

Vliv vody stékající po povrchu pískovců na mikrorelief pískovcových skalních útvarů

The influence of run-off water on sandstone surfaces: effects on sandstone microrelief

RADEK MIKULÁŠ – JIŘÍ ADAMOVIČ – VÁCLAV CÍLEK

Geologický ústav AV ČR, v. v. i., Rozvojová 269, 165 02 Praha 6;
mikulas@gli.cas.cz; adamovic@gli.cas.cz; cilek@gli.cas.cz

Key words: sandstones, microrelief, alveolar weathering, salt erosion, Bohemian Cretaceous Basin, Zion National Park

Abstract: Water running across vertical rock surfaces of porous

quartzose sandstone generally shows a protective effect provided that it does not augment frost erosion. The occasionally wetted vertically elongated patches can, after hundreds to thousands years of development, form a positive relief, resembling a rope or an “elephant trunk”. Such forms of microrelief were documented in the Bohemian Cretaceous Basin. Sheet-like wetting of large portions of subvertical sandstone cliffs may protect them from the formation of deep shelters at their bases (Zion National Park, USA).

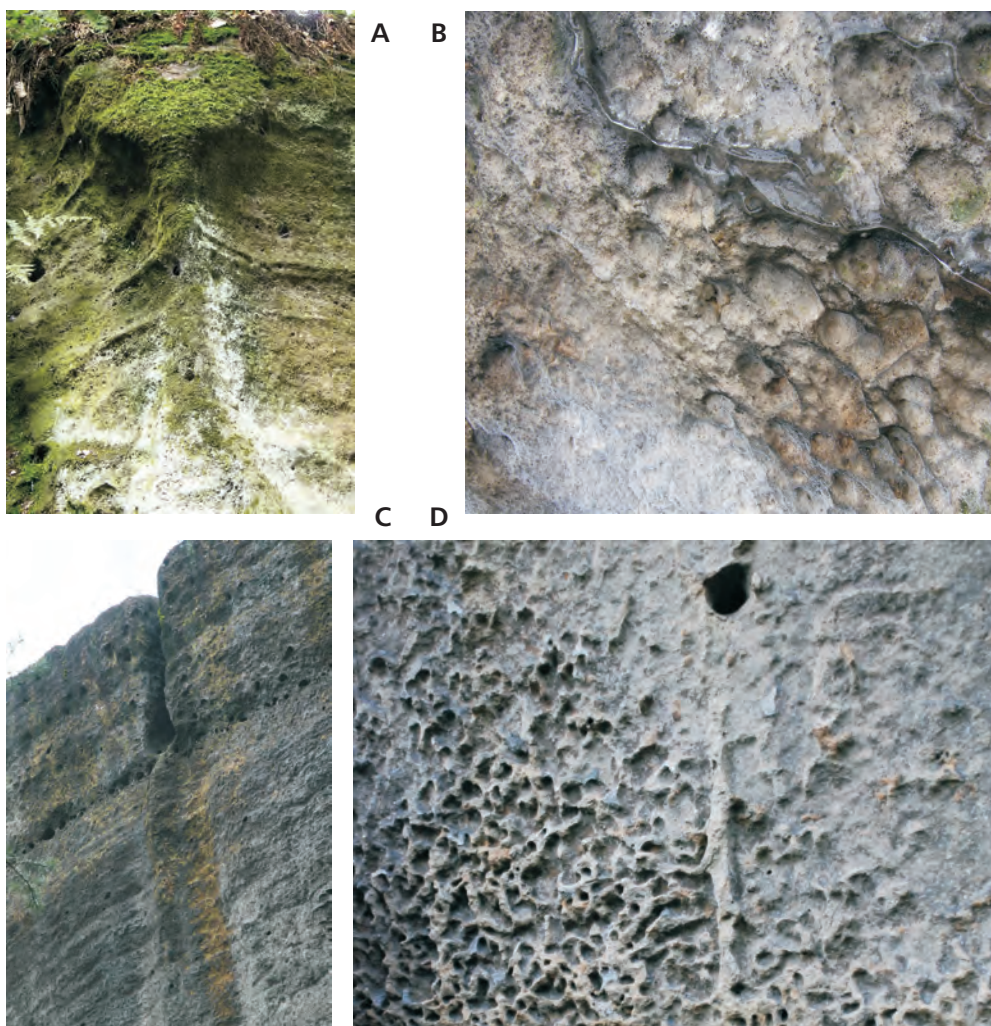
Jedním z parametrů, který nepochybně a velmi významně ovlivňuje vývoj a podobu mikroreliefu pískovcových skal, je vlhkost prostředí a jeho dynamika. Klíčovým mechanismem eroze vázané na dynamiku vlhkosti je zřejmě solné zvětrávání (Adamovič et al. 2011); význam mrazové eroze dosud nebyl podrobněji studován. Kromě empirických pozorování je dokladem vlivu dynamiky vlhkosti na modelaci pískovcových povrchů zejména teoretická fyzikální studie Huininka et al. (2004), která se zabývala vlivem délky cyklu vlhkosti v pískovci na to, zda bude zvětrání probíhat formou kavernózního zvětrávání, či naopak bude povrch v čase vyhlazován. Další prací, která popisuje mj. kolísání vlhkosti v pískovci a jeho vliv na srážení solí a na rozpad pískovce, je studie Siedela (2010), jež se zabývá alveolárním zvětráváním (tj. „vznikem voštin“) na pískovcových stavebních památkách. Závěrem prvně jmenované práce je, že čím delší je fáze vysychání, tím větší je pravděpodobnost vzniku kavernózních tvarů. Naopak rychlé vlhčení a vysychání vede k zarovnávaní povrchů. Cílek (2010) v analogické souvislosti (při popisu pozitivního tvaru reliéfu, označeného jím jako *sloní chobot*; obr. 1) přináší do české literatury o pískovcích pojem *suchý-mokrý cyklus*, který vyjadřuje, že více než na množství vody padající na skalní povrch nebo protékající horninovými póry k povrchu záleží na střídání sucha a vlhka – toto střídání podle Cílka (2010) způsobuje impregnaci a větší odolnost horniny.

Podle publikovaných dat (Huinink et al. 2004 aj.) a doplňujících pozorování se zdá Cílkovo (2010) pojetí suchého-mokrého cyklu příliš zjednodušující a mnohoznačné. Je třeba jej doplnit o definici „suchého“ a „mokrého“ pískovce, resp. různé varianty tohoto stavu. Navrhujeme pokládat pískovec za „mokrý“ (tj. nacházející se v mokřém stavu cyklu), pokud je daným stupněm vlhkosti umožněna migrace fluid. Pokud je vlhkosti méně a k migraci roztoků nedochází vůbec nebo v nepatrné míře, pískovec se nachází v „suché“ části cyklu. Hloubku pod povrchem pískovce, v níž tyto procesy probíhají, nespécifikujeme; pro vznik mikroreliefu pískovců pokládáme nicméně za vý-

znamnou zejména cykličnost v hloubce v řádu centimetrů a prvních decimetrů.

Dále je zapotřebí zpochybnit jednoznačnost tvrzení, že střídání sucha a vlhka způsobuje impregnaci a větší odolnost horniny (Cílek 2010). Pokud nespécifikujeme další parametry, pak se stejnou pravděpodobností by střídání sucha a vlhka mělo přinášet solnou erozi a destrukci stěn. Důkazem pro to, že v přírodě dochází k oběma situacím, je fenomén skalních žlábků (Mikuláš 2010).

Specifickým prvkem, jemuž je věnován následující příspěvek, je pak přítomnost vodního filmu, resp. voda tekoucí po skále, což jsou situace, které vedou k odmyvání solí. Evidentně pro tento „cyklus tekoucí vody“ platí jiná pravidla než pro suchý-mokrý cyklus, jak byl definován výše. Cílem následujícího příspěvku je proto popis a diskuse některých typických, ale zatím vesměs přehlížených tvarů a situací a návrh komplexnějších hypotéz. Dosavadní práce o vzniku mikroreliefu pískovců na přírodních, dlouhodobě se vyvíjejících výchozech (Mikuláš 2007a, b a reference zde) ukazují na to, že formulovat teorie dobře doložené přímými terénními měřeními jednotlivých parametrů (nebo matematicky podpeřené hypotézy) je obtížné. Mikrorelief totiž vzniká na složitěm fyzikálně-chemickém rozhraní (míněm povrch skály a připovrchová část do hloubky minimálně 10 cm a okolní atmosféra, hydrosféra a biosféra). Aby měření byť jen jediného parametru (např. vlhkosti, teploty, obsahu solí) mělo statistickou průkaznost, muselo by probíhat po velmi dlouhou dobu (minimálně jednoho klimatického cyklu, aby byly zprůměrovány meziroční odchylky), po celý rok, několikrát denně a v celém rozsahu studovaného rozhraní, tedy od vzduchu až po hlubší partie skály. Přesto je pravděpodobné, že některé významné, z hlediska vývoje mikroreliefu „katastrofické“ události by nebyly zachyceny (např. silné krupobíty). Ztotožňujeme se nicméně se závěrem citované práce Siedela (2010), který uvádí, že jím získané kvantitativní informace o distribuci solí ve stavebních kamenech – pískovcích by mohly být užitečné i pro studium dějů na přirozených odkryvech.



Obr. 1. A – „sloní chobot“, rokle u Zakšína. Souvislost s trasou stékající vody není zřejmá, ale nelze ji ani vyloučit; B – „provazec“ zdůrazněný ledovou krustou vytvořenou ze stékající vody, výchoz u skalního útvaru Pokličky, GPS: 50°27' 19.5" N, 14°35' 27.5" E; C – žlábek přecházející ve „sloní chobot“, stěna rokle na úbočí vrchu Kostelec, GPS: 50°34' 02.5" N, 14°27' 42,3" E; D – „provazec“ vybíhající z tunýlku ve vlhké části skály, fungující jako drenáž. Saské Švýcarsko, Affensteine, GPS přibližně 50°55' 1" N, 14°14' 8" E. Foto V. Cílek (A), R. Mikuláš (B, D), J. Adamovič (C).

Souběžně s analytickými pracemi zaměřenými na jeden fenomén navrhujeme nezanedbávat ani empirickou, detailní morfologickou a chemickou dokumentaci stěn a následné rozplétání „palimpsestů“ jednotlivých prvků. Tímto postupem je možné se dopracovat příčin a posloupností některých dějů a tím alespoň upřesnit úkoly pro další (měřicí, laboratorní a matematicko-fyzikální) fáze studia dějů.

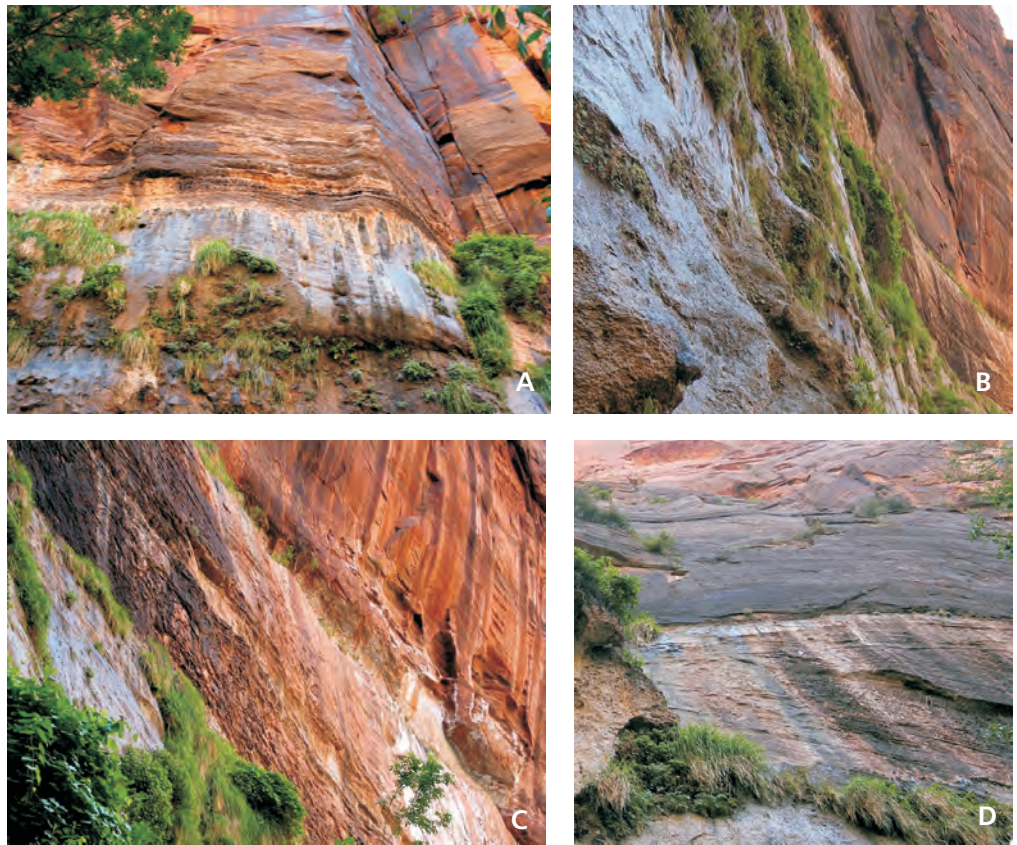
Efekt stékající vody a suchý-mokrý cyklus v úzkých údolích (příklad: Zion National Park, Utah, USA)

Pozorování související s vodou stékající po pískovci a se suchým-mokřým cyklem byla učiněna v hlavním kaňonu Zion National Park v údolí Virgin River (Utah, USA; širší okolí bodu GPS 37.297, 112.948, tj. v okolí severního konce Riverside Trail); základní údaje o geologii oblasti uvádí Graham (2006). Pískovce jsou triasového až jurského stáří, částečně eolického původu (navazský pískovec – Navajo Sandstone). Celková mocnost pískovcové desky dosahuje přibližně 3 km, výška stěn je běžně 200–400 m. Ve výšce 5–30 m nade dnem údolí je na mnoha místech v okolí uve-

dené souřadnice vyvinuta zvodnělá poloha pískovce, z níž i v nejsušší a zároveň nejteplejší části roku (v červenci) vytéká voda s takovou intenzitou, že až k hladině Virgin River vytváří tenký vodní „film“ (obr. 2A, B). Nad tímto téměř nepřetržitě vlhkým skalním povrchem může být vyvinuta několik metrů (zpravidla 2–10 m) vysoká stěna pokrytá voštinami, většinou obecně sférického nebo kukaňovitého tvaru, z velké části oddělených zaoblenými skalními římsami a kombinovaných se skalními kůrami v různém stadiu destrukce (obr. 2C, D). Nad stěnami s voštinami následují až několik set metrů vysoké, víceméně vertikální i mírně převislé stěny s hladkými povrchy (obr. 2A–D). Ke vzniku útvarů typu „sloních chobotů“ zde nedochází (resp. nebyly námi zjištěny), protože lineární pramenná zóna vytváří velké plochy skály vesměs pokryté stékající vodou, nikoliv úzké zvlhčené linie stékající vody.

Prameny, resp. zvodnělé polohy a plochy odlučnosti při bázi kaňonu Virgin River jsou kombinací údolního a vrstevního původu: zřejmě (podle makroskopického studia spadlých bloků) jsou vázány na polohy s větším podílem jílového tmele. Ze stékající vody se místy vytváří pěnovec; původ CaCO_3 v roztocích však může být stratigraficky velmi vzdálený místu srážení.

Obr. 2. Posloupnost skalních povrchů v kaňonu Zion National Park, údolí Virgin River (Utah, USA); širší okolí bodu GPS 37.297°N, 112.948°W, tj. v okolí severního konce Riverside Trail. Bližší vysvětlení je v textu. Foto R. Mikuláš, červenec 2008.



Průměrný měsíční úhrn srážek v oblasti Zion National Park dosahuje v zimním období kolem 40 mm, v letním (s výjimkou srpna, kdy je srážek z občasných bouřek více) pouze 15–20 mm. V zimním období teploty často oscilují kolem bodu mrazu, v letním období často přesahují 40 °C.

Jednotlivá „patra“, tak nápadně odlišná mikrorelíefem, lze interpretovat (zdola nahoru) takto:

1. Téměř trvale vlhké skalní povrchy, na kterých nedochází k solné erozi ani k povrchovému zpevňování. Vzhledem k velkému výparu z povrchu skály a malé rozpustnosti CaCO_3 ve vodě může místy docházet ke vzniku novotvořeného karbonátového tmele. V místech velmi slabého příronu vody se často objevují úpatní převisy (obr. 3). Vznik úpatních převisů může souviset s mrazovým zvětráváním (slaběji provlhčené partie v zimě promrzají; A. A. Ekdale, úst. sděl. 2008), řada prací však vysvětluje vznik převisů krystalizací CaCO_3 , která může mít nejen impregnační, ale i destruktivní účinek (Laity – Malin 1985; Howard – Kochel 1988).

2. Povrchy se sezónně kolísající vlhkostí (v průměru s několikaměsíčním suchým-mokrym cyklem), přičemž v některých fázích roku je vlhkost výrazněji dotována roztoky zevnitř masivu. Tvoří se voštinové povrchy shodné morfologie jako na mnoha místech výchozů pískovců české křídové pánve.

3. Povrchy téměř trvale suchého nebo velmi krátkodobě zvlhčovaného pískovce. Povrch je vyhlazován, na některých místech se pravděpodobně tvoří skalní kůry; vliv solné eroze či eroze vůbec (kromě gravitačního odpadání různě velkých bloků) je malý.

Diskuse

Cílek (2010) navrhl termín „sloní chobot“ pro pozitivní tvary pískovcového reliéfu, zpravidla 1–1,5 m dlouhé a 10–30 cm široké, protažené, víceméně symetrické, směrem dolů se zužující útvary vyskytující se na svislých či převislých skalních stěnách. Drobnější tvary tohoto typu navrhuje označovat jako „skalní provazce“. Cílek (2010) pozoroval a částečně fotograficky dokumentoval tyto útvary na Kokořínsku a Českolipsku, např. na Žákově skále u Lhoty nedaleko Dřevčic.

Vznik chobotů a provazců vysvětlil Cílek (2010) poněkud zvýšeným tokem vody: musí jí být o něco víc než na okolní skále, ale jinak celkově málo. Na vlhkých místech dochází k větší depozici opálu a zároveň lepšímu odmývání solí, takže místo občasného vodního proudu je více zpevněno a zároveň méně atakováno solným zvětráváním. Autor uvádí, že větší vlhkost obvykle na pískovcích znamená větší destrukci. Zde sice jde o poněkud větší průtok vody, ale hlavně o režim střídavého zavlažování deštěm či tajícím sněhem a rychlého následného vysušení. Dodáváme, že aplikace výsledků Hui-ninka et al. (2004) na tento fenomén by znamenala, že podél hranic „chobotů“ vede rozhraní mezi plochou s krátkým suchým-mokrym cyklem (tj. povrchem chobotu), kde je povrch vyhlazován, a okolním povrchem, kde je suchý-mokrym cyklus delší a kde proto probíhá kavernózní zvětrávání (tj. přibližně kolmou nebo mírně převislou stěnou). V prostoru „chobotu“ však dochází nejen k vyhlazování povrchu, ale evidentně také k impregnaci (jinak by choboty neměly



Obr. 3. Slabě zvlhčený destrukovaný skalní povrch v kaňonu Zion National Park, údolí Virgin River (Utah, USA); okolí severního konce Riverside Trail. Bližší vysvětlení je v textu. Foto R. Mikuláš, červenec 2008.

tak výrazně pozitivní reliéf, což potvrzuje specifický (již zmíněný) ochranný efekt stékající vody.

Po publikování Cílkova (2010) příspěvku byla jevu věnována další pozornost a byl zjištěn na řadě dalších míst, například v Saském Švýcarsku (obr. 1D), dokumentovány byly i velmi instruktivní další příklady z Kokořínska. Problémem definice podané Cílkem (2010) je, že tvary připomínající sloní choboty nebo provazce často vznikají i z jiných příčin, např. „sevřením“ skalního sloupu dvěma skalními okny a vznikem specifického orientovaného tlaku, skálu zřejmě značně zpevňujícího. Doporučujeme termín používat pouze tehdy, když je evidentní spojení chobotu či provazce s prvkem reliéfu, který je schopen vodu usměrňovat (žlábek, „drenážní“ tunýlek), nebo pokud je stékající voda na daném místě opakovaně pozorována.

Dokonale vyvinutý fenomén „sloního chobotu“ dosud nebyl zkoumán metodou výbrusů či SEM vzorků. Obdobně pozitivně vystupující útvary v pískovcích, a to nad většími kavernami, však analyzovali Cílek a Langrová (1984; str. 229) a ve zpevněných partiích byl jako součást tmele zjištěn právě opál.

Závěr

Z popsanych a diskutovaných případů vyplývá několik poznatků:

1. Z hlediska vlivu zvlhčení skály na rychlost a styl její eroze je třeba rozlišovat a) vlhkost působenou přímými dešťovými srážkami, b) vlhkost působenou srážkovou či pramenitou vodou (tj. původně podzemní vodou) stékající po po-

vrchu skály a c) vlhkost působenou kapilárním pohybem roztoků v pórech pískovce.

2. Z uvedených tří typů vlhkosti má pouze voda stékající po povrchu skály výrazně ochranný efekt, a to pouze tehdy, není-li současně příčinou urychlování mrazové eroze. Tento ochranný efekt je zřejmý tím, že skála „omývaná“ vodou má tendenci vystupovat jako pozitivní tvar (sloní choboty) nebo jako tvar „neutrální“, kontrastující s hlubokými úpatními převisy (Zion).

3. Empirická, popisná pozorování mikroreliéfu přírodních pískovcových skalních stěn ještě zdaleka nejsou dokončena. Na pokroku tohoto studia bude záviset relevance navrhovaných projektů měření jednotlivých veličin, které se na tvorbě pískovcových povrchů podílejí, laboratorních experimentů a matematických modelů.

Poděkování. Práce je součástí výzkumného záměru č. Z 3013 0516 Geologického ústavu AV ČR, v. v. i., v Praze. Je výstupem grantu GA AV ČR č. IAA300130806. Za cenné kritické připomínky děkujeme Jiřímu Bruthansovi (PrFUK, Praha), Stanislavu Čechovi (ČGS, Praha) a Janu Mertlíkovi (SCHKO Český ráj, Turnov).

Literatura

- ADAMOVIČ, J. – MIKULÁŠ, R. – SCHWEIGSTILLOVÁ, J. – BŮHMOVÁ, V. (2011): Porosity changes induced by salt weathering of sandstones, Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. – *Acta Geodyn. Geomater.* 8, 1 (161), 29–45.
- CÍLEK, V. (2010): Sloní chobot. In: ADAMOVIČ, J. – MIKULÁŠ, R. – CÍLEK, V.: Atlas pískovcových skalních měst České a Slovenské republiky, 118–119. – Academia, Praha.
- CÍLEK, V. – LANGROVÁ, A. (1984): Skalní kůry a solné zvětvávání v CHKO Labské pískovce. – *Ochrana Přír.* 49, 8, 227–231.

- GRAHAM, J. (2006): Zion National Park Geologic Resource Evaluation Report. – 56 s. Nat. Res. Rep. 2006/014. Denver, Colorado.
- HOWARD, A. D. – KOCHER, R. C. (1988): Introduction to Cuesta landforms and Sapping Processes on the Colorado Plateau. In: HOWARD, A. D. – KOCHER, R. C. – HOLT, H. E.: Sapping features of the Colorado Plateau. – NASA Spec. Publ., 491, 6–56.
- HUININK, H. P. – PEL, L. – KOPINGA, K. (2004): Simulating the growth of tafoni. – *Earth Surf. Processes Landforms* 29, 1225–1233.
- LAITY, J. E. – MALIN, M. C. (1985): Sapping processes and development of theater headed valley networks on the Colorado Plateau. – *Geol. Soc. Amer. Bull.* 96, 203–217.
- MCBRIDE, E. F. – PICARD, M. D. (2000): Origin and development of tafoni in Tunnel Spring Tuff, Crystal Peak, Utah, USA. – *Earth Surf. Processes Landforms* 25, 869–879.
- MIKULÁŠ, R. (2007a): The concept of porokarst: sandstone sculpturing across climatic zones and lithofacies. In: HÄRTEL, H. – CÍLEK, V. – HERBEN, T. – JACKSON, A. – WILLIAMS, R., ed.: *Sandstone Landscapes*, 66–75. – Academia, Praha.
- MIKULÁŠ, R. (2007b): Microforms of the sandstone relief. In: HÄRTEL, H. – CÍLEK, V. – HERBEN, T. – JACKSON, A. – WILLIAMS, R., ed.: *Sandstone Landscapes*, 76–82. – Academia, Praha.
- MIKULÁŠ, R. (2010): Skalní žlábk. In: ADAMOVIČ, J. – MIKULÁŠ, R. – CÍLEK, V.: *Atlas pískovcových skalních měst České a Slovenské republiky*, 118–119. – Academia, Praha.
- SIEDEL, H. (2010): Alveolar weathering of Cretaceous building sandstones on monuments in Saxony, Germany. In: PŘIKRYL, R. – TÖRÖK, Á., ed.: *Natural Stone Resources for Historical Monuments*, 11–23. – *Geol. Soc. Spec. Publ.* 333. London.