

Rychlá tvorba skalních kůr na povrchu hruboskalského pískovce: mikroskopický popis, tahová pevnost, odolnost vůči erozi, vznik a význam pro pískovcový reliéf

Fast-formed case hardened surfaces on exposures of Hrubá Skála sandstone: microscopic description, tensile strength, erodability, origin, and significance for sandstone landscape

JANA SCHWEIGSTILLOVÁ¹ – Jiří BRUTHANS^{2,3} – LUKÁŠ FALTEISEK² – JAN VÁLEK⁴ – JAN SOUKUP²

¹ Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i., V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8; jana@irms.cas.cz

² Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, Albertov 6, 128 43 Praha 2; bruthans@natur.cuni.cz

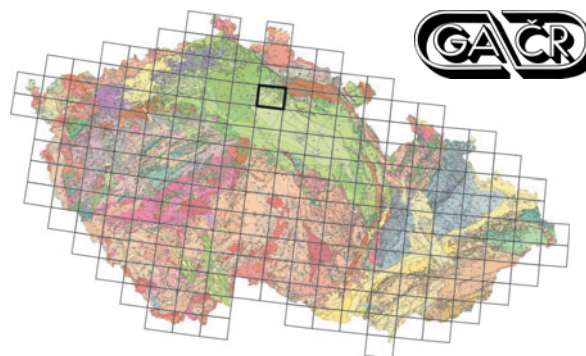
³ Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1

⁴ Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., Prosecká 809/76, 190 00 Praha 9

Key words: sandstone, case hardening, erosion, lichen, Bohemian Cretaceous Basin

Abstract: On quartz sandstone landscapes in the Czech Republic, the opal cement is generally believed to be a major factor responsible for increased resistance of case hardened surfaces, which protects sandstone exposures in many areas. However there is increasing evidence showing that opal is not the necessary constituent of the case hardened surfaces and actual measurements of strength and erodibility of sandstone surfaces were missing.

In Střeleč Quarry and natural sandstone exposure Apolena (Bohemian Paradise) the tensile strength and relative erodibility was measured at case hardened surfaces and on bare sandstone and sandstone microstructure and composition of binding agents was studied by various methods. Case hardened surfaces consist of a 0.5–1 mm thick zone of sandstone where most of the pores become filled by kaolinite clay reinforced by lichen hyphae. Case



(03-34 Sobotka)

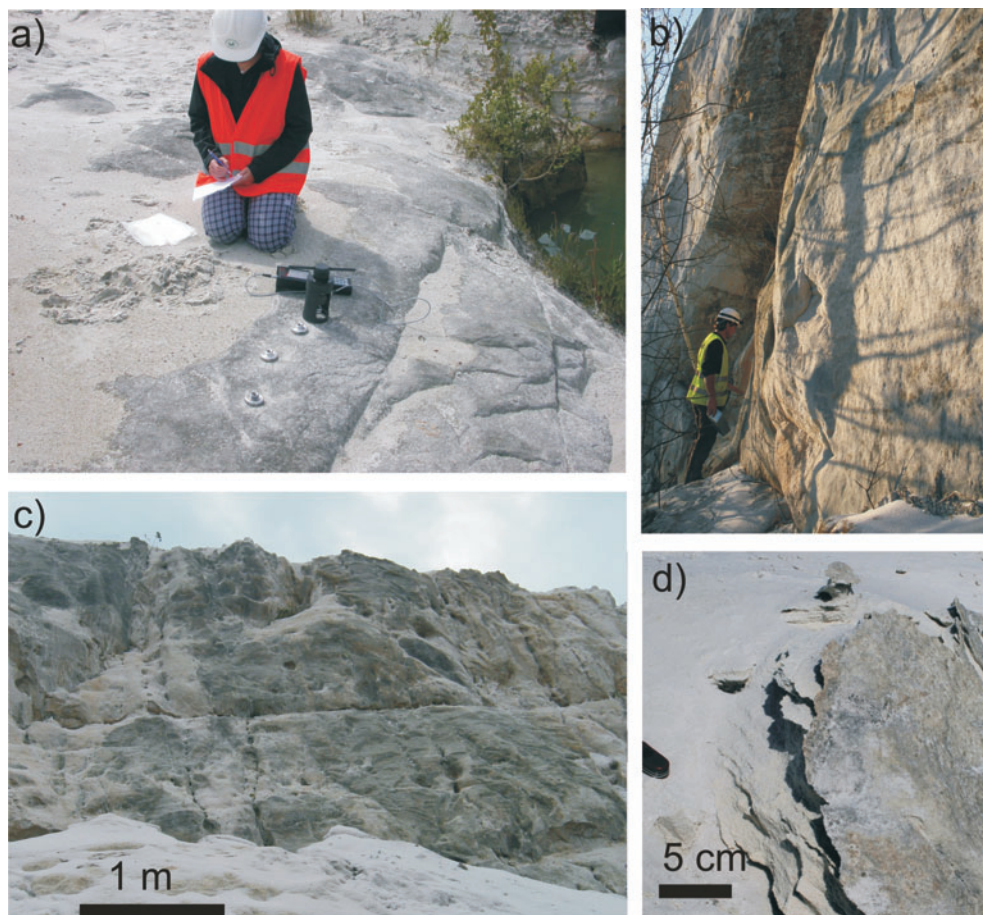
hardened surfaces have on average 14 times higher tensile strength than bare sandstone and are resistant to erosion by overland flow. Under optimum conditions (sun irradiation, moisture abundance) the case hardened surfaces developed in quarry within just 6 years having the same tensile strength as the case hardened surfaces at natural exposures (tensile strength 20–180 kPa). Experiments with substance that decomposes organic matter strongly indicates that organic fibers are the major factor responsible for strongly reduced erodibility of case hardened surfaces. Surprising results of the study invoked the more detail study launched in other areas with quartz sandstone exposures in Bohemian Cretaceous Basin.

Skalní kůru definoval Cílek (1994) jako několik milimetrů až několik desítek centimetrů mocnou, druhotně zpevněnou zónu na povrchu pískovce. Rozlišuje vnitřní kůru vzniklou zpevněním pískovce a vnější kůru vzniklou vysrážením železitého tmelu na povrchu pískovce. Dále budou popisovány jen vnitřní kůry. Skalní kůry se vyskytují zejména na svislých a převislých stěnách (Adamovič et al. 2010). Dokonale vyvinuté skalní kůry jsou velmi obtížně rozpoznatelné, přítomnost kůr je dobře patrná teprve při jejich částečné destrukci, kdy kůry začnou vystupovat nad povrch ustupujícího pískovce (Adamovič et al. 2010). Dokonale vyvinuté skalní kůry pokrývají řadu skalních věží a masivů, a to zejména v silněji propustných pískovcích, jež jsou ve většině oblastí Labských pískovců, v Ralské pahorkatině vč. Kokořínska, ve velké části Českého ráje a na Broumovsku (Cílek 1994, Adamovič et al. 2010). Podle

Cílka (1994) a Adamoviče et al. (2010) hrají skalní kůry roli při vzniku skalních věží, sloupků ve tvaru přesýpacích hodin, voštin a řady dalších tvarů a zejména chrání povrch pískovce před erozí.

Značné rozdíly byly zjištěny ve složení skalních kůr. Cílek (1995) a Vařilová et al. (2011) na základě SEM, EDX a rtg.-analýz považují za hlavní tmelící složku skalních kůr opál. Opál, někdy s přítomností Fe-hydroxidů, sádrovce a organické hmoty, silicifikuje podle Cílka povrchovou zónu pískovce do hloubky obvykle 2–15 cm v Labských pískovcích, na Broumovsku, v Teplických a Hradčanských stěnách, Českém ráji a na Kokořínsku. Opál též tvoří povlaky a výrůstky, zejména v převislech a jeskyních (Cílek – Langrová 1994, Cílek 1995). Cílek bohužel neuvádí informace o počtu studovaných vzorků a lokalit, takže není zřejmé, na jakém počtu analýz skalních kůr a kolika lokalitách

Obr. 1. Hruboskalský pískovec v lomu Střeleč. a – skalní kůra na horizontálním povrchu pískovce těsně u čerpací stanice. Provádění odtrhových zkoušek; b – povrchy lomových stěn při s. okraji lomu (stáří 30–50 let) se již vizuálně neliší od povrchů pískovce v skalních městech; c – max. 30 let stará skalní kůra pokrývající povrch nejnižší etáže v sz. části lomu. Drobné povrchové tvary i barva povrchu již připomínají povrch přírodních skalních výchozů; d – zbytky těžbou zničené skalní kůry z předešlého snímku. Pod první, milimetr mocnou skalní kůrou se nachází erodovatelný pískovec. Foto J. Bruthans.



jeho závěry stojí. V populárně naučných zdrojích je opál často považován za klíčový prvek zpevnění krust. Naopak Adamovič et al. (2011) při detailně dokumentované studii skalních kůr (SEM, RTG, EDX) z osmi lokalit převážně na Kokořínsku a v Českém ráji nezjistili opál ani v jednom případě skalních kůr. Skalní kůry byly tvořeny pískovcem s póry částečně vyplněnými jílovými minerály a solemi, zejména sádrovcem, a v nemalé míře i kamenci. Schweigstillová (nepublikováno) identifikovala opál z odebraných solných výkvětů zhruba z 200 lokalit po celé Evropě (resp. České republiky, Německa, Francie, Lucemburska, Polska) pouze v pěti případech. Podobně bylo při studiu skalních kůr Adršpaško-teplických skal na SEM často zjištěno obohacení jílovými minerály v povrchové zóně pískovce (S. Wiggins, úst. sděl.). Je tak zřejmé, že složení skalních kůr může být v různých oblastech různé a opál se nezdá být pro vznik kůr nezbytný.

Nový mechanismus vzniku skalních kůr byl zjištěn při studiu povrchů pískovce v činném lomu Střeleč v Českém ráji, kde se těží hruboskalský kvádrový pískovec. Také se ukázalo, že povrch pískovce může být před erozí chráněn dvěma druhy „zpevnění“, vznikajícími naprosto odlišnými procesy:

1. zpevněný povrch puklin. Jde o zhruba 1 mm mocné zóny na povrchu tektonických puklin, resp. mikrozlomů v pískovci. Tyto tenké zóny lemující puklinovou plochu mají výrazně vyšší pevnost v tahu, nižší propustnost a jsou odolnější erozi než podložní pískovec. Povrchy získaly

svou odolnost před expozicí na zemském povrchu, mají zásadní význam pro morfologii skalních měst a jsou diskutovány v samostatném článku (Bruthans et al. 2013);

2. skalní kůry, které v současnosti vznikají na nerovném povrchu pískovce v lomu.

Cílem této práce je: 1. charakterizovat skalní kůry v lomu a pokud možno kvantitativně porovnat jejich vlastnosti s vlastnostmi podložního pískovce zejména s ohledem na složení, pevnost, odolnost vůči erozi; 2. pokusit se vysvětlit extrémně rychlý vznik skalních kůr v lomu; 3. porovnat charakter skalních kůr v lomu a na přirozených výchozech stejného pískovce v prostoru Apoleny (2 km ssz. od lomu; 50°30' 39.381" N, 15°14' 1.718" E).

Lom Střeleč se nachází v Českém ráji 2,5 km jjv. od hradu Trosky, skalní město Apolena na v. úbočí vrchu Trosky. Jak lom, tak skalní město Apolena jsou situovány v hruboskalském pískovci. V obou lokalitách byly předmětem studia bílé pískovce, označované v těžební terminologii jako sklářská poloha (dále SK pískovec).

Hruboskalský pískovec těžený v lomu Střeleč sedimentoval během svrchního turonu a coniacu v relativně mělkovodním mořském prostředí (Uličný 2001). Jeho mocnost na území lomu je přibližně 85 m. Nejsvrchnější část pískovců o mocnosti 40 m sestává ze tří těles hrubozrnných delt (Uličný 2001), se šikmým zvrstvením uklánějícím se v úhlu 4–18°. Pískovec je jemně až středně zrnitý. SK pískovec tvoří v lomu subhorizontální těleso ve výšce 240–280 m n. m.

Metodika

Vzorky pro studium skalních kůr na SEM a laboratorní experimenty byly vyříznuty z povrchu buď pilou, nebo byly odvrtny jádrovým vrtákem pomocí ruční vrtačky (průměr 64 mm), v obou případech nasucho.

Pevnost v tahu kolmo na povrch pískovce byla měřena přímo v terénu. Na skalní kůry i pískovec bez skalních kůr byly epoxidovým lepidlem připevněny kovové terčíky o průměru 5 cm (obr. 1a). Po dostatečném vytvrzení lepidla byla postupně zvyšována tahová síla působící v kolmém směru od povrchu pískovce až do odtrhnutí pískovce pod naneseným lepidlem spojujícím pískovec s terčíkem. Odtrhová síla byla změřena přesným tenzometrem a plocha odtrhu spočtena po překreslení kontaktní plochy na milimetrový papír. Vydělením obou hodnot byla získána výsledná tahová síla a přepočtena na kPa. V případě méně odolných pískovců byly namísto kovových terčíků použity lehčí terčíky, vyrobené z aluminiového T-profilu o čtvercové styčné ploše 2 × 2 cm a váze 3 g, které byly přilepeny na povrch pískovce (Bruthans et al. 2012). Tahová síla byla postupně zvyšována přiléváním vody do nádoby připojené k terčíku lankem vedoucím přes malou kladku. Tímto postupem bylo možno měřit tahovou sílu o velikosti $\geq 0,1$ kPa.

Relativní odolnost povrchu pískovce vůči erozi byla změřena pomocí vodního paprsku o průměru ~ 1 mm, aplikovaného z konstantní vzdálenosti 10 cm po dobu 5 sekund kolmo na povrch pískovce ze speciálně upravené stříčky vybavené tlakovou pumpou a manometrem umožňujícím nastavení stejného tlaku (180 kPa) vody při každém testu (Bruthans et al. 2012). Hloubka díry vyvrtané paprskem vody byla měřena posuvným měřítkem. Pro hloubku vyvrtané díry bude v dalším textu používáno označení indikátor relativní erodovatelnosti (REI). Technika REI je založena na podobném principu, jako je test vyvinutý pro přesné měření koeficientu erodability a kritického napětí v plně nasyceném materiálu (detaily viz Bruthans et al. 2012). Metoda REI byla kalibrována tak, že v lomu byly vybrány povrchy pískovce, kde bezpochyby protékala voda, a to za 1. povrchy se zjevnými stopami eroze a za 2. povrchy rovných puklin, které proudící voda nebyla schopná erodovat.

Teplota, vlhkost a změny tlaku vzduchu v pískovci pod skalní kůrou byly měřeny pomocí čidla VOLTCRAFT DL-181THP s dataloggerem, umístěného do vývrtu o délce 20 cm v hloubce okolo 10 cm pod horizontálním povrchem skalní kůry. Návrh byl po umístění čidla utěsněn a izolován od vnější atmosféry.

Dále byly připraveny vzorky pískovce : vodný roztok v poměru 1 : 10 pro stanovení sodíkového absorpčního poměru (SAR) podle Faulknera et al. (2001). Směs písku a destilované vody byla třepána s frekvencí 150 otáček za minutu po 24 hodin a poté byly vzorky přefiltrovány přes filtr 0,45 μm . Koncentrace kationtů byly stanoveny metodou ICP-OES. Sodíkový absorpční poměr byl spočítán podle vztahu:

$$\text{SAR} = \text{Na}/[(\text{Ca} + \text{Mg})/2]^{0.5} \quad (\text{rovnice 1})$$

(kationty v mmol/l).

Pro pořízení mikrofotografií povrchů a řezů pískovce

a skalních kůr byl použit binokulární mikroskop Olympus SZX16, propojený s digitálním fotoaparátem Olympus SP350. Pro stanovení chemického složení pískovcového matrixu na leštěných nábrusech byl použit elektronový mikroskop (SEM) Quanta 450 (FEI). Ke studiu mikrostruktury pískovce a obsahu matrixu byl použit detektor (PMD) pro tzv. studenou katodoluminiscenci (CL). Pozorování bylo provedeno v sekundárních elektronech (SE) ve vysokém vakuu. Analytické podmínky byly: SE = energie elektronového paprsku 10 kV, průměr elektronového svazku 2; CL = energie elektronového paprsku 10 kV a průměr elektronového svazku 6. Semikvantitativní chemické složení pískovcového matrixu bylo stanoveno za použití energiově disperzního X-ray mikroanalýzátoru (EDAX, Apollo X) připojeného k SEMu (EDS). Analýzy byly provedeny při 10 kV a načítací čas byl 100 Ls. Všechny vzorky byly pozlacené, aby se předešlo jejich nabíjení.

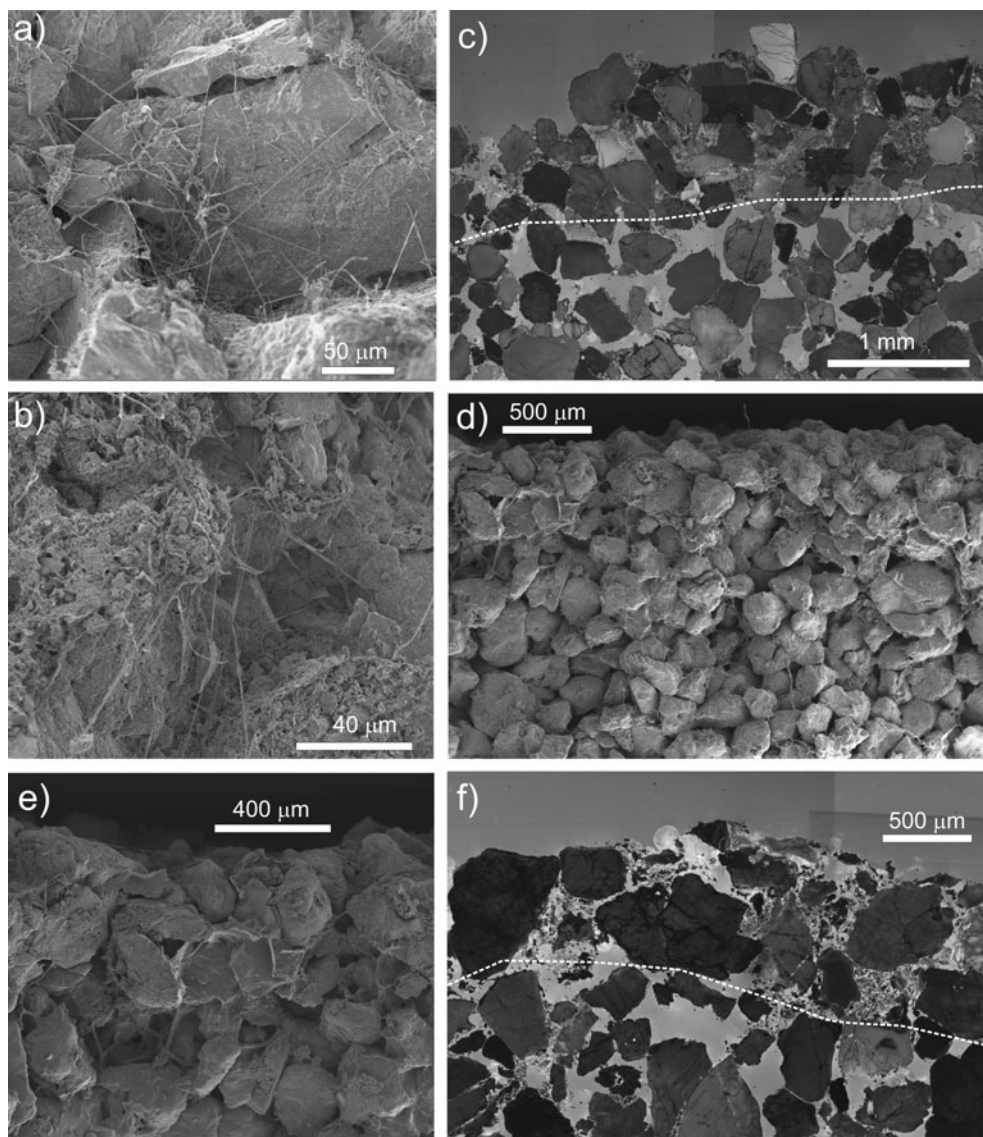
Infračervená spektrometrie (FTIR) byla použita pro ověření přítomnosti opálu (VŠCHT Praha). Dodatečně byl též použit CL mikroskop Simon-Neuser HC2-LM pro tzv. horkou katodoluminiscenci (MU Brno).

Při orientační analýze komunity mikroorganismů přítomných v pískovcové kůře byla použita sekvenace genu pro RNA malé podjednotky ribosomu (dále jen SSU) pro určení bakterií a řas (chloroplastů) a úseku ITS1-5,8S rRNA-ITS2 (dále jen ITS) pro určení hub. DNA byla extrahována ze sterilně odebrané kůry, amplifikována pomocí PCR z univerzálních primerů (U515F a U1406R pro SSU, Turner et al. 1999; ITSmyko F + R pro ITS, Martínková et al. 2010) a byla vytvořena knihovna klonů. Klony byly reamplifikovány pomocí PCR a sekvenovány v Laboratoři sekvenace DNA na PřF UK v Praze (3130 Genetic analyser, Applied Biosystems). K sekvencím byly vyhledány nejpodobnější sekvence v mezinárodní databázi GenBank pomocí programu BLAST, v případě nejednoznačnosti byla provedena orientační fylogenetická analýza (program PhyML, GTR + γ + I, maximum likelihood).

Výsledky

Skalní kůry se nacházejí na různých místech na starých stěných lomu (obr. 1). Studována byla především skalní kůra na dně lomu Střeleč v těsném jv. okolí čerpací stanice v lomu v nadmořské výšce okolo 250 m. Prostor byl těžen a čerpací stanice byla v tomto prostoru umístěna koncem roku 2005, takže skalní kůra se musela vyvinout během pouhých šesti let (vzorkováno a měřeno od roku 2011). Jde o subhorizontální povrch nacházející se zhruba 1 m nad hladinou podzemní vody (obr. 1a). Díky blízké hladině podzemní vody lze očekávat intenzivní přísun vlhkosti na tento povrch. Subhorizontální a nezastíněný povrch je také vystaven intenzivnímu slunečnímu osvětlení a tím výrazným změnám teploty během dne. Z měření dataloggerem v červenci 2012 vyplývá denní kolísání teploty v hloubce okolo 10 cm pod povrchem o 6–10 °C (teplota mezi 14–25 °C) při vlhkosti vzduchu v porézním prostoru pískovce 100 %. Povrch je zčásti kolonizován pouhým okem viditelnými lišejníky.

Obr. 2. Povrchy skalních kůr v lomu (a–c) a skalních kůr v Apoleně (d–f). a, b – houbová vlákna lišejníků; c – jíly vyplněná skalní kůra a podložní pískovec s volnými póry; d – řez skalní kůrou a pískovcem; e – detailní snímek téhož řezu s četnými organickými vlákny; f – řez skalní kůrou a pískovcem. Foto J. Schweigstillová.



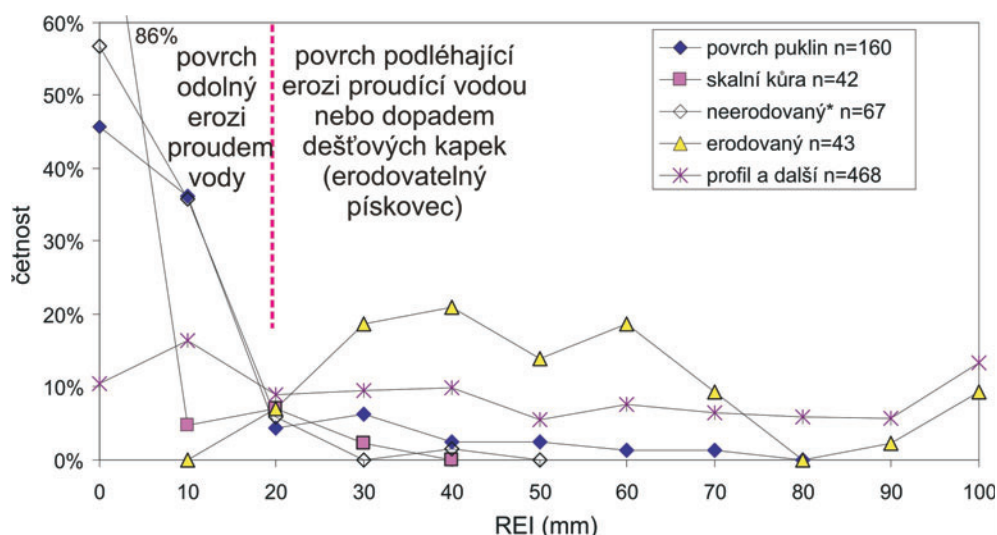
Při síťových zkouškách bylo zjištěno, že SK pískovec podléhající erozi proudící vodou (dále erodovatelný) obsahuje pouze 1,6 hmot. % frakce < 25 μm . XRF analýza a semi-kvantitativní rtg.-analýza ukázaly, že tuto frakci tvoří kaolinit (75 %), křemen (24 %) a illit (1 %) s obsahem 99,1 % SiO_2 a Al_2O_3 . Zbývajících 0,9 % jsou především K_2O , TiO_2 a Fe_2O_3 . Kaolinit je dobře uspořádaný. SAR změřený pro 13 vzorků pískovce je mezi 0,1–0,4 a kaolinit je tak jednoznačně nedisperzní (SAR < 10). Erodovatelný pískovec má v řezu relativně málo kontaktů mezi zrny (obr. 2).

Značné množství času bylo věnováno vyhledávání tmelu v erodovatelném pískovci. Katodoluminiscenční, SEM (EDS) analýza ani detailní SEM inspekce neprokázaly přítomnost křemenného, kalcitového nebo Fe-ox/hydrox. tmelu. Také FTIR analýzou jílovité a prachové frakce separované z pískovce nebyla prokázána přítomnost opálu.

Skalní kůry v lomu u čerpací stanice i na balvanu v skalním městě Apolena jsou tvořeny povrchovou zónou pískovce o mocnosti 0,5–1 mm s póry vyplněnými z velké části kaolinitem (obr. 2). V obou případech byla při pozorování v elektronovém mikroskopu v relativně velkých

množstvích zjištěna vlákna hub (součást lišejníků; obr. 2). Na fluorescenčním mikroskopu byly po obarvení barvivem DAPI pozorovány bakterie a chloroplasty řas.

Většinu sekvencí SSU z povrchové kůry z lomu tvořily zelené řasy z blízkého příbuzenstva druhů popsaných jako fotosyntetická složka lišejníků. Většinou šlo o organismy z příbuzenstva rodů *Coccomyxa* a *Staurastrum*. Sekvence plastidové SSU bohužel nedovoluje úplně přesné určení. Bakterie byly zastoupeny nečekaně jen třemi klony z celkem 23 a podle předpokladů odpovídaly izolátům z kyselých oligotrofních prostředí, např. rašeliniště. Sekvenací ITS byly nalezeny tři velmi divergentní druhy hub. Dvě z nich se podařilo fylogeneticky zařadit do skupiny *Lecanorales*, obsahující především lichenizované houby. Nejbližší známé sekvence se shodovaly pouze z 84, resp. ca 86 %, což neumožnilo jejich bližší určení a svědčí o tom, že jde zřejmě o nové druhy a rody hub. Artefakty sekvenace (chimérismus apod.) byly prakticky vyloučeny. Třetí sekvence byla nízké kvality, ale jednoznačně představuje divergentní věckovýtrusnou houbu ze skupiny *Capnodiales*, která obsahuje známé endolithické druhy.



Obr. 3. Histogram hodnot REI. Kategorie REI 100 mm obsahují také hodnoty přesahující REI 100 mm. Neerodovaný* je podmnožinou „puklinové povrchy“, n – počet měření.

Povrchy skalních kůr v lomu měly tahovou pevnost 64–183 kPa (6 měření), zatímco povrchy erodovatelného pískovce v lomu jen 2–14 kPa (17 měření; tab. 1 a 2), tj. v průměru 14× nižší. Ve skalním městě Apolena měly skalní kůry tahové pevnosti mezi 23 a > 150 kPa a povrch balvanu pískovce se současnými stopami eroze (stopy po dopadu dešťových kapek) tahovou pevnost 7–9 kPa, v jednom případě 33 kPa. Pevnosti povrchu skalních kůr zjištěné v lomu Střeleč a ve skalním městě Apolena jsou tedy obdobné. Podobně to platí i pro povrch pískovce podléhající erozi na obou lokalitách.

Technikou REI byly testovány následující typy povrchů v lomu: 1. povrchy puklinových ploch, 2. povrchy skalních kůr, 3. povrchy vystavené proudění vody a jevící známky fluvialní eroze, 4. povrchy vystavené proudění vody, které přesto nenesou známky eroze a 5. ostatní povrchy (zde převažují měření čerstvě odtěžených lomových stěn; obr. 3). Celkem bylo v SK pískovci provedeno 750 měření REI s hloubkou průniku vodního paprsku pohybující se v rozmezí od < 1 mm do 152 mm (obr. 3). Devadesát procent neerodovaných povrchů má hodnoty REI < 20 mm a 93 % erodovaných povrchů má REI > 20 mm (obr. 3), z čehož vyplývá, že hraniční hodnota REI mezi povrchem snadno erodovatelným a erozi odolávajícím je pro SK pískovec rovna 20 mm. Důvodem, proč není touto hraniční hodnotou REI = 0 mm, je vysoký tlak stříčky (180 kPa) použitý při REI testech, který výrazně převyšuje smykové napětí vyvolané prouděním běžného vodního toku. Tlakový paprsek stříčky tedy eroduje i povrchy, které by za přirozených podmínek erodovány nebyly (REI 0–20 mm). REI skalních kůr v lomu je velmi nízké, 86 % měřených hodnot spadá pod 5 mm (obr. 3). Skalní kůry v lomu Střeleč jsou povrchem s nejvyšší odolností vůči erozi.

K přibližnému zjištění, jaké zastoupení má erodovatelný pískovec v lomu, byla měření REI provedena též podél 240 m dlouhého horizontálního profilu vedeného v lomové stěně nejnižší nezatopené etáže v úseku mezi kanály S4 a S6 v úrovni 255 m n. m. Měření REI byla prováděna s krokem 0,5 m, posléze byl krok zvýšen na 1 m. Průměrně 64 % pískovce na tomto profilu by za přítomnosti proudící vody podleho erozi (Bruthans et al. 2012).

Diskuse

V pískovci podléhající erozi nebyl zjištěn opál, karbonát ani Fe cement, z čehož lze soudit, že soudržnost křemenných zrn v pískovci způsobuje kaolinit, kapilární síly a vzájemné zaklínění křemenných zrn. Výrazný pokles tahové pevnosti od přirozeně vlhkého stavu po nasycený stav pískovce (až o 2 řády, Bruthans et al. 2012) vylučuje možnost, že by pojivem erodovatelných pískovců mohl být křemen, kalcit nebo Fe oxidy, jejichž pevnost nemůže zásadně ovlivnit rostoucí nasycení vodou. Je pravděpodobné, že ke snížení tahové pevnosti dochází spíše vlivem oslabení jílovitého matrixu v důsledku zvýšení obsahu vody a vymizení kapilárních sil.

Hojná přítomnost houbových vláken (součást lišejníků) může hrát významnou roli při zpevnění skalních kůr. Pro ověření, zda za soudržnost skalní kůry v lomu jsou zodpovědná organická vlákna, byl vzorek skalní kůry, odebraný u čerpací stanice, umístěn do baňky s roztokem 30% peroxidu vodíku, který dobře rozkládá organickou hmotu. Během sedmi dnů došlo k úplnému zmizení původně tmavé krusty a na dně baňky zbyl sypký bílý písek. Kontrolní vzorek těžké krusty umístěný do vody zůstal intaktní. Výsledek experimentu ukazuje, že organická hmot (pravděpodobně houbová vlákna lišejníků) je zodpovědná za odolnost skalní kůry na dně lomu vůči erozi. Protože lišejníky mohou ve vlhkém prostředí kolonizovat skalní povrchy velmi rychle, není překvapivé, že skalní krusty mohou dosáhnout vysoké odolnosti vůči erozi již během pouhých šesti let. Je možné, že opál hraje roli teprve na výrazně starších površích, kde se může pro malou rozpustnost snáze akumulovat (V. Cílek, pís. sděl.).

O roli lišejníků a dalších organismů při stabilizaci a naopak erozi povrchu pískovce diskutují Young et al. (2009). Většina jimi citovaných autorů dochází k závěru, že lišejníky jsou destruktivním činitelem a vedou k erozi povrchu pískovce. Nicméně Bjelland a Thorseth (2002) ukázali, že na lokalitách, kde by jinak docházelo k velmi vysoké rychlosti eroze, mohou lišejníky povrch naopak chránit. Také Mikuláš (1999) dokumentoval ochranný efekt lišejníků na povrchu slabě cementovaného pískovce ve Velké Británii.

Tabulka 1. Tahové pevnosti za přirozené vlhkosti naměřené v lomu Střeleč

typ povrchu	tahová pevnost povrchu (kPa)	REI (mm)	DR (mm)
E.P.	2,2	96	> 70
E.P.	2,8	94	> 70
E.P.	3,0	n.d	n.d
E.P.	4,5	n.d	n.d
E.P.	5,8	117	55
E.P.	6,0	83	> 70
E.P.	6,0	n.d	n.d
E.P.	6,1	104	44
E.P.	6,4	107	> 70
E.P.	6	72	> 70
E.P.	6,9	n.d	n.d
E.P.	6,9	n.d	n.d
E.P.	8,5	n.d	n.d
E.P.	9,2	85	52
E.P.	12	n.d	n.d
E.P.	13	n.d	n.d
E.P.	14	42	30
S.K.	64	n.d	n.d
S.K.	75	n.d	n.d
S.K.	84	n.d	n.d
S.K.	91	0	10
S.K.	118	0	10
S.K.	183	0	10

E.P. – pískovec erodovatelný proudem vody nebo dešťovým rohem; S.K. – skalní kůra

Kurtz a Netoff (2001) popisují stabilizaci povrchu pískovce díky přítomnosti mikroorganismů a pomocí pokusů doložili zvýšení mechanické pevnosti povrchu (penetrační testy). Rovněž popisují, že organická vlákna mohou zachycovat jíly nesené větrem, což může být vysvětlením pro vysoký obsah jílu ve skalní kůře v lomu. Přítomnost vláken hub popisují Vařilová et al. (2011) z povrchové zóny pískovce na Pravčické bráně. Zajímavé je, že houby tvořící kůru v lomu Střeleč patří patrně k neznámým a dost divergentním druhům. Podobné druhy nebyly dosud při molekulární analýze skalních kůr ani jiných prostředí nalezeny, otázkou je, zda byly někdy popsány alespoň morfologicky.

Schopnost lišejníků rychle kolonizovat povrch pískovce, zpevnit ho a zamezit erozi může potenciálně vysvětlit starou kamenickou praxi, kdy po odtěžení jedné vrstvy štuků se čekalo několik let, než se těžila další vrstva štuků, aby se na odhaleném povrchu pískovce vytvořila zpevněná vrstva (Podroužek 2012). Zpevněnou stranou byly také stavební kvádry umísťovány do líce zdi. Podroužek (2012) uvádí, že při těžbě „podrubou“ nebyla u pískovců na rozdíl od jiných hornin pálena výdřeva, protože oxidace způsobovala

Tabulka 2. Tahové pevnosti za přirozené vlhkosti naměřené ve skalním městě Apolena

typ povrchu	tahová pevnost povrchu (kPa)	REI (mm)	DR (mm)
E.P.	7	29	35
E.P.	8	35	33
E.P.	9	27	33
E.P.	33	30	35
S.K.	23	n.d	n.d
S.K.	31	4	21
S.K.	44	3	19
S.K.	45	n.d	n.d
S.K.	65	0	23
S.K.	125	0	21
S.K.	137	0	19
S.K.	> 153	0	18

E.P. – pískovec erodovatelný proudem vody nebo dešťovým rohem; S.K. – skalní kůra

rozklad pojiva a pískovec pozbýval soudržnosti. To by opět mohlo indikovat roli organických vláken při zpevnění povrchů.

Závěr

Skalní kůry v lomu Střeleč i na přírodním výchozu ve skalním městě Apolena tvoří 0,5–1 mm tenká zóna pískovce, jehož póry jsou vyplněny kaolinitem. Skalní kůra včetně kaolinitu je protkána sítí houbových vláken lišejníků. Na základě srovnávacích měření jsou skalní kůry velmi odolné proti erozi proudící vodou. Skalní kůry mají značnou tahovou pevnost (60–180 kPa; v průměru 14× vyšší než erodovatelný pískovec).

Na základě testu s látkou rozkládající organickou hmotu bylo usouzeno, že houbová vlákna lišejníků zásadně přispívají ke stabilizaci povrchu a zvýšení jeho odolnosti vůči erozi. V optimálních podmínkách – při intenzivním slunečním osvětlení a dostatečné vlhkosti – se skalní kůry v lomu vyvinuly během pouhých šesti let a jejich pevnost v tahu je srovnatelná s hodnotami naměřenými na přírodních výchozech pískovce ve skalním městě Apolena. Studie ukazuje, že skalní kůry mohou vznikat i na horizontálních površích pískovce.

Z kritického zhodnocení starších prací týkajících se skalních kůr vyplývá, že opál není nutnou součástí skalních kůr. Na řadě lokalit byl předchozími autory zjištěn vysoký obsah jílu v povrchové zóně pískovce. Nelze vyloučit, že podobně jako v lomu Střeleč byly destičky jílu zachyceny na struktuře houbových vláken, které tak mohou hrát významnou roli při stabilizaci povrchu pískovce nejen v lomu Střeleč a oblasti Apolena, ale i v dalších oblastech kvádrových pískovců v České republice.

Měření tahové pevnosti a odolnosti vůči erozi potvrdila, že skalní kůry mohou hrát klíčovou roli při stabilizaci

pískovcového reliéfu. Co se týče složení skalních kůr na jednotlivých lokalitách, závěry dosavadních studií se značně liší a nelze tak určit, jaký mechanismus vzniku skalních kůr převládá. Bylo proto započato studium skalních kůr i na dalších lokalitách kvádrových pískovců.

Poděkování. Autoři děkují J. Adamovičovi a J. Mertlíkovi za podnětnou diskusi, recenzentům V. Cílkovi a Z. Štaffenovi za kladné hodnocení, V. Machovičovi a J. Leichmanovi za provedené analýzy; dále D. Světlíkovi za pomoc při terénních měřeních v letech 2009–2011 a vedení akciové společnosti Sklopísek Střeleč a D. Smutkovi za umožnění terénního průzkumu v lomu. Tento výzkum byl podpořen grantem Univerzity Karlovy (grant GAUK 380511, výzkumný plán MSM0021620855), Grantovou agenturou ČR 13-28040S a podporou rozvoje výzkumné organizace RVO:68378297.

Literatura

- ADAMOVIČ, J. – MIKULÁŠ, R. – CÍLEK, V. (2010): Atlas pískovcových skalních měst České a Slovenské republiky. – 459 str. Academia. Praha.
- ADAMOVIČ, J. – MIKULÁŠ, R. – SCHWEIGSTILLOVÁ, J. – BÖHMOVÁ, V. (2011): Porosity changes induced by salt weathering of sandstones, Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. – *Acta Geodyn. Geomater.* 8, 1, 29–45.
- BJELLAND, T. – THORSETH, I. H. (2002): Comparative studies of the lichen-rock interface of four lichens in Vingen, western Norway. – *Chem. Geology* 192, 81–98.
- BRUTHANS, J. – SOUKUP, J. – SVĚTLÍK, D. – SCHWEIGSTILLOVÁ, J. – MAYO, A. L. (2013): Zpevněné povrchy puklin v kvádrovém pískovci a jejich role při vzniku skalních měst. – *Zpr. geol. Výzk. v Roce 2012*, 109–115.
- BRUTHANS, J. – SVĚTLÍK, D. – SOUKUP, J. – SCHWEIGSTILLOVÁ, J. – VALEK, J. – SEDLACKOVÁ, M. – MAYO, A. L. (2012): Fast evolving conduits in clay-bonded sandstone: Characterization, erosion processes and significance for origin of sandstone landforms. – *Geomorphology* 177–178, 178–193.
- CÍLEK, V. (1995): Opálové inkrustace skalních povrchů. – *Zpr. geol. Výzk. v Roce 1994*, 21–22.
- CÍLEK, V. – LANGROVÁ, A. (1994): Skalní kůry a solné zvětvávání v CHKO Labské pískovce. – *Ochr. Přír.* 49, 8, 227–231.
- FAULKNER, H. – WILSON, B. R. – SOLMAN, K. – ALEXANDER, R. (2001): Comparison of three cation extraction methods and their use in determination of sodium adsorption ratios of some sodic soils. – *Commun. soil Sci. plant Anal.* 32, 1765–1777.
- KURTZ, H. D. – NETOFF, D. I. (2001): Stabilization of friable sandstone surfaces in a desiccating, wind-abraded environment of south-central Utah by rock surface microorganisms. – *J. arid Environments* 48, 89–100.
- MARTÍNKOVÁ, N. – HORÁČEK, I. – BAČKOR, P. – BARTONIČKA, T. – BLAŽKOVÁ, P. – ČERVENÝ, J. – FALTEISEK, L. – GAISLER, J. – HANZA, V. – HORÁČEK, D. – HUBÁLEK, Z. – JAHELKOVÁ, H. et al. (2010): Increasing incidence of *Geomyces destructans* fungus in bats from the Czech Republic and Slovakia. – *PLoS ONE* 5, 11, e13853.
- MIKULÁŠ, R. (1999): The Protective Effect of Lichens and the Origin of Modern Bulge-Like Traces on Weakly Lithified Sandstones (Hilbre Islands, Wirral Peninsula, Great Britain). – *Ichnos* 6, 4, 261–268.
- PODROUŽEK, K. (2012): Těžba pískovců – typy, způsoby, příklady. Péče o historická důlní díla vzniklá do konce 19. století. – 108 str. NPÚ ÚOP. Ústí nad Labem.
- SOUKUP, J. – BRUTHANS, J. – SVĚTLÍK, D. – SCHWEIGSTILLOVÁ, J. – SMUTEK, D. (2013): Sebeorganizovaný systém otevřených puklin vzniklých prouděním podzemní vody v kvádrovém pískovci v lomu Střeleč. – *Zpr. geol. Výzk. v Roce 2012*, 296–304.
- TURNER, S. – PRYER, K. M. – MIAO, V. P. W. – PALMER, J. D. (1999): Investigating deep phylogenetic relationships among cyanobacteria and plastids by small subunit rRNA sequence analysis. – *J. eukaryotic Microbiology* 46, 327–338.
- ULIČNÝ, D. (2001): Depositional systems and sequence stratigraphy of coarse-grained deltas in a shallow-marine, strike-slip setting: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. – *Sedimentology* 48, 599–628.
- VARILOVÁ, Z. – PŘIKRYL, R. – CÍLEK, V. (2011): Pravčice Rock Arch (Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic) deterioration due to natural and anthropogenic weathering. – *Environ. Earth Sci.* 63, 1861–1878.
- YOUNG, R. W. – WRAY, R. A. L. – YOUNG, A. R. M. (2009): Sandstone Landforms. – 314 str. Cambridge Univ. Press. Cambridge.