

Vliv biokolizace na erozi a odolnost různých typů pískovcových povrchů v lomu a na přirozených výchozech

Impact of biocolonization on erosion and resistance of different types of sandstone surfaces in a quarry and in natural outcrops

MARTIN SLAVÍK¹ – JIŘÍ BRUTHANS¹ – JANA SCHWEIGSTILOVÁ² – LUKÁŠ FALTEISEK¹

¹ Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, Albertov 6, 128 43 Praha 2; slavikma@natur.cuni.cz

² Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i., V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8

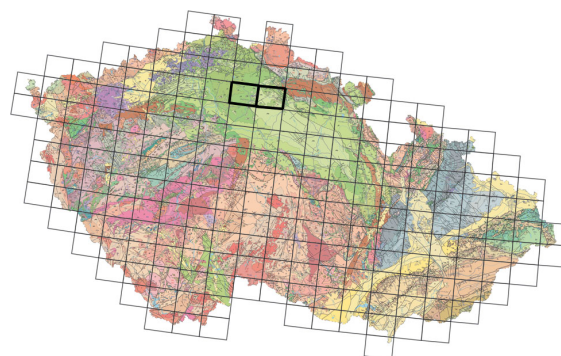
Please cite this article as: Slavík, M. – Bruthans, J. – Schweigstilová, J. – Falteisek, L. (2017): Impact of biocolonization on erosion and resistance of different types of sandstone surfaces in a quarry and in natural outcrops. – Geoscience Research Reports, 50, 81–87. (in Czech)

Key words: biocolonization, erosion, sandstone, case hardening, tensile strength, SEM, natural outcrops

Summary: Over recent years, the effect of biocolonization of sandstone surfaces has been widely discussed. A large number of studies proved deteriorating effect of organisms. On the other hand, some studies demonstrated that biologically-initiated rock crust protects sandstone surfaces against various weathering processes, and therefore decreases the erosion rate of sandstones.

In previous studies, biologically-initiated rock crust, developed on weak sandstone surfaces in the Sřteleč Quarry (Bohemian Paradise, Czech Republic), was observed, and two potential ways of surface protection against weathering were indicated: tectonic hardening, and biocolonization. Recently, it was proven that the biologically-initiated rock crust in the quarry protects underlying material against rain and flowing water erosion, and significantly changes the sandstone hydraulic properties. The presented study relates to the previous investigations. Biologically-initiated rock crust in the quarry was studied from mineralogical and biological points of view. Mechanical properties and resistance to erosion of biologically-initiated rock crust at tectonic surfaces were compared with the non-tectonic surfaces. Results of the studied crust tensile strength were compared to eight sandstone outcrops in the Bohemian Paradise and the Česká Lípa region outside the quarry.

Based on sequencing and microscopy of the biologically-initiated rock crust in the quarry, the organic matter is mostly formed by various fungi and green algae. The surface zone is enriched with kaolinite and clay-to-silt sized quartz particles (Table 1). Using the drilling resistance method, relative erodibility indicator



(03-33 Mladá Boleslav, 03-34 Sobotka)

(REI) and measuring of tensile strength *in situ*, it was determined that there is no relevant difference in the protection by biologically-initiated rock crust between tectonic and non-tectonic surfaces (Table 1, Fig. 4). Only measuring of tensile strength in laboratory showed ~6 times higher increase in case of biocolonized tectonic surfaces. We believe this is caused by heterogeneity of sampled material or by damage of the material during its transport. Since all the other methods found no difference, biocolonized tectonic surfaces in the quarry seem to have generally the same mechanical properties as non-tectonic biocolonized surfaces.

From comparison of tensile strength of biologically-initiated rock crust in the quarry with eight crusts in natural outcrops outside the quarry, it was demonstrated that the studied surfaces in the quarry are surprisingly resistant. Their mechanical properties are comparable to natural biologically-initiated rock crusts in sandstone rock cities (Fig. 6). Since the biologically-initiated crust in the quarry developed within the last 10–50 years, it seems that organisms are capable to harden and stabilize fresh surfaces in several years or in a few decades. Such a rate is much higher than the mineral case hardening. The stabilizing effect of organisms may provide a primary protection against weathering after rock falls, at quarry faces, road cuts, and other rapidly eroded sandstone surfaces. However, protective effect of biologically-initiated rock crust may vary according to type of material, age and degree of erosion. The stabilizing effect should be quantified as a ratio of resistance (strength) of surface and its subsurface.

Na skalní kůru existuje několik úhlů pohledu, a to především kvůli velkému množství definic, které mnohdy nejsou ve vzájemné shodě. Obecně lze však za skalní kůru

označit jakoukoliv několik milimetrů až centimetrů mocnou druhotně zpevněnou zónu na povrchu horniny, např. pískovce (Cílek – Langrová 1994, Adamovič et al.

2010). Cílek a Langrová (1994) rozlišují vnitřní kůru, která vznikla zpevněním samotného pískovce, a vnější kůru, vzniklou vysrážením železitého tmelu na povrchu pískovce.

Skalní kůry pokrývají celou řadu pískovcových povrchů České republiky (Cílek – Langrová 1994, Adamovič et al. 2010). Několik studií je věnováno vlivu skalních kůr na vznik a vývoj voštin, skalních věží a sloupků ve tvaru přesýpacích hodin a zejména jejich roli při ochraně povrchů před erozí (Cílek – Langrová 1994, Goudie et al. 1997, Adamovič et al. 2010, Slavík et al. 2017).

Při respektování rozdělení podle Cílka a Langrové (1994) se tento článek bude věnovat pouze vnitřním kůrám, konkrétně biologicky obohacené zóně na povrchu pískovce zasahující několik milimetrů do hloubky (Gómez-Alarcón et al. 1995). Takový typ skalní kůry budeme v následujícím textu nazývat „biogenní skalní kůra“. Pod tímto pojmem chápeme povrchovou zónu pískovce, která přispívá k odolnosti materiálu vůči erozi, a to částečně, či výhradně vlivem organické hmoty.

Bylo publikováno mnoho studií věnovaných vlivu biokolizace na rychlost eroze pískovce. Část z nich jasně prokázala proces zvaný bioeroze (popř. biovětrávání), tzn. mechanické či biochemické narušování povrchu pískovce vlivem organismů (např. Paradise 1997, Robinson – Williams 2000). V určitém rozporu s tím jsou závěry druhé skupiny studií, které naopak tvrdí, že biogenní skalní kůry jsou schopny chránit povrch pískovce před erozí vlivem větru, tekoucí a dešťové vody, kolísání teplot nebo srážení solí (např. Viles – Goudie 2004).

Ochranný efekt biogenní skalní kůry však bývá často odvozen od porovnávání organismy kolonizovaného povrchu s povrchem bez jakékoliv zjevné kolonizace (Ariño et al. 1995, Mikuláš 1999). Tímto přístupem je tak přehlížena možnost, že organismy mohou kolonizovat relativně stabilní povrchy a nemusí být schopny kolonizovat rychle ustupující povrchy. Nelze tak vyloučit, že biokolizace může být následkem, nikoliv příčinou stability povrchů. A podobně, že absence biokolizace může být následkem rychlé eroze pískovcového povrchu, nikoliv obráceně. Z těchto důvodů je nutné zjištěné vlastnosti biogenní skalní kůry vždy vztahovat k vlastnostem pískovce v jejím podloží (Slavík et al. 2017).

Předchozí studie v činném lomu Střeleč v Českém ráji se věnovaly rozdílu v mechanických vlastnostech především mezi biokolizovanými a nebiokolizovanými povrchy, puklinovými plochami či povrchy tzv. erodovaného pískovce. Bylo zjištěno, že povrch pískovce je v lomu před erozí chráněn dvěma způsoby – vlivem biogenních skalních kůr (Schweigstilllová et al. 2013) a díky zpevněnému povrchu tektonických puklin (Bruthans et al. 2012). Poslední studie v lomu Střeleč byla zaměřena na změny mechanických a hydraulických vlastností pískovce, vyplývající z přítomnosti biogenní skalní kůry (Slavík et al. 2017). V této práci na základě studia šesti výchozů v lomu autoři prokázali, že biogenní skalní kůra tvoří u povrchu pískovce zpevňující vrstvu, která chrání podložní materiál před erozí deštěm a tekoucí vodou a významně mění hydraulické vlastnosti pískovce. Příspěvek k odolnosti pískovcového

povrchu je z největší části způsoben přítomností organické hmoty (Slavík et al. 2017).

Cílem této práce je charakterizovat studovanou biogenní skalní kůru v lomu Střeleč z mineralogického i biologického hlediska, zjistit rozdíl ve funkci biogenní skalní kůry na dvou typech povrchu v lomu (biologicky kolonizovaném atektonickém povrchu a biologicky kolonizovaném povrchu na tektonických puklinách) a pokusit se porovnat biogenní skalní kůry v lomu s běžnými kůrami na přirozeném povrchu pískovců v Českém ráji a na Českolipsku. Oproti studii Slavíka et al. (2017), jejímž primárním cílem bylo zjistit obecnou funkci biogenní skalní kůry, je tato práce více zaměřena na jednotlivé typy povrchů a jejich zpevnění.

Studovaná oblast a metodika

Studie probíhala především v činném lomu Sklopísek Střeleč, a. s., kde se více než půl století těží křemenný písek vysoké kvality pro sklářský průmysl. Lom v Českém ráji, cca 2,5 km jv. od hradu Trosky, je situován v hruboskalském pískovci (Čech et al. 1980). Ten sedimentoval ve svrchním turonu a spodním coniaku (teplické souvrství) a jeho mocnost na území lomu dosahuje zhruba 85 m, přičemž svrchní část vrstev je interpretována jako soustava tří těles hrubozrnných delt se šikmými vrstevními plochami (foresety) o úklonu 4–18° (Uličný 2001).

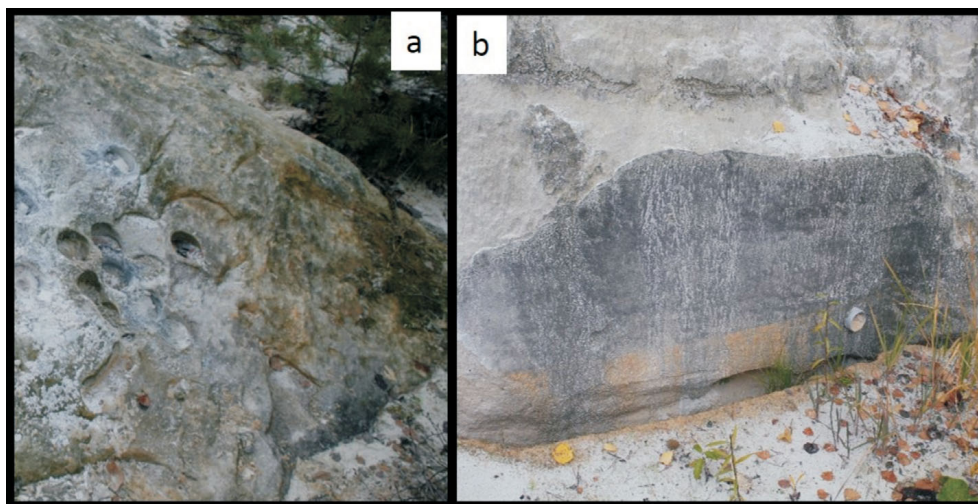
Studovaný křemenný pískovec obsahuje 1,4 % kaolinitu. Pórozita pískovce je v prostoru lomu proměnlivá – od 22 % až po 31 % (Schweigstilllová et al. 2013, Slavík et al. 2017). Oproti běžným, více cementovaným pískovcům v české křídové pánvi je střelečský pískovec méně pevný; nejpevnější polohy v lomu dosahují pevnosti v prostém tlaku 14 MPa a tahové pevnosti 280 kPa (Bruthans et al. 2012). Některé polohy v lomu jsou naopak nesoudržné a materiál lze geotechnicky zařadit jako „uzamčený písek“, tedy materiál s relativně vysokou pevností v prostém tlaku, a přesto bez jakéhokoli tmelu (Bruthans et al. 2014). Část povrchů je v lomu zpevněna tektonickými puklinami (Bruthans et al. 2012), či biogenní skalní kůrou (Schweigstilllová et al. 2013, Slavík et al. 2017).

Těžbou čerstvě obnažené výchozy sklářského pískovce mívají bílou barvu, zatímco povrchy postižené biologickou kolonizací, která je v lomu patrná již po 1–2 letech, jsou zelené nebo šedé. Studované povrchy byly 10–50 let staré.

V lomu byly ke studiu vybrány dva typy povrchů: 1. biologicky kolonizovaný nerovný atektonický povrch (dále A), 2. biologicky kolonizovaný povrch na tektonických puklinách (dále B). Za biologicky kolonizovaný povrch pokládáme ty povrchy, u kterých byla v průběhu studie pomocí mikroskopie zjištěna organická hmota a které podle Slavíka et al. (2017) mají významné množství organického uhlíku v povrchové zóně pískovce (cca 8–150 g/m²), které je ve srovnání s podložím signifikantně větší. Pro srovnání, povrchy bez biokolizace vykazují v lomu podle Slavíka et al. (2017) 1 g/m². Tektonický vs. atektonický povrch byl vybrán podle studie Bruthanse et al. (2012). Oba druhy povrchu jsou znázorněny na obr. 1. Vlastnosti jednotlivých

Obr. 1. Příklady studovaných povrchů. a – biologicky kolonizovaný atektonický povrch A, b – biologicky kolonizovaný povrch B na tektonických puklinách.

Fig. 1. Examples of studied surfaces. a – non-tectonic surface A colonized by organisms, b – surface B colonized by organisms along tectonic fractures.



typů povrchu byly vždy porovnány s vlastnostmi jejich příslušného podloží.

Měření tahové pevnosti (viz dále) bylo v rámci této práce provedeno také v oblastech mimo lom, konkrétně na dalších šesti lokalitách: 1. Pařez – opuštěný lůmek u zříceniny hradu Pařez cca 2,5 km jv. od lomu Střeleč (jemnozrnny křemenný pískovec odpovídající polohám v lomu); 2. Mladějov A – na biogenních skalních kůrách u obce Mladějov cca 200 m od jižního okraje lomu (jemnozrnny až středně zrnitý pískovec turonského až coniackého stáří, mnohdy patrné tektonické povrchy); 3. Mladějov B – o cca 100 m více na západ na povrchu materiálu odpovídajícího lokalitě 2, ovšem s místy vyvinutými voštinami a beze známky tektonických puklin; 4. Okna A – v bývalé pískovně cca 1,5 km v. od obce Okna (Českolipsko, středně zrnitý až hrubozrnny křemenný turonský pískovec); 5. Okna B – cca o 170 m z. od lokality 4, na skalních výchozech středně až hrubě zrnitého turonského pískovce s místy vyvinutými voštinami; 6. Radvánovice – cca 600 m jv. směrem od obce Radvánovice (Liberecký kraj) na výchozu středně až hrubě zrnitého turonského až coniackého pískovce s místy vyvinutými voštinami. Dosažené výsledky byly také porovnány s měřeními Schweigstilllové et al. (2013) ve skalním městě Apolena (jemnozrnny křemenný pískovec turonského až coniackého stáří, dále lokalita Apolena) a s měřením Vorlíčka (2017) na silně porušené pískovcové skalní věži u Studeného průchodu v Příhrazských skalách (křemenné kvádrové pískovce coniackého stáří, střední až hrubá zrnitost, dále lokalita Mužský). Přírodní biokolizované povrchy byly do studie vybírány na základě zkušeností autorů a také podle barvy povrchu pískovce, která se v předchozím výzkumu ukázala jako velice vhodný indikátor biokolizace.

Vzorky pro studium biogenní skalní kůry byly odebrány z povrchu pískovce i z jeho podloží pomocí ruční akumulátorové vrtačky s jádrovnicí vybavenou diamantovou korunkou o průměru 83 mm; odběr byl proveden nasucho při malých otáčkách. Vzorky, mocné 2–6 cm, byly následně pevně omotány balící fólií, aby se zamezilo jejich poškození při transportu.

Pro stanovení struktury a chemického složení pískovco-

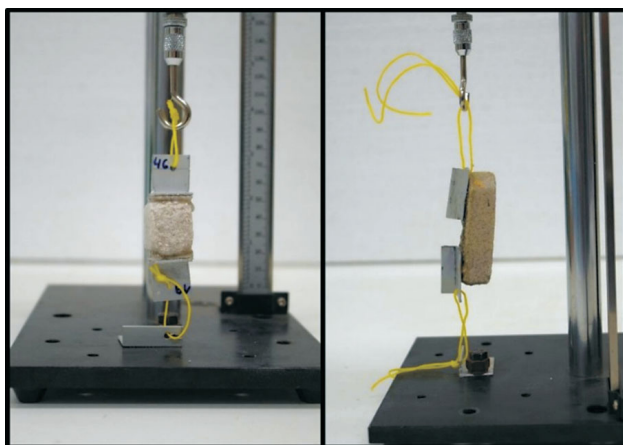
vého matrixu na leštěných nábrusech byl použit skenovací elektronový mikroskop Quanta 450 (FEI), vybavený energiově disperzním spektrometrem (EDAX, Apollo X), a detektor pro zpětně odražené elektrony (BSE). Vzorky byly řezány kolmo k povrchu, impregnovány epoxidovou pryskyřicí a pokoveny. Pro studování množství organické hmoty a jejího průniku dovnitř pískovce byly vzorky barveny citrátem olova (metoda kontrastování), omyty, vysušeny a znovu pokoveny.

Při analýze komunit hub kolonizujících pískovcový povrch byla použita sekvenace úseku ITS1, 5,8S rDNA a ITS2. DNA byla extrahována ze sterilně odebrané kůry a amplifikována pomocí polymerázové řetězové reakce. Pro určení řas byl seškrab z povrchu pískovce vyset na agar s BBM (Bold Basal Medium) a po sedmi dnech pozorován optickým mikroskopem. Projevy biokolizace byly sledovány na vzorcích odebraných z nejbližšího okolí vzorků použitých pro měření mechanických vlastností, tedy na stejných stěnách, avšak na různých vzorcích – oba přístupy se vzájemně vylučují z důvodu poškození vzorku.

Ke zjištění odolnosti pískovce vůči abrazi v různých hloubkách pod povrchem a také pro zjištění mocnosti biogenní skalní kůry byla použita metoda tzv. odporového vrtání (v anglické literatuře drilling resistance, Pamplona et al. 2007). Při této metodě bylo pomocí přístroje Tersis 2 vidiovým vrtákem o průměru 3 mm za konstantního přítlaku pro daný vzorek (0,09–0,29 baru) vrtáno do pískovce a přitom byl zaznamenán odpor vůči vrtání (s/mm) s rozlišením 0,25 mm.

Relativní odolnost pískovce vůči erozi byla na odebraných vysušených vzorcích měřena v laboratoři pomocí techniky REI jak na biogenní skalní kůře, tak v jejím podloží. V následujícím textu bude hloubka erodované díry v mm označována jako REI (relative erodibility indicator, Bruthans et al. 2012).

Tahová pevnost je klíčovým parametrem ukazujícím odolnost materiálu vůči erozi (Bruthans et al. 2014). Měření byla přímo v terénu podle již dříve publikovaných studií (Bruthans et al. 2012, Schweigstilllová et al. 2013) kolmo na povrch pískovce. Jelikož *in situ* může tahovou pevnost ovlivňovat gravitační zatížení pískovce (Bruthans et al.



Obr. 2. Pískovcové hranolky připravené pro měření tahové pevnosti v laboratoři.

Fig. 2. Sandstone prisms prepared for tensile strength measurements.

2014), byla tahová pevnost měřena také v laboratoři na suchých hranolcích pískovce o rozměrech cca $5 \times 2 \times 2$ cm, kde delší stranu hranolku tvoří vnější povrch (viz obr. 2), a to pro hranolky odebrané jak z povrchu pískovce, tak z jeho podloží. Štítky byly lepeny na vnější povrch a trhány na rozdíl od terénních měření paralelně s povrchem.

Výsledky a diskuse

Z výsledků mikroskopie vyplývá, že organická hmota, přítomná na obou typech povrchů, zasahuje do hloubky cca 1–2 mm (viz obr. 3). Zhruba 0,2–2 mm mocná zóna obou typů povrchu pískovce (tab. 1) je obohacena taktéž o kaolinit a jemnozrnné křemenné částice (obr. 3). Vyplnění porů v povrchové zóně pískovce kaolinitem našli ve své studii i Schweigstillová et al. (2013).

Biogenní skalní kůra je tvořena převážně houbami a zelenými řasami. Z organismů byly ve zkoumaných vzorcích zjištěny především zelené řasy patřící k rodům *Apatococcus*, *Coccomyxa* a *Klebsormidium*, dále na dvou vzorcích *Diplosphaera*. Sekvenací bylo zjištěno na 16 druhů vřecokovýtrusných hub a 2 druhy stopkovýtrusných. Zajímavý je nález mykorrhizní lakovky statné (*Laccaria proxima*), vázáné na borovici. Jelikož nejbližší borovice roste 10 m od nálezů tohoto organismu, zdá se, že podhoubí může prorůst pískovcem na překvapivé vzdálenosti. V rámci povrchů A, B nebyly nalezeny žádné nápadné zákonitosti ve výskytu organismů.

Z odporového vrtání vychází, že zpevnění pískovce vlivem biogenní skalní kůry zasahuje v průměru 3,7 mm pod pískovcový povrch v případě povrchu A a 3,2 mm v případě povrchu B (tab. 1, obr. 4). Pro typ povrchu A má zóna povrchového zpevnění v průměru 9,5× vyšší odpor vůči vrtání než její podloží, v případě povrchu B je odpor průměrně navýšen 6× (tab. 1). Mezi typy povrchu A a B není statistický rozdíl ani v mocnosti zvýšeného zpevnění pískovce vlivem biogenní skalní kůry, ani v poměru odporu vůči vrtání mezi biogenní skalní kůrou a jejím podložím.

Tabulka 1. Shrnující tabulka hodnot měřených parametrů v lomu
Table 1. Summarizing table of measured parameters

method	parameter	A	B
MS	thickness of zone with fines (mm)	0.5–1.5	0.5–2.0
μ DR	crust thickness (mm)	3.7 ± 0.5 (13)	3.2 ± 0.9 (6)
μ DR	mean drilling resistance ratio between crust/subsurface	9.5	6
REI	erodibility of surface (mm)	1 ± 1 (6)	1 ± 1 (6)
REI	erodibility of subsurface (mm)	8 ± 2 (6)	13 ± 3 (6)
REI	erodibility ratio surface/subsurface	8	13
TS <i>in situ</i>	average of surface (kPa)	159 (8)	245 (5)
TS <i>in situ</i>	average of subsurface (kPa)	41 (3)	95 (5)
TS <i>in situ</i>	surface/subsurface ratio	3.9	2.6
TS in lab	average of surface (kPa)	57 (7)	101 (4)
TS in lab	average of subsurface (kPa)	18 (3)	5 (5)
TS in lab	surface/subsurface ratio	3.2	20.2
TS	ratio of tensile strength of surface <i>in situ</i> /in laboratory	2.8	2.4

Metoda udána zkratkou v levém sloupci: MS – mikroskopie; μ DR – odporové vrtání; REI – relative erodibility indicator; TS *in situ* – tahová pevnost měřena na výchozu *in situ*; TS in lab – tahová pevnost měřena na hranolcích v laboratoři. Množství měřených hodnot je udáno v závorce. A – biologicky kolonizovaný nerovný atektonický povrch, B – biologicky kolonizovaný povrch na tektonických puklinách.

Method is given in column on the left: MS – microscopy; μ DR – drilling resistance; REI – relative erodibility indicator; TS *in situ* – tensile strength measured at the outcrop *in situ*; TS in lab – tensile strength measured on prisms in laboratory. Number of measurements is given in brackets. A – biologically-colonized non-tectonic surface, B – biologically-colonized surface on tectonic fissures.

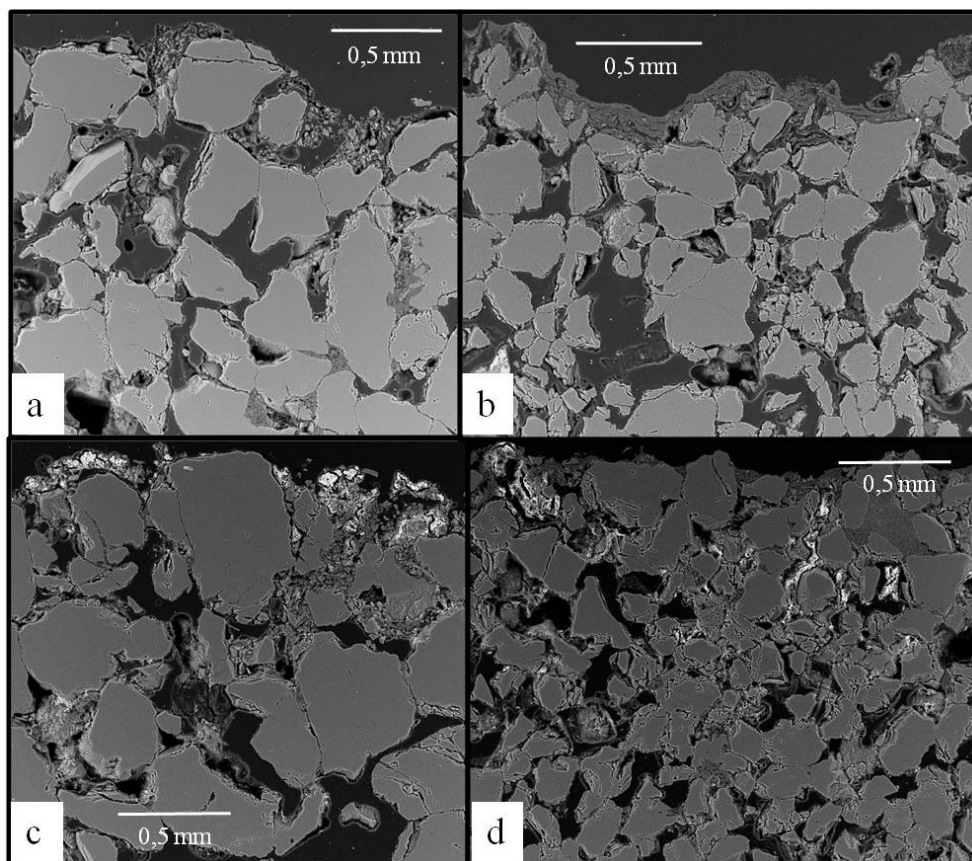
Výsledky získané z odporového vrtání v laboratoři pomocí přístroje Tersis 2 na rozdíl od terénního měření (Schweigstillová et al. 2013) pomocí ruční vrtačky PZZ (přístroj pro zkoušky zdiva) ukazují povrchové zpevnění biokolonizací. Pro studium biogenní skalní kůry není přístroj PZZ vhodný, jelikož jeho destruktivní účinky vlivem přiklepu jsou příliš vysoké, a proto má přístroj nízkou rozlišovací schopnost.

Typ povrchu A vykazoval v průměru 8× vyšší relativní odolnost vůči erozi než jeho podloží, v případě povrchu B je tento poměr 13 (tab. 1, obr. 5). Mezi oběma povrchy není statisticky významný rozdíl. Získané hodnoty souhlasí s terénním měřením Bruthanse et al. (2012), kteří pro biogenní skalní kůry v lomu i mimo lokality A, B uvádějí, že 86 % naměřených hodnot REI spadá pod 5 mm.

Tahová pevnost pískovce měřená *in situ* je na povrchu typu A 3,9× vyšší než v jeho podloží, v případě povrchu

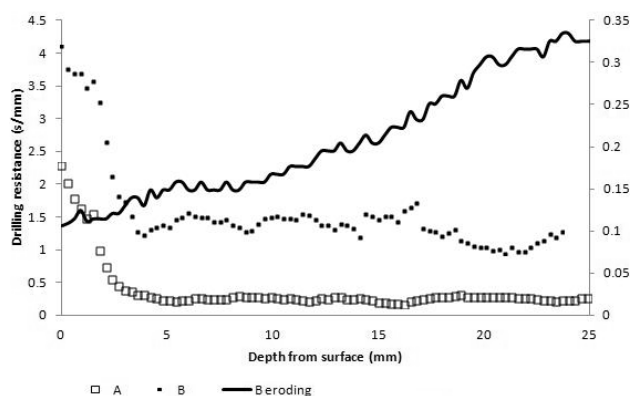
Obr. 3. Šedavá hmota u povrchu představující obohacení kaolínem a jemnými částicemi křemene pro povrch A (a) a povrch B (b). Obohacení organickou hmotou (org. hmota obohacená o Pb svítí bíle) u povrchu A (c) a u povrchu B (d). Podle Slavíka et al. (2017), modifikováno.

Fig. 3. Grayish matter at the sandstone surface representing enrichment with kaolinite and fine quartz particles – for surface A (a) and for surface B (b). Enrichment of organic matter (Pb-enriched organics shining white) at surface A (c) and surface B (d). Modified from Slavík et al. (2017).



typu B je tento poměr 2,6. Tahová pevnost měřená v laboratoři byla pro povrchový typ A 3,2× vyšší než v jeho podloží, pro povrchový typ B 20,2× vyšší (tab. 1). Tahová pevnost naměřená *in situ* byla v průměru 2,4–2,8× vyšší než tahová pevnost naměřená v laboratoři na hranolcích (tab. 1). Z uvedeného vyplývá, že jak v lomu, tak v laboratoři byl zjištěn rozdíl v pevnosti – vnější povrchy mají výrazně vyšší tahovou pevnost než podložní pískovec. Tento rozdíl je menší při měření *in situ*, kdy je pískovec stabilizován zatížením nadloží. To se odráží i ve vyšších absolutních hodnotách tahové pevnosti u terénních měření. Z výsledků také vyplývá, že zvýšení tahové pevnosti biogenní skalní kůry měřená v laboratoři je v případě povrchu B 6,3× vyšší než v případě povrchu A. Tento nepoměr pokládáme za vliv heterogenit materiálu či za ovlivnění pevnosti v důsledku porušení materiálu při převozu. Oproti tomu nebyl pomocí měření *in situ* mezi oběma typy materiálu zaznamenán rozdíl ve zvýšení tahové pevnosti biogenní skalní kůry. Naměřené hodnoty *in situ* odpovídají výsledkům studie Schweigstilllové et al. (2013), kteří naměřili tahovou pevnost biogenních skalních kůr v lomu i mimo lokality A, B 64–183 kPa. Na površích pískovce podléhajícího v současnosti erozi naměřili hodnoty jen 2–14 kPa. Erodivní pískovec je ale na povrchu zvětralý, jak nově ukázalo zvyšování jeho odporu při vrtání s hloubkou (obr. 5). Hodnoty tahové pevnosti měřené na jeho povrchu byly tak nižší, než je jeho pevnost ve větší hloubce, což dříve nebylo uvažováno (srov. s pracemi Bruthanse et al. 2012, Schweigstilllové et al. 2013).

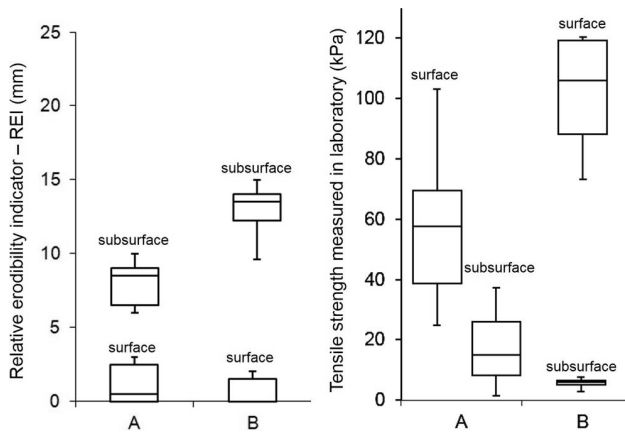
Hodnoty tahové pevnosti biokolizovaných povrchů



Obr. 4. Reprezentativní příklady profilu odporového vrtání pro jednotlivé typy povrchu. B eroding je na pravé ose.

Fig. 4. Examples of drilling resistance profile for different types of surface. B eroding is on right axis.

v pískovcových skalních městech mimo území lomu výrazně kolísají v závislosti na samotné pevnosti podložního materiálu, míře eroze a vyvinutosti biologické skalní kůry (obr. 6). Obecně lze na základě četných měření říci, že nejnižší tahové pevnosti pískovců se skalní kůrou na přirozených výchozech se pohybují okolo 20–40 kPa (Schweigstilllová et al. 2013, Vorlíček 2017, obr. 6). Pro povrchy, které mají biogenní skalní kůru lépe vyvinutou a nepodléhají



Obr. 5. Porovnání povrchových a podložních hodnot REI (vlevo) a tahové pevnosti v laboratoři (vpravo). S klesající hodnotou REI roste odolnost vůči erozi.

Fig. 5. Comparison of surface and subsurface values of REI (left) and tensile strength measured in laboratory (right). The erodibility increases with increasing REI.

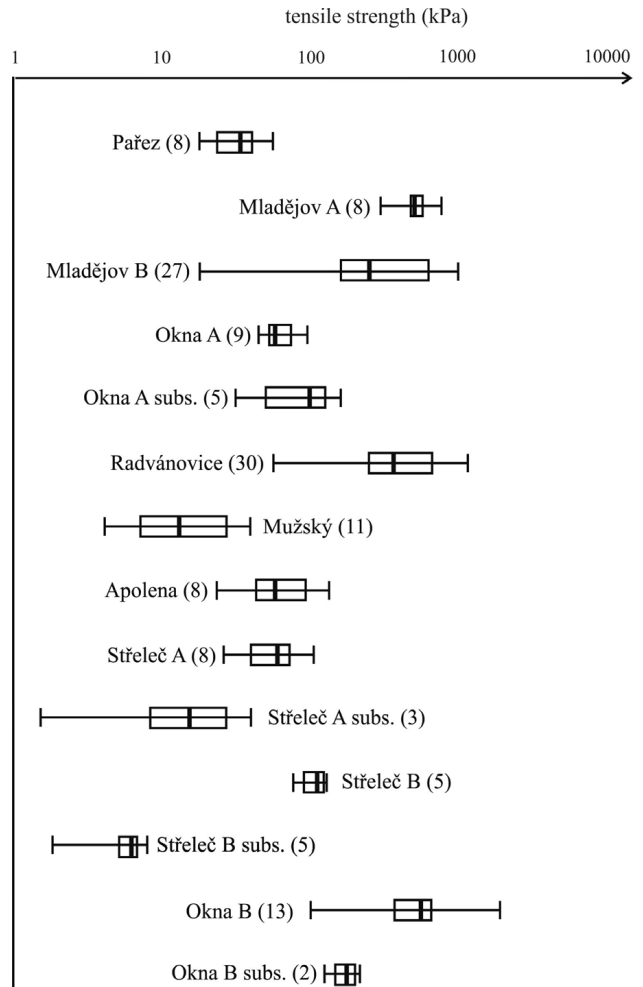
viditelné erozi, jsou typické hodnoty okolo 200 kPa (obr. 6). Nejvyšší naměřené hodnoty mimo lom dosahují až 1760 kPa (obr. 6.). Lokalita Okna A dobře demonstruje, že pokud je skalní kůra málo vyvinutá či vysoce zvětralá, hodnoty její tahové pevnosti mohou být nižší než v jejím podloží (obr. 6).

Ačkoliv nejde o rozsáhlou a systematickou studii tahové pevnosti, měření vcelku obstojně pomáhají porovnat studované povrchy v lomu s přirozenými výchozy a ukazují, že biogenní skalní kůra v lomu Střeleč, která se vytvořila za dobu kratší než 50 let, je překvapivě odolná.

Závěr

Byla studována biogenní skalní kůra vyvinutá na dvou typech povrchu (atektonický vs. tektonický povrch) v činném lomu Střeleč v Českém ráji. Mocnost biogenní skalní kůry se v rámci obou typů povrchu neliší, organismy jsou pod mikroskopem nejvíce patrné do hloubky cca 2 mm od povrchu. Biogenní skalní kůra hostí pestré společenstvo hub, na jehož výživě se podílí i symbióza s rostlinami v širším okolí výchozu. Diverzita řas, které tvoří další důležitou složku kůry, je naopak spíše nízká. Kromě organické hmoty byly v kůře přítomné také jemné křemenné částice a kaolinit. Mezi složením biogenní skalní kůry a jejího podloží nebyl kromě biologického obohacení a přítomnosti jemnozrnných částic dostupnými metodami zjištěn žádný další rozdíl (nebylo zde zjištěno anorganické pojivo). V rámci obou typů povrchu nebyly nalezeny žádné zjevné zákonitosti ve výskytu organismů.

Na biogenní skalní kůře byly měřeny 4 parametry jako ukazatele odolnosti materiálu vůči erozi. Z porovnání povrchových a podložních vlastností pískovce je zřejmé, že biogenní skalní kůra obecně významně mění mechanické vlastnosti materiálu a chrání podložní pískovec před erozí zvýšením tahové pevnosti a odolnosti materiálu vůči abrazi. Z dosažených výsledků také vyplývá, že odolnost mate-



Obr. 6. Porovnání tahové pevnosti biogenních skalních kůr na přirozených výchozech a v lomu Střeleč. Údaje tahové pevnosti podloží jsou dostupné jen v některých případech (hodnoty „subs.“). Množství naměřených hodnot uvedeno v závorkách. Data pro lokalitu Apolena a Mužský převzata od Schweigstilllové et al. (2013) a Vorlíčka (v přípravě).

Fig. 6. Comparison of tensile strength of biologically-initiated rock crust at natural outcrops and outcrops in the Střeleč Quarry. Values of tensile strength of subsurface are not available for all sites (values "subs."). Number of measurements is given in brackets. Data for sites Apolena and Mužský modified from Schweigstilllová et al. (2013) and Vorlíček (in prep.).

riálu vůči abrazi se u obou typů povrchu statisticky významně neliší. Ani v případě měření relativní odolnosti materiálu vůči erozi vodou nebyl mezi oběma typy povrchu zjištěn statisticky významný rozdíl. Zvýšení tahové pevnosti materiálu měřené v laboratoři je výraznější v případě tektonického povrchu, avšak měření tahové pevnosti *in situ* přímo v lomu toto neprokázala. Důvodem by mohlo být porušení materiálu při převozu či vliv nehomogenit. Porovnáním s daty z předchozích studií bylo taktéž zjištěno, že pro studium biogenní skalní kůry není vhodné používat přístroj PZZ z důvodu jeho nízké rozlišovací schopnosti.

Z výše uvedeného se jeví, že mechanické vlastnosti a odolnost biokolizovaných povrchů nejsou podle nejnovějších výsledků ovlivněny přítomností tektonických puklin. Zpevnění čistě vlivem tektonických procesů, po-

psané Bruthans et al. (2012), tedy není obecným pravidlem a jeho vliv je třeba ověřit na dalších lokalitách.

Za účelem srovnání s přirozenými skalními biokolizovanými povrchy byla tahová pevnost povrchů v lomu porovnána s hodnotami měření na osmi dalších lokalitách v Českém ráji a na Českolipsku. Ze srovnání vyplývá, že biogenní skalní kůra v lomu Střeleč, která se vytvořila za dobu 10–50 let, je překvapivě odolná a blíží se mechanickým vlastnostem biogenních skalních kůr na přirozených výchozech. Uvedené závěry však nelze chápat způsobem, že biogenní skalní kůra totožným způsobem chrání všechny povrchy pískovcových stěn v Českém ráji, neboť tyto pískovce v podloží krusty mají obvykle vyšší pevnost než slabě cementované pískovce v lomu Střeleč. Je tak pravděpodobné, že v pískovcových skalních městech je odolnost podložního pískovce srovnatelná či jen o trochu nižší než odolnost biogenní skalní kůry. Příspěvek biogenní skalní kůry k odolnosti vůči erozi na přirozených výchozech je tak zřejmě výrazně nižší či zanedbatelný (v případě, že pískovec již primárně dosahuje stejné pevnosti jako kůra), nicméně kůra i tak může bránit zvětrávajícím zrnům v opadu a tím brzdí rychlost postupu zvětrání. U měkkých pískovců bude naopak vliv kůry zásadní.

Poděkování. Autoři děkují J. Řihoškovi za pomoc při měření tahové pevnosti, P. Škaloudovi za určení řas, R. Fabešovi za měření odporového vrtání, M. Filipimu za podnětné diskuse, P. Vorlíčkovi za poskytnutí dat měření tahové pevnosti, Z. Večerkové za přípravu vzorků s citrátem olova, recenzentům J. Merlíkovi a především J. Adamovičovi za podnětné a adresné recenzní podmínky a vedení akciové společnosti Sklopísek Střeleč za umožnění měření v lomu. Tato práce vznikla na základě podpory Grantové agentury ČR (16-19459S) a rovněž díky podpoře dlouhodobého koncepčního rozvoje výzkumné organizace RVO: 67985891.

Literatura

- ADAMOVIČ, J. – MIKULÁŠ, R. – ČÍLEK, V. (2010): Atlas pískovcových skalních měst České a Slovenské republiky. – 459 str. Academia. Praha.
- ARIÑO, X. – ORTEGA-CALVO, J. J. – GOMEZ-BOLEA, A. – SAIZ-JIMENEZ, C. (1995): Lichen colonization of the Roman pavement at Baelo Claudia (Cadiz, Spain): biodeterioration vs. bioprotection. – *Sci. Total Environ.* 167, 353–363.
- BRUTHANS, J. – SOUKUP, J. – VACULIKOVA, J. – FILIPPI, M. – SCHWEIGSTILLOVA, J. – MAYO, A. L. – MASIN, D. – KLETETSCHKA, G. – RIHOSEK, J. (2014): Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion. – *Nat. Geosci.* 7, 597–601.
- BRUTHANS, J. – SVĚTLÍK, D. – SOUKUP, J. – SCHWEIGSTILLOVÁ, J. – VÁLEK, J. – SEDLÁČKOVÁ, 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.
- ČÍLEK, V. – LANGROVÁ, A. (1994): Skalní kůry a solné zvětrávání v CHKO Labské pískovce. – *Ochr. Přír.* 49, 227–231.
- ČECH, S. – KLEIN, V. – KRÍŽ, J. – VALEČKA, J. (1980): Revision of Upper Cretaceous stratigraphy of the Bohemian Cretaceous Basin. – *Věst. Ústř. Úst. geol.* 55, 5, 277–296.
- GÓMEZ-ALARCÓN, G. – MUÑOZ, M. – ARIÑO, X. – ORTEGA-CALVO, J. J. (1995): Microbial communities in weathered sandstones: the case of Carrascosa del Campo church, Spain. *Sci. – Total Environ.* 167, 249–254.
- GOUDIE, A. S. – VILES, H. A. – PARKER, A. G. (1997): Monitoring of rapid salt weathering in the central Namib Desert using limestone blocks. – *J. Arid. Environ.* 37, 581–598.
- MIKULÁŠ, R. (1999): Subaerial animal and plant bioerosion in sandstone castellated rocks (Pleistocene to Recent, Czech Republic). – *Bull. Geol. Soc. Den.* 45, 177–178.
- PAMPLONA, M. – KOCHER, M. – SNETHLAGE, R. – AIRES-BARROS, L. (2007): Drilling Resistance: Overview and Outlook. – *Z. Dtsch. Ges. Geowiss.* 158, 665–676.
- PARADISE, T. R. (1997): Disparate sandstone weathering beneath lichens, red mountain, Arizona. – *Geogr. Ann.* 79A, 177–184.
- ROBINSON, D. A. – WILLIAMS, R. B. G. (2000): Accelerated weathering of a sandstone in the High Atlas mountains of Morocco by an epilithic lichen. – *Z. Geomorph.* 44, 513–528.
- SCHWEIGSTILLOVÁ, J. – BRUTHANS, J. – FALTEISEK, L. – VÁLEK, J. – SOUKUP, J. (2013): Rychlá tvorba skalních kůr na povrchu hruboskalského pískovce. – *Zpr. geol. Výzk. v Roce 2012*, 228–234.
- SLAVÍK, M. – BRUTHANS, J. – FILIPPI, M. – SCHWEIGSTILLOVÁ, J. – FALTEISEK, L. – ŘIHOSEK, J. (2017): Biologically-initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion. – *Geomorphology*, 278, 298–313.
- 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.
- VILES, H. A. – GOUDIE, A. S. (2004): Biofilms and case hardening on sandstones from Al-Quwayra, Jordan. – *Earth Surf. Process. Landf.* 29, 1473–1485.
- VORLÍČEK, P. (2017): Analýza svahových pohybů v severozápadní části Příhrázské plošiny. Diplomová práce. – Přírodověd. fak., Univ. Karl. Praha.