

GEOFYZIKÁLNÍ MAPOVÁNÍ KRASOVÝCH STRUKTUR METODOU MULTIEKTRODOVÉHO ODPOROVÉHO PROFILOVÁNÍ: JESKYNĚ ZA HÁJOVNOU, JAVOŘÍČSKÝ KRAS

Geophysical mapping of karst structures using multielectrode resistivity surveys; example from „Za hájovnou“ Cave, Javoříčko Karst

Ondřej Bábek¹, Ondřej Vodehnal¹, Martin Faměra¹, Aleš Tomica²

¹ Katedra geologie PřF UP, Tř. Svobody 26, 779 00 Olomouc; e-mail: babek@prfnw.upol.cz

² Česká speleologická společnost, ZO 7-03 „Javoříčko“

(24-21 Jevíčko)

Key words: multielectrode resistivity surveying; karstification; tectonic structure; cave corridors, Moravo-Silesian Zone

Abstract

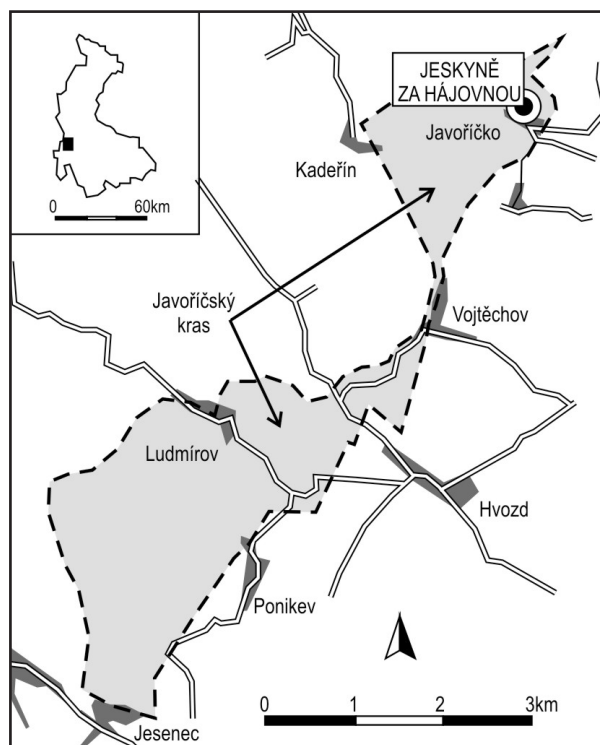
This paper investigates the scope and applicability of multielectrode resistivity surveying in the study of buried karst structures. Six resistivity sections, 62 to 117 m long, were measured above the well-documented cave system „Za hájovnou“ in the Javoříčko Karst, Bohemian Massif. Three domains of distinct resistivity values (27.6 to ~210 $\Omega\cdot m$; ~210 to ~1 300 $\Omega\cdot m$; ~1 300 to 26 112 $\Omega\cdot m$) were interpreted as clays and silts, carbonate-rich karstified zones, and massive carbonate, respectively. Most of the geophysically documented karstification manifests itself in planar zones of karstified carbonate, partly filled with fine-grained siliciclastics, which coincide with several cave corridors in plan view. Orientation of the karstified zones corresponds to the NNE–SSW trending axial plane cleavage and ESE–WNW trending fractures and faults in the underlying rocks. The resistivity surveying proves to be an excellent method for mapping of shallow cave structures.

Úvod

Mělké odporové profilování si získává stále větší oblibu v aplikovaném geologickém výzkumu (inženýrská geologie, geoarcheologie, geomorfologie) díky relativně dobré dostupnosti, rychlé akvizici a poměrně jednoduchému zpracování dat (Lee et al. 2008, Sass et al. 2008, Van Den Eeckhaut et al. 2007). Odporové profilování je založeno na měření měrného odporu (resistivity, ρ [$\Omega\cdot m$]) podloží, který je funkcí minerálního složení, struktury hornin, obsahu a salinity vody v horninách a dalších parametřů (Musset – Aftab Khan 2000). Multielektrodové odporové profilování využívá k měření resistivity většího počtu elektrod (zpravidla několik desítek či prvních stovek) uspořádaných v linii nebo v pravidelné síti nad zkoumaným objektem. Výsledkem měření a následného matematického zpracování je inverzní 2D nebo 3D model resistivity, ve kterém lze rozhraní domén s různou resistivitou interpretovat jako rozhraní horninových celků. Mělce pohřbené povrchové a podpovrchové krasové jevy (závrty, zasucené komíny, jeskynní koridory) jsou příkladem rozhraní mezi vysoce odporovými karbonáty (ρ : 50–10⁷ $\Omega\cdot m$, typicky > 10³ $\Omega\cdot m$) a jejich siliciklastickým pokryvem/výplní s řádově nižšími hodnotami (ρ : 1–10² $\Omega\cdot m$ pro jíly). Krasové jevy tak teoreticky představují velmi vhodné cíle pro odporové profilování. V tomto příspěvku uvádíme výsledky odporového profilování okolí jeskyně „Za hájovnou“ v severní části Javoříčského krasu. Cílem práce je ověřit praktickou aplikaci této geofyzikální metody pro krasovou geomorfologii a potenciální speleologické prolongační práce.

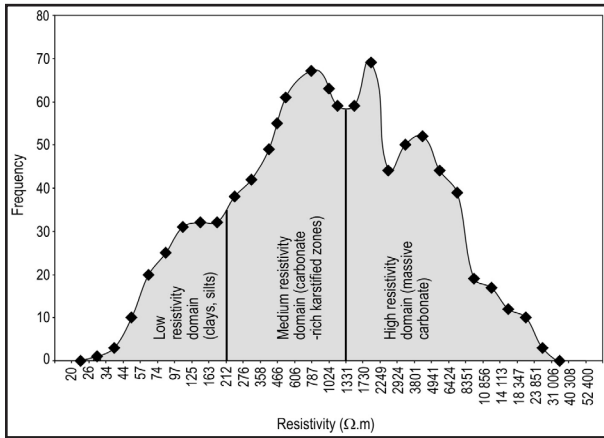
Geologie a geomorfologie studované oblasti

Jeskyně „Za hájovnou“ (souřadnice vchodu: 49°40'27.141" N, 16°55'0.812" E; obr. 1) leží na jižním



Obr. 1: Situační schéma Javoříčského krasu a jeskyně Za hájovnou a její pozice v Olomouckém kraji. Upraveno podle Kadlčíková (2005).

Fig. 1: The simplified map of the Javoříčko Karst and the Za hájovnou Cave and its position in the Olomouc region. Modified after Kadlčíková (2005).



Obr. 2: Histogram hodnot měrného odporu z inverzních modelů na 5 profilech (profil 2 až 6; celkem 954 bodů). Maxima četnosti jsou interpretována jako tři základní litologické domény (viz text).
 Fig. 2: Frequency distribution of resistivity data from inversion models at 5 sections (section 2 to 6; 954 points). Frequency peaks indicate the three inferred basic lithological domains (see text).

svahu vrchu „Brablenec“, při sz. okraji obce Javoříčko v severní části Javoříčského krasu (Panoš 1955), tvořeného silně zkrasovělými devonskými a spodnokarbonskými vápenci. Portál jeskyně leží v nadmořské výšce 385 m; její celková délka je 194 m a maximální převýšení 74 m (Tomica 2001). Jeskyně, která je označována za paleoponor potoka Javoříčka (Crha 1989), je vyplněna svahovými

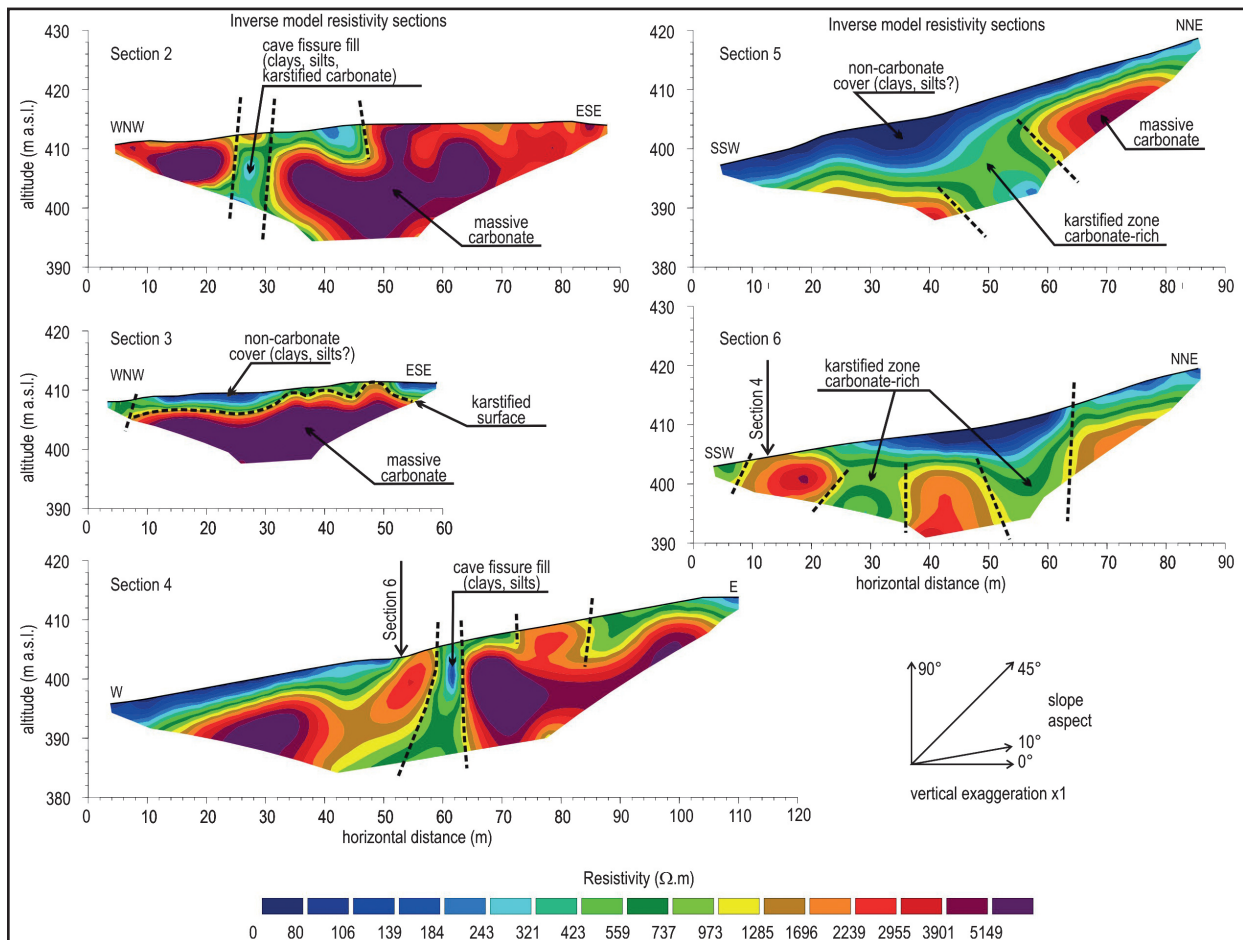
a fluvialními sedimenty s hojnými relikty savčí fauny (Musil 2005). Maximální stáří jeskynní výplně bylo stanoveno biostratigraficky do interglaciálu holstein (MIS 11) a magnetostratigraficky na rozhraní Brunhes/Matuyama (790 ka; MIS 19, Musil 2005). Stáří krasovění není stanoveno. Nepřímými indikátory krasovění jsou datované spodnobadenské výplně krasových kapes u nedaleké Mladče, zatímco v nedaleké severní části Moravského krasu krasovění probíhalo od střední části křídý až do recentu (cf. Kadlec et al. 2001).

Metody

V rámci této práce bylo proměřeno celkem šest 2D profilů o jednotkové délce 62 až 117 m s rozstupem elektrod 2 nebo 3 m za použití automatického geoelektrického systému ARES (GF Instruments, s. r. o.). Měření probíhalo s maximálním roztažením 32 elektrod v uspořádání Wenner-Schlumberger a délkou impulsu 0,5 s a zprůměrováním dat (stacking) ze 4 měření v každém bodě; maximální hloubkový dosah inverzního modelu je cca 18 m pod povrchem. Data byla zpracována pomocí software RES2DINV (Geotomo Software).

Výsledky odporového profilování

Hodnoty měrného odporu z inverzních modelů resistivity vygenerovaných programem RES2DINV se pohybují v rozsahu 27,6 Ω.m až 26 112 Ω.m. Všechny



Obr. 3: Inverzní modely resistivity na profilech 2 až 6 a interpretace litologie.

Fig. 3: Inversion models of resistivity at sections 2 to 6 and interpretation of lithology and structure.

profily vykazují poměrně jednoduchou distribuci hodnot resistivity se třemi hlavními doménami (obr. 2). Převážně spodní část profilů tvoří doména s nejvyššími hodnotami měrného odporu (více než $\sim 1300 \Omega \cdot m$), která může místy vystupovat až k povrchu (např. profil 2, obr. 3). Tuto doménu můžeme interpretovat jako masivní vápence tzv. ekvivalentů macošského souvrství (stř.–sv. devon), které zde byly vymapovány Chlupáčem a Svobodou (1963) a Crhou (1989) a které jsou odkryty na řadě drobných výchozů v okolí jeskyně.

Svrchní část profilů naopak tvoří doména s nejnižšími hodnotami resistivity ($27,6$ až $\sim 210 \Omega \cdot m$), která má na všech profilech tvar nepravidelných čoček o maximální mocnosti ~ 9 m a je často oddělena od podložní vysokoodporové domény úzkou přechodnou zónou s velmi prudkým gradientem měrného odporu (profily 3, 4, 5, obr. 3). Materiál s velmi podobnou odporovou charakteristikou můžeme sledovat i v úzkých (3–6 m) subvertikálních zónách sestupujících do hloubky, které jsou patrné na profilech 2 a 4. Tyto domény s poměrně vysokou vodivostí (nízkou resistivitou) můžeme interpretovat jako svahový pokryv a sedimentární výplně drobných krasových kapes a krasových komínů, tvořené nezpevněnými, jemnozrnými siliciklastickými sedimenty (jíly, silty, písky) stáří kvartér až ?miocén (cf. Panoš et al. 1998, Musil 2005).

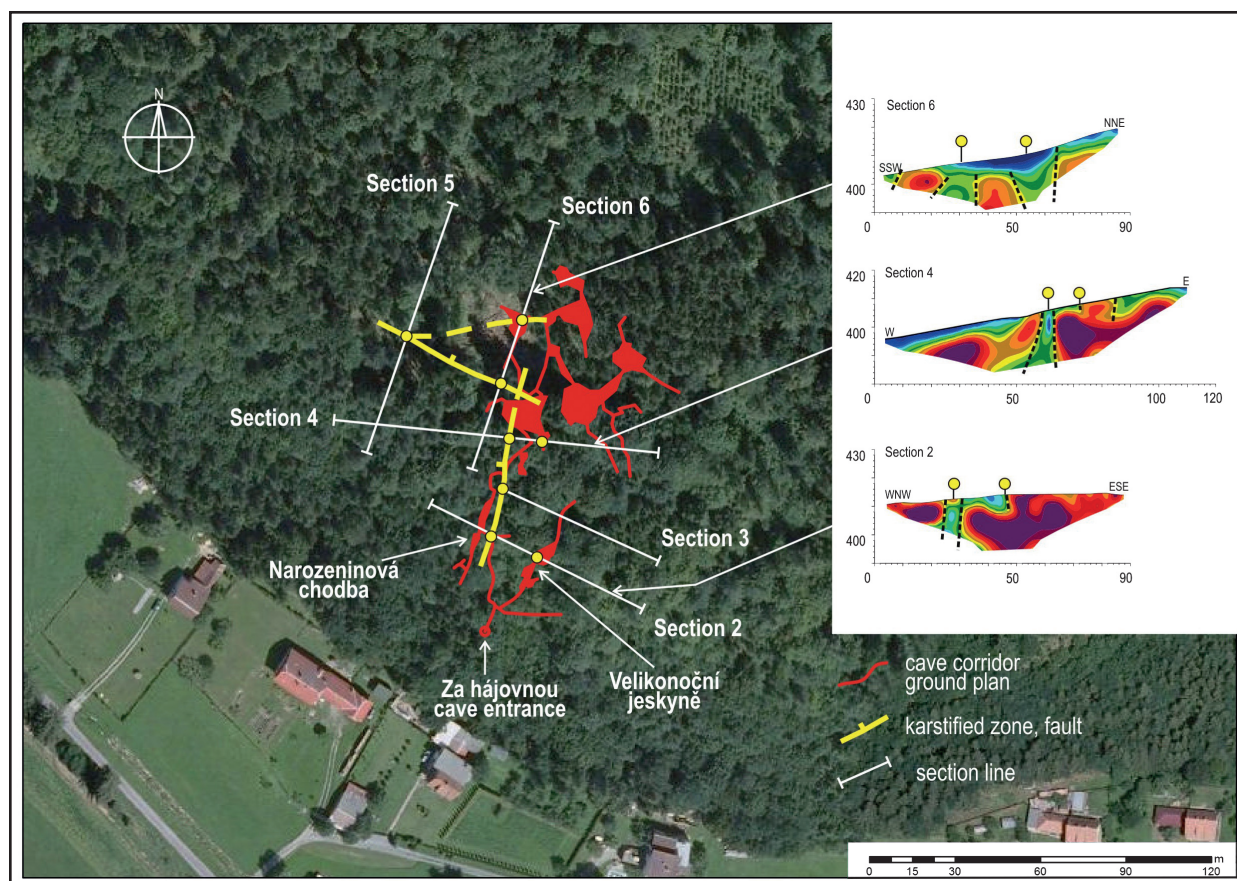
Třetí doménu se středně vysokými hodnotami měrného odporu (~ 210 až $\sim 1\,300 \Omega \cdot m$) můžeme vysledovat při

povrchu profilů 2 a 4 a v širších (10–20 m) subvertikálních zónách na profilech 4, 5 a 6. Tyto domény se stále poměrně vysokou resistivitou lze považovat za zvětralou a zkrasovělou povrchovou vrstvu vápencového masivu a zkrasovělé subvertikální struktury (komíny, puklinové zóny).

Směry a geneze geofyzikálně ověřených krasových struktur

Výsledky geofyzikálního měření je možné dobře korelovat s průběhem hlavních chodeb systému jeskyně Za hájovnou (obr. 4). Úzké subvertikální nízkoodporové zóny na profilech 2 (22–28 m), 3 (0–3 m) a 4 (65–70 m) na sebe zřetelně navazují v ploše, která na povrchu probíhá ve směru SSV–JJZ a uklání se k ZSZ pod úhlem cca 85° . Tato plocha patrně reprezentuje výplň jeskynního komínu, který se v půdorysu kryje s Narozeninovou chodbou jeskyně Za hájovnou. Komín Narozeninové chodby tak evidentně vystupuje až k povrchu a ve shodě s dostupnými mapami jeskynních koridorů potvrzuje propastovitý charakter celého systému. Naproti tomu paralelní chodba Velikonoční jeskyně nebyla zachycena ani na jednom z profilů 1, 2 a 3, které půdorys této chodby protínají zhruba v kolmém směru. Rovněž profil 4 nenaznačuje směrné pokračování Velikonoční jeskyně dále k SSV.

Široké subvertikální zóny se středními hodnotami resistivity zachycené na profilech 5 a 6 na sebe rovněž navazují a vytyčují tak plochy, která mají na povrchu směr-



Obr. 4: Interpretace výsledků odporového profilování: povrchový průběh hlavních zón krasování v nadloží jeskyně Za hájovnou na lokalitě Brablenec. Ortofotomapa převzata z Geoportálu Cenia.

Fig. 4: Interpretation of resistivity surveying results: surface projection of the major karstified structures compared to the ground plan of the Za hájovnou Cave. The orthophotomap adopted from Geoportál Cenia.

ný průběh VJV–ZSZ a přibližně V–Z s úklonem zhruba 70° k S. Posledně zmíněná linie se projevuje morfologicky jako mírný svahový stupeň a v jejím pokračování cca 100 m zjz. od profilu 5 se nachází vstupní portál říční jeskyně „Habří“. Situace na na profilech 4 a 6 poukazuje na poměrně komplikovaný průběh podpovrchových krasových struktur v hloubkách ~10 až ~20 m a možné křížení jeskynních chodeb směrů VJV–ZSZ a SSV–JJZ (obr. 4). Prostorová orientace geofyzikálně vmapovaných krasových struktur tedy může naznačovat, že jeskynní systémy „Za hájovnou“ a „Habří“ jsou vzájemně propojeny.

Geofyzikálně ověřený směr Narozeninové chodby SSV–JJZ je převažujícím směrem krasových koridorů v masivu Brablence včetně vstupní chodby paleoponorové jeskyně Habří (Kadlčíková 2005) a vstupní chodby a koridorů Velikonoční jeskyně a Plakátův sen v jeskyni Za hájovnou (Tomica 2001). V masivu Špraňku jsou v tomto směru vyvinuty rozsáhlé koridory Vojtěchovské chodby, Babské jeskyně, Panenské jeskyně, Spojovací chodby a dalších koridorů Javoříčských jeskyní. Krasovění těchto chodeb je predisponováno regionálně významnou penetrativní foliací (osní kliváží) vápenců konicko-mladečského paleozoiku o přednostním směru SSV–JJZ a úklonu cca 80° k ZSZ (Kadlčíková 2005, Bábek et al. 2006).

Směr geofyzikální zóny VJV–ZSZ z profilů 5 a 6 odpovídá přednostnímu směru příčných zlomů a puklinových zón v konicko-mladečském krasu, na kterých

je vyvinuta řada jeskynních koridorů Javoříčské jeskyně (Kadlčíková 2005). V širším regionálním rámci tento směr odpovídá průběhu nectavského a olomoucko-holešovského zlomu a okrajového sudetského zlomu s recentní seismogenní aktivitou (Špaček et al. 2011). Případný směr V–Z druhé geofyzikální zóny (profilů 5 a 6) patrně není jednoznačně predisponován tektonicky, protože křehké tektonické struktury tohoto směru jsou v konicko-mladečském paleozoiku extrémně vzácné (Kadlčíková 2005). Pro podrobnější vysvětlení orientace krasových struktur pod povrchem je nutné zahustit síť geofyzikálních profilů a nebo provést měření 3D odporové tomografie.

Závěry

Výsledky měření potvrzují, že multielektrodové odporové profilování je mimořádně vhodnou metodou k mělkému průzkumu krasu s velmi vysokou nadějí na úspěšné vmapování podpovrchových krasových struktur. Vhodnou konfigurací sítě 2D profilů při zohlednění tektonické stavby území (pukliny, foliace, vrstevnatosti) lze vmapovat směry a úklony hlavních krasových struktur a získat nezávislá data pro tektonickou analýzu území.

Poděkování

Tento výzkum byl financován z prostředků projektu GAČR P210/12/0573. Děkujeme dr. Josefu Havířovi (Brno) za konstruktivní recenzi rukopisu.

Literatura

- Bábek, O. – Tomek, Č. – Melichar, R. – Kalvoda, J. – Otava, J. (2006): Structure of unmetamorphosed Variscan tectonic units of the southern Moravo-Silesian Massif: a review. – *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 239, 37–75.
- Crha, J. et al. (1989): Souhrnná závěrečná zpráva vyhledávacího průzkumu (1.–4. fáze). Ponikev-Vojtěchov, arch. sp. UNIGEO, Brno.
- Chlupáč, I. – Svoboda, J. (1963): Geologické poměry konicko-mladečského devonu na Dražanské vrchovině. – *Sborník Ústředního ústavu geologického*, 28, 347–418.
- Kadlčíková, J. (2005): Geomorfologická charakteristika a korelace endokrasu a exokrasu v okolí Javoříčka s využitím metody GIS, Javoříčský kras, konicko-mladečský pruh. – MS, diplomová práce PŘF UP Olomouc, 73–76.
- Kadlec, J. et al. (2001): Cenozoic history of the Moravian karst (northern segment): Cave sediments and karst morphology. – *Acta Musei Moraviae, Scientiae geologicae*, 86, 111–160.
- Lee, C.-C. – Yang, C.-H. – Liu, H.-C. – Wen, K.-L. – Wang, Z.-B. – Chen, Y.-J. (2008): A study of the hydrogeological environment of the lishan landslide area using resistivity image profiling and borehole data. – *Engineering Geology*, 98, 115–125.
- Musil, R. (2005): Jeskyně Za hájovnou, výjimečná lokalita Javoříčský kras, Morava. – *Přírodovědné studie Muzea Prostějovska*, 8, 11–39.
- Mussett, A. E. – Khan, M. A. (2000): Looking into the Earth, An introduction to geological geophysics. – Cambridge University Press.
- Panoš, V. et al. (1998): Výskyt mořského spodního badenu jižně od Bouzova. – *Zprávy o geologických výzkumech v roce 1997*, 69–70.
- Panoš, V. (1955): Jeskyně severomoravského krasu. – Státní tělovýchovné nakladatelství Praha. Vysvětlivky k obrázkům a tabulce.
- Sass, O. – Bell, R. – Glade, T. (2008): Comparison of GPR, 2D-resistivity and traditional techniques for the subsurface exploration of the Öschingen landslide, Swabian Alb (Germany). – *Geomorphology*, 93, 89–103.
- Špaček, P. – Zacherle, P. – Sýkorová, Z. – Pazdírková, J. (2011): Microseismic multiplets in the northeastern Bohemian Massif. – *Zeitschrift für Geologische Wissenschaften*, 39, 5/6, 367–386.
- Tomica, A. (2001): Zpráva o nových objevech v lokalitě „Za hájovnou“. – *Archiv AOPK ČR, oddělení ochrany jeskyní*, 45–46. Praha.
- Van Den Eeckhaut, M. – Verstraeten, G. – Poesen, J. (2007): Morphology and internal structure of a dormant landslide in a hilly area: The Collinabos landslide (Belgium), *Geomorphology*, 89, 258–273.