudění vlivem zúžení žlebu. Ukazuje se přitom, že relativní snížení rychlosti větru

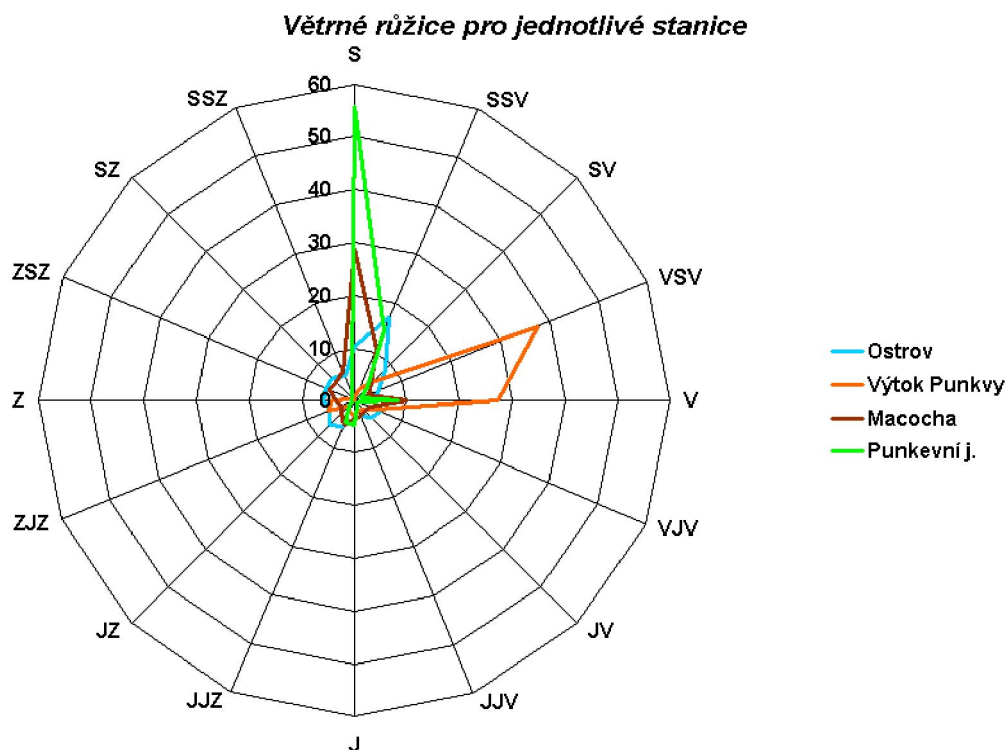
je tím větší, čím je jeho rychlost na stanici Ostrov vyšší, tj. při vyšších rychlostech dochází k většímu snížení a naopak.

K celkem pochopitelné modifikaci dochází i u směrů větru, jak dokládá obr. 11. Na stanicích Ostrov a Macocha byly ve zpracovaném období převládající severní směry, kromě nich však byly zastoupeny i ostatní směry. Naproti tomu ve stanici Punkevní jeskyně severní směr silně převažuje a ve stanici u výtoku Punkvy, kde se Pustý žleb stáčí k jihozápadu, převládají větry východních směrů.

Průměrná rychlost větru na jednotlivých stanicích



Obr. 10 Průměrná rychlost větru na jednotlivých stanicích



Obr. 11 Relativní četnosti směrů větrů pro jednotlivé stanice

Teplota vzduchu

Teplotní poměry na jednotlivých stanovištích jsou utvářeny pod vlivem radiačních vlivů, proudění vzduchu a morfologie terénu. Nižší rychlosti větru přispívají k snížení turbulentních toků tepla, a tím i k vyšším teplotám, zatímco nižší hodnoty globálního záření působí směrem opačným. Rozdíl v teplotách na jednotlivých stanicích za zpracované období je dobře patrný na obr. 12. Stanice Ostrov a Macocha mají přibližně stejnou průměrnou teplotu vzduchu, na stanici Punkevní jeskyně je teplota o cca 1 °C nižší, přestože leží o 134 m níže než stanice Macocha. Jedná se tedy o poměrně značnou teplotní inverzi, která se projevuje i na vegetaci Pustého žlebu. Stanice u výtoku Punkvy, na níž nedopadá v podstatě během dne žádné přímé sluneční záření, má průměrnou teplotu ještě o dalšího půl stupně nižší, než je na stanici Punkevní jeskyně.

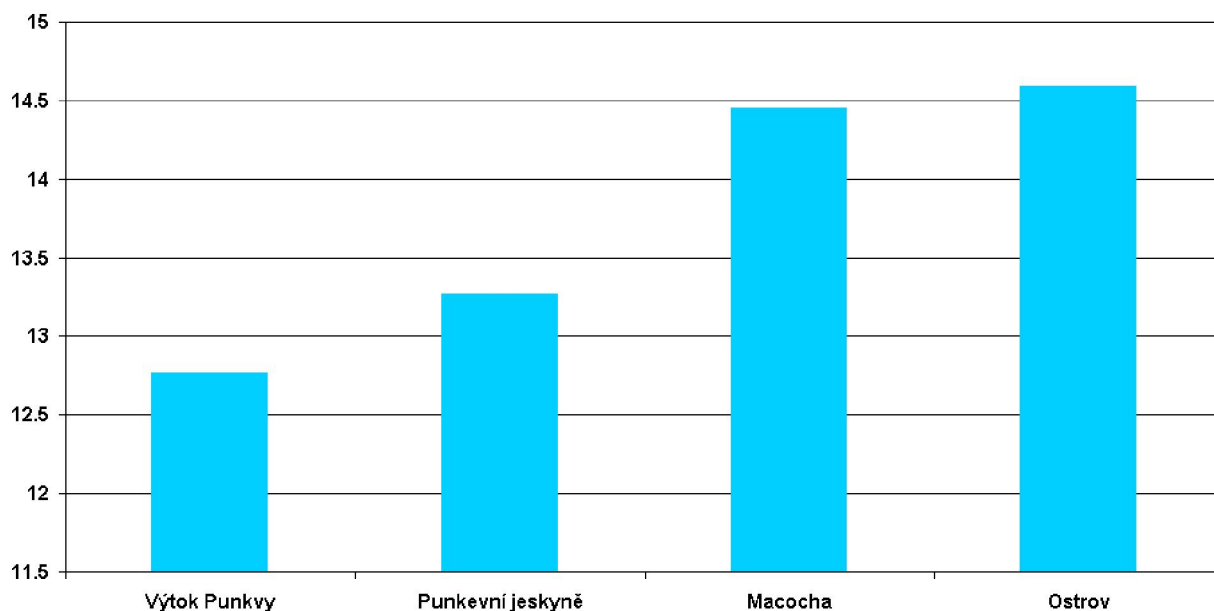
Poměrně zajímavé je i rozložení hodnot extrémních teplot. Pokud jde o minimální teploty, za situací s převažujícím radiačním ochlazováním následujícím většinou po vpádech studeného vzduchu, kdy jsou poklesy minimálních teplot nejvýraznější, nejsou nejnižší hodnoty měřeny v údolních polohách, ale na stanici Macocha. V úzkých žlebových údolích se strmými stěnami jsou poměrně ztížené podmínky pro efektivní vyzařování, k němuž se může přidávat i zpětné záření svahů, a pokles teplot proto není tak výrazný jako v otevřenějších sníženinách. Proto je zřejmě omezena i tvorba chladnějšího vzduchu na svazích a jeho následné stékání do nižších poloh žlebu. Naproti tomu příhodné podmínky pro jeho tvorbu a stagnaci jsou na stanici Macocha s poměrně volným obzorem, avšak sníženou ventilací.

Maximální teploty jsou většinou naměřeny nejvyšší na stanici Macocha, na níž je dostatečný příkon záření a nižší rychlosti

proudění vzduchu. Ještě nižší rychlosti větru jsou na dně žlebu, a proto v jeho širších místech, kam alespoň po část dne dopadá přímé sluneční záření, jsou rovněž poměrně vysoké maximální teploty vzduchu.

Nejnižší maximální teploty vzduchu se proto vyskytují při výtoku Punkvy, kde jsou nízké hodnoty globálního záření a nízké hodnoty turbulentního toku tepla.

Průměrná teplota vzduchu na jednotlivých stanicích



Obr. 12 Průměrná teplota vzduchu na jednotlivých stanicích

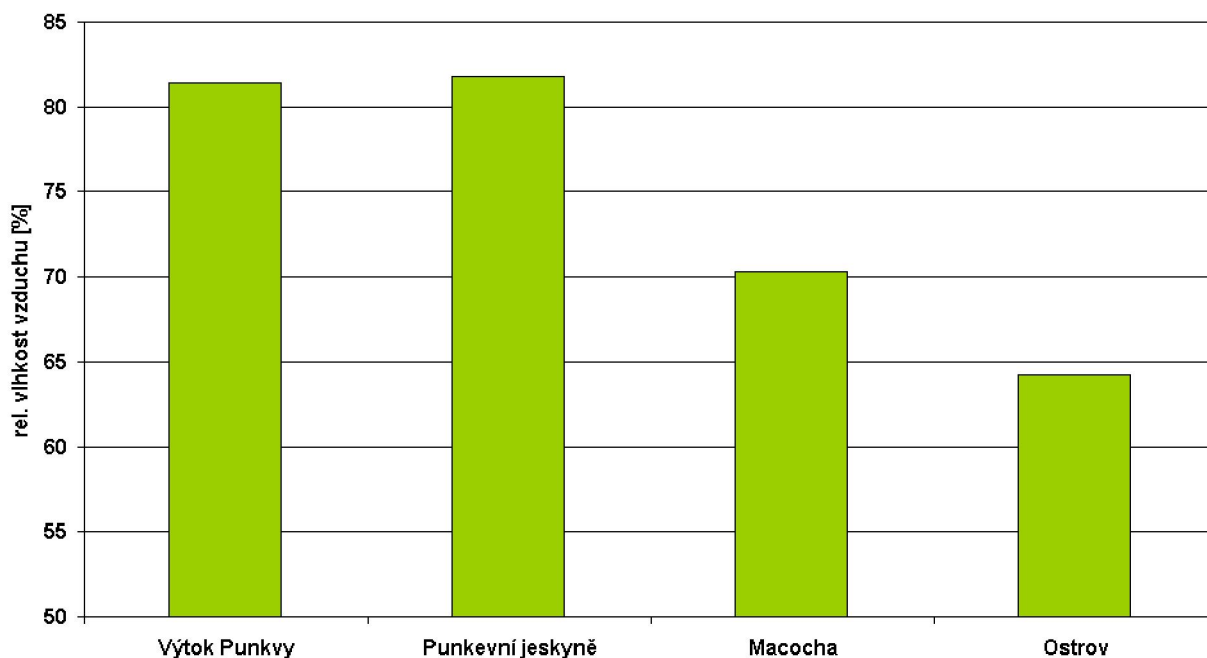
Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu patří rovněž k meteorologickým prvkům, jejichž hodnoty jsou modifikovány členitým reliéfem a vegetací krasového území. Na zpracovaných stanicích byla za dané období naměřena nejnižší vlhkost na stanici Ostrov, na stanici Macocha s nižšími rychlostmi větru a okolní vyšší vegetací je o 6 % vyšší, téměř shodné hodnoty 81 % jsou naměřeny na obou stanicích na dně Pustého žlebu (obr. 13).

Jak ukazují denní chody vlhkosti vzduchu pro jednotlivé stanice (obr. 14), zpraco-

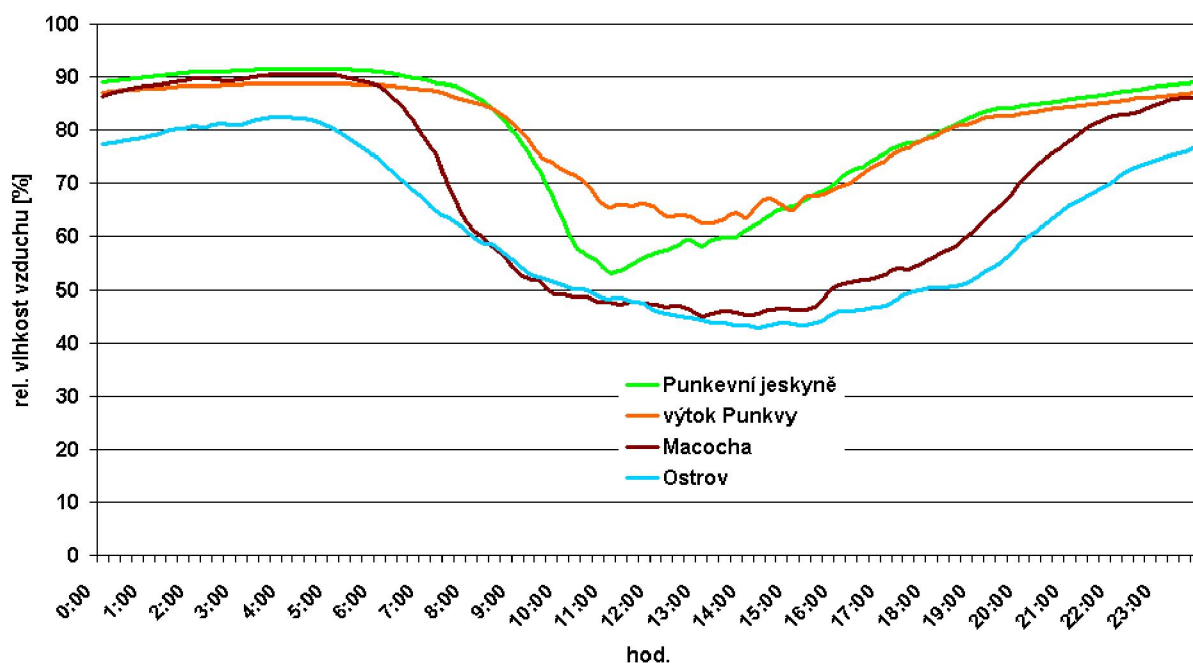
vané pro červen 2008, na dně žlebu přetrvávají vysoké vlhkosti vzduchu až do pozdních dopoledních hodin, kdy se začínou snižovat. Pokles vlhkosti je větší na stanici u Punkevních jeskyní, neboť v tu dobu na ni dopadá přímé záření a dochází rovněž i ke zvýšení teploty vzduchu. Jakmile se ocitne i tato stanice ve stínu, vlhkosti se srovnají s hodnotami stanice u výtoku Punkvy, tyto hodnoty lze proto považovat za typické pro dna žlebů, kam ani za nejpříhodnějších podmínek nedopadá přímé sluneční záření.

Průměrná vlhkost vzduchu na jednotlivých stanicích



Obr. 13 Průměrná vlhkost vzduchu na jednotlivých stanicích

Denní chod vlhkosti vzduchu v červnu 2008



Obr. 14 Denní chod vlhkosti vzduchu v červnu 2008 na jednotlivých stanicích

Závěr

Předložená práce představuje prvotní zpracování meteorologických charakteristik vybraných prvků ze sítě automatických

stanic rozmístěných na poměrně malém území, avšak v členitém reliéfu turisticky nejatraktivnější části Moravského krasu. Přesto, že jde o poměrně krátké období

několika měsíců, jsou však již zřetelné základní rysy modifikace zpracovaných charakteristik na rozdílných stanovištích, které jsou vyvolány především rozdílným množstvím dopadajícího slunečního záření a různou rychlostí větru. Na dně hlubokých žlebových údolí jsou sniženy rychlosti větru a nízká intenzita globálního záření, což se projevuje v nižších průměrných teplotách vzduchu, v rozšířenějších částech žlebu, kam dopadá po určitou část dne přímé sluneční záření, zejména pak v poledních hodinách, dosahují teplotní maxima vyšších hodnot než na volném prostranství náhorních plošin. Nebylo pozorováno, že by na dně žlebu docházelo k vytváření jezer studeného vzduchu, což je dáno strmostí okolních svahů, obrácených proti sobě, čímž je zabráněno výraz-

nější ztrátě tepla dlouhovlnným vyzařováním v nočních hodinách. K hromadění chladného vzduchu naproti tomu dochází spíše na plošině vedle propasti Macocha, obklopené z větší části vzrostlými stromy. Stejný činitel, tj. proudění vzduchu a globální záření, ovlivňují i relativní vlhkost vzduchu, na otevřené plošině v Ostrově je proto nejnižší, nahoře na Macoše o něco vyšší a nejvyšších hodnot je dosahováno na dně žlebu.

Jelikož se jedná prozatím o poměrně krátké zpracované období, bude zapotřebí v měřeních pokračovat a další výzkumy zaměřit na zpracování vlivu vegetace a reliéfu na modifikaci meteorologických charakteristik v rozdílných částech roku, stejně tak jako na vazby mezi vnější atmosférou a kryptoklimatem okolních jeskyní.

Poděkování:

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

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.
- 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.
- 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