

Zpevněné povrchy puklin v kvádrovém pískovci a jejich role při vzniku skalních měst

Hardened fracture surfaces in quartzose sandstone and their role in origin of rock cities

JIŘÍ BRUTHANS^{1,2} – JAN SOUKUP¹ – DANIEL SVĚTLÍK¹ – JANA SCHWEIGSTILLOVÁ³ – ALAN L. MAYO⁴

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

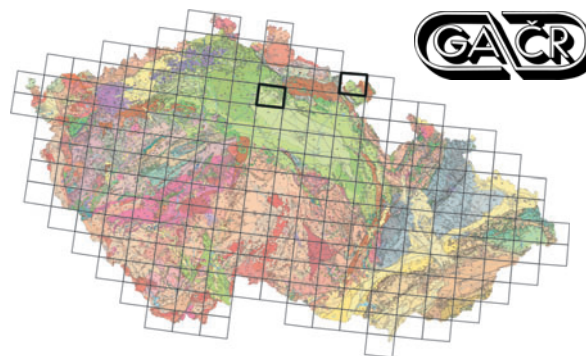
² Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1

³ Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i., V Holešovičkách 41, 182 09 Praha 8

⁴ Brigham Young University, Department of Geosciences, Provo, UT 84602, USA

Key words: sandstone landforms, deformation bands, erosion, fractures, Bohemian Cretaceous Basin

Abstract: Rock cities in the Czech Republic are composed of numerous fracture-guided spaces (clefts) and narrow gorges. It is generally considered by geologists and geomorphologists that fractures are zones of weakness, where erosion is most efficient. Rock cities are believed to be created by downward erosion along densely fractured zones, possibly weakened by deep weathering. Interestingly the vertical fracture surfaces in Hrubá Skála sandstone in Střeleč quarry is significantly firmer and has lower erodibility than the sandstone in fracture subsurface, based on tensile strength, relative erodibility and drilling resistance measurements and field observations. Based on erodibility measurements inside subsurface conduits in the quarry the hardened fracture surfaces occurred before the sandstone was exposed at ground surface. Hardening is probably of tectonic origin (deformation bands or similar feature). Hardened fracture surfaces should be considered as geomorphologically important type of



(03-34 Sobotka; 04-31 Meziměstí)

surface hardening beside well-known rock crusts (case hardening). Based on field observations, fracture surfaces in rock cities were less erodible than underlying sandstone in time when landscape was most intensively evolving (probably during or at the end of Last Glacial). Model of evolution of rock cities is proposed based on great morphological similarity between presently evolving fracture-guided conduits in Střeleč quarry and clefts in Adršpašsko-teplických skalách. Clefts were probably developed in two steps: 1. undercutting of weak sandstone layers (undercutting horizons) by piping and frost weathering; 2. undercut vertical slabs of sandstone were mass wasted and underground spaces propagated upward forming vertically elongated cleft caves or open clefts. While first process was critical to initiate the mass wasting it is the second process, which mobilized more than 90 % of material even from cemented portions of sandstone.

Je dobře známým a z terénní evidence snadno doložitelným faktem, že pukliny s regionálními tektonickými směry definují tvar a často tvoří stěny puklinových prostor, úzkých roklí, řady skalních věží a potažmo celých skalních měst v České republice. Dosud nebyl vysvětlen paradox, proč úzké puklinové prostory, z nichž je materiál vyklízen evidentně proudící vodou, nenesou ve stěnách obvykle žádné stopy eroze tokem proudící vody (obr. 1d–f). Pískovec byl přitom při vzniku těchto prostor tak málo odolný erozi, že v puklinových prostorech ani pod nimi nedocházelo k významnější akumulaci bloků pískovce.

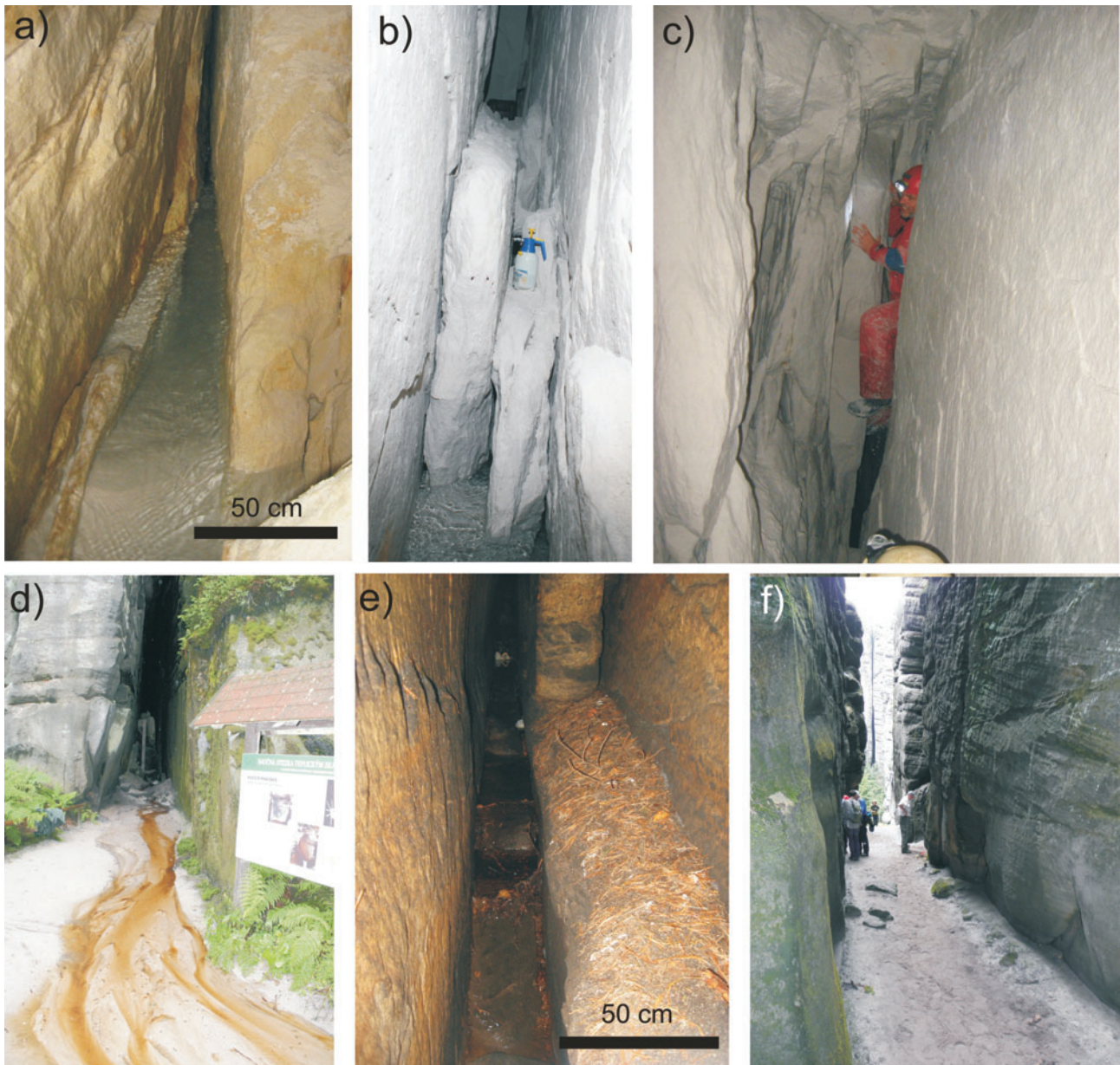
Pukliny vnímají geologové a geomorfologové obecně jako zóny snížené pevnosti a odolnosti vůči zvětrávání a erozi, v drtivé většině případů ovšem bez jakýchkoli přímých měření; např. Vítek (1979) uvádí, že puklinové jeskyně vznikají zvětráním horniny na výrazné svíslé puklině, nebo na systému paralelních puklin. Při studiu v lomu Střeleč (hruboskalský pískovec) se ukázalo, že puklinové povrchy tvoří stěny puklinových kanálů vzniklých bezpochyby erozí proudící vody a navazují-

cím říčením podzemletých bloků pískovce (Soukup et al. 2013). V roklích ve skalních městech v Česku, např. v Hruboskalsku či Adršpašsko-teplických skalách, byly ve velkých množstvích pozorovány morfologicky shodné jevy jako se vytvářejí v současnosti v kanálech v lomu Střeleč (obr. 1).

Cílem článku je popsat vlastnosti povrchů puklin v lomu Střeleč, který nabízí unikátní možnost srovnat vlastnosti povrchů s okolním pískovcem, dosud nezpevněným skalními kůrami, a pokusit se na příkladech ze skalních měst v ČR ukázat, jakou roli tyto povrchy hrají při vývoji skalních měst. Jako „puklinový povrch“ je v této práci označován rovný, plochý a převážně vertikální povrch puklin na výchozech pískovce (např. obr. 1b, c, e).

Metodika

Pevnost v tahu kolmo na povrch pískovce byla měřena přímo v lomu Střeleč pomocí kovových terčů přilepených



Tabulka 1. Výsledky měření REI a DR na puklinách různých směrů

směr puklin (°)	počet měření REI	prům. REI (mm)	směr. odch. REI (mm)	počet měření DR	prům. DR (mm)	směr. odch. DR (mm)
70–80	32	7	9	9	25	6
80–90	16	20	20	16	29	13
90–100	16	6	5	0		
100–110	4	6	6	4	24	5
110–120	35	14	20	31	22	9
120–130	16	11	23	15	21	6
130–140	6	12	7	5	22	2

Podle DR je pevnost povrchu puklin různých směrů obdobná, rozptýl hodnot je nízký. REI vykazuje značnou variabilitu díky tomu, že paprsek tlakové vody po překonání krusty rychle postupuje podložním erodovatelným pískovcem. Směry, ze kterých bylo k dispozici méně než 4 měření, byly ze zpracování vyřazeny.

na povrch pískovce (Bruthans et al. 2012; Schweigstilllová et al. 2013). Tahová pevnost povrchu pískovce za saturovaného stavu byla měřena na pískovcovém bloku, který byl umístěn do nádoby a stabilizován obsypáním pískem. Blok byl pomalu saturován postupným přiléváním vody do nádoby a tahová pevnost byla změřena za podmínek plného zaplavení bloku.

Relativní odolnost pískovců 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 používáme v dalším textu označení indikátor relativní erodovatelnosti (REI).

Pro měření relativní pevnosti povrchu pískovce in situ



Obr. 1. Příklady podzemních puklinových prostor a úzkých puklinových roklí z lomu Střeleč, kanál S5 (a–c), a Adršpašsko-teplických skal (d–j). a – stěny kanálů v lomu obvykle nenesou žádné stopy vodní eroze, která je vytvořila, tvoří je povrchy puklin s často ostrým, hranatým zalomením stěn; b – puklinové kanály připomínající rozsedliny vznikají v lomu zcela nepochybně vyklizením vertikálně protažených bloků pískovce vodní erozí, bez jakékoli účasti svahových pohybů. Rozevření puklin před erozním rozšířením je pod 1 mm; c – kanály v lomu nápadně připomínají puklinové prostory ve skalních městech; d – voda vynášející písek z puklinové Průvodcovské jeskyně za vysokých vodních stavů; e – dno Průvodcovské jeskyně je tvořeno erodovanými zbytky bloků pískovce a stěny jsou chráněny puklinovými povrchy; f – puklinová rokle ve Skalním chrámu se stěnami rozčleněnými zvětráváním; g – zbytek bloku ve stropu puklinové prostory, Skalní ostrov; h – rozlámané deskovité bloky v puklinové prostoře sesouvající se do nižších prostor, Sibiř; i – mohutný horizont původně erodovatelného pískovce v Průvodcovské jeskyni, na kterém dochází k podetnutí boků prostory. Strop se neřítí, protože není rozčleněn na deskovité bloky; j – podobný horizont v roklí Sibiř.

byla použita metoda odporového vrtání (drilling resistance – dále DR) pomocí zařízení PZZ-1 vyvinutého pro měření pevnosti cihel a malty (TZUS, 2011), osazeného 70 mm dlouhým vidiovým vrtákem o průměru 5 mm. Všechny návrtky byly provedeny se stejným nastavením (vrtání na stupeň 1) a hloubka návrtky byla měřena posuvným měřítkem.

Studium mikrostruktury pískovce bylo provedeno v sekundárních elektronech (SE) ve vysokém vakuu na elektronovém mikroskopu (SEM) Quanta 450 (FEI) a dále byl použit detektor (PMD) pro tzv. studenou katodoluminiscenci (CL).

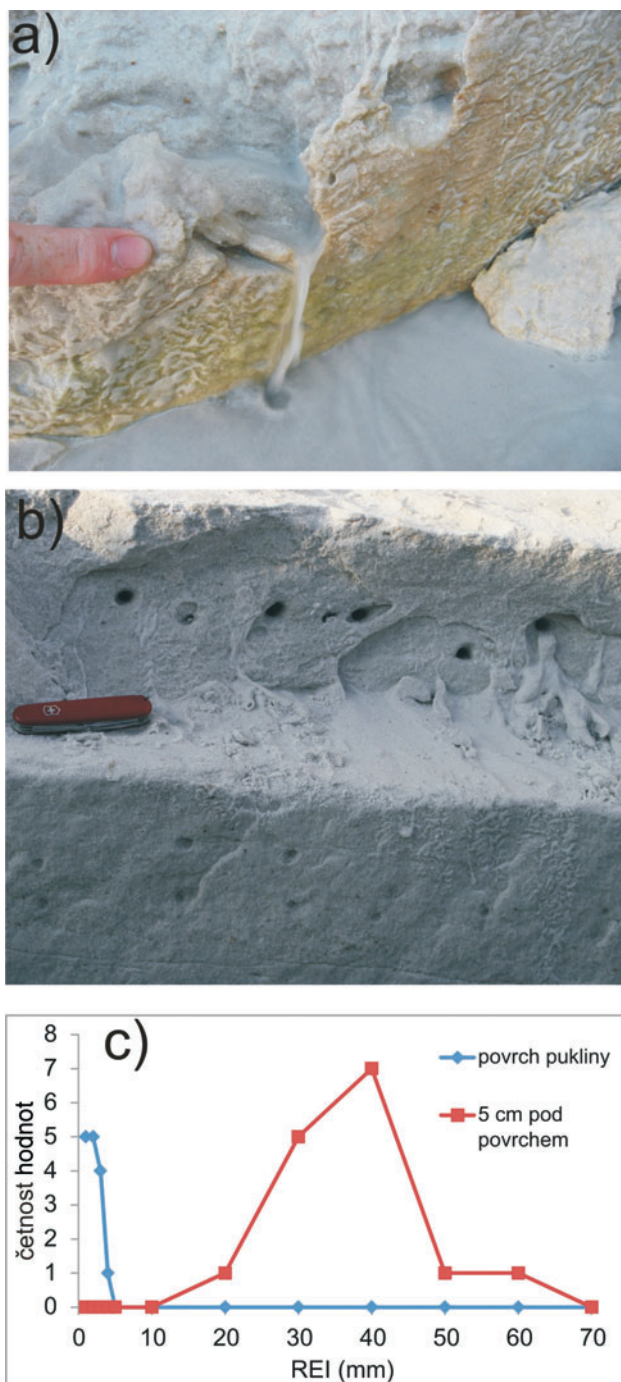
Odolnost proti erozi a tahové pevnosti povrchů puklin

V podzemních kanálech v lomu Střeleč (popis lomu a kanálů viz Soukup et al. 2013) byly stopy eroze pozorovány pouze na ca 25 % plochy povrchu kanálů, které byly v dosahu proudící vody. Naopak většina bočních stěn jsou puklinové povrchy, které ani v místech přímého kontaktu s rychlým prouděním vody zpravidla nejeví sebemenší známky eroze (obr. 1a, b). Ani zvýšení rychlosti proudění (až na 1 m/s), způsobené zvýšením spádu toku stavbou umělých hrází, nevedlo k erozi bočních stěn kanálů.

Vysoká odolnost povrchu pukliny oproti pískovci v jejím podloží byla demonstrována u kanálu S4, kde bylo nejprve provedeno patnáct měření REI na povrchu pukliny, poté byla povrchová zóna pískovce o mocnosti ca 5 cm včetně povrchu pukliny opatrně odstraněna a měření byla zopakována v podpovrchové zóně pískovce. V průměru byly hodnoty REI naměřené několik centimetrů pod povrchem šestnáctkrát vyšší v porovnání s hodnotami REI pro povrch pukliny (obr. 2b, c).

Celkem bylo provedeno 160 měření REI na puklinových površích v lomu a z nich 83 % má hodnotu < 20 mm. Podle kalibrace prováděné v lomu znamenají hodnoty REI < 20 mm neerodovatelný povrch (Bruthans et al. 2012). Pouhých 17 % puklinových povrchů bude vodou erodováno. Z detailně proměřeného profilu v lomu je zřejmé, že okolo 65 % nejnižší etáže v lomu tvoří erodovatelný pískovec. Je tak zřejmé, že puklinové povrchy jsou převážně neerodovatelné, na rozdíl od převážné části pískovce v jejich bezprostředním podloží. Odolnost vůči erozi byla zjištěna na površích puklin různých tektonických směrů (tab. 1).

Hodnoty tahové pevnosti erodovatelného pískovce za přirozené vlhkosti se pohybují mezi 2–14 kPa (Bruthans et al. 2012). Při plném nasycení pískovce vodou dochází k výraznému poklesu pevnosti v tahu na hodnoty < 0,1–0,6 kPa. Povrchy puklin mají hodnoty tahové pevnosti za přirozené



Obr. 2. Demonstrace výrazné odolnosti povrchu pukliny vůči erozi v lomu Střeleč (poloha kanálů viz Soukup et al. 2013). a – proudící voda snadno eroduje a zařezává se do vnitřní části pískovcového bloku, ale ani koncentrovaný proud vody neeroduje povrch pukliny. Křehký a jen 1 mm mocný povrch pukliny se ulamuje teprve po odnosu podložního pískovce, stěna kanálu S5; b – hlubší díry vytvořené tlakovou vodou (REI) v pískovci za opatrně odstraněným povrchem pukliny (nahore) a jen drobné jamky vytvořené REI přímo v puklinové ploše, stěna kanálu S4; c – histogram měření REI z místa na obr. 2b jasně ukazuje zásadní rozdíl v erodovatelnosti pukliny a podložního pískovce. Měření jsou členěna po 1 mm do REI 5 mm a poté po 10 mm. Celkem 30 měření.

vlhkosti 27–216 kPa (Bruthans et al. 2012). Při plném nasycení se tahová pevnost povrchů puklin pohybuje v rozmezí 0,9–38 kPa, což je sice výrazné snížení oproti přirozené vlhkosti, ale povrchy puklin si i za plného nasycení udržují určitou pevnost na rozdíl od erodovatelného pískovce.

REI povrchů puklin bylo měřeno na etážích v lomu i uvnitř kanálů ve vzdálenosti až desítek metrů před čelem postupující těžby, a to i nad nejvyšší hladinou toku na površích puklin nově obnažených řícením. I v takových případech jsou na základě měření REI puklinové povrchy odolné proti erozi. Lze proto vyloučit, že by zpevněné povrchy puklin vznikly až v důsledku vystavení puklin povrchovým jevům. Jde tedy o jiný fenomén než skalní kůry, popisované ze Střeleče Schweigstillovou et al. (2013).

Povrchy puklin jsou tvořeny několika milimetry mocnou zónou hustě nahlučených zrn s četnými plošnými kontakty (obr. 3). Na povrchu puklin jsou nánosy částic kaolinitu, byť o velmi malé mocnosti (~ 50 μm). V tenké povrchové zóně pukliny a ani v jejím podloží nebyl SEM analyzován kalcitový, křemenný nebo Fe-oxidický tmel, proto je zřejmě jedinou příčinou vyšší tahové pevnosti povrchu puklin těsnější uspořádání zrn této zóny.

Otázka původu zpevnění

V literatuře byly hledány jevy, které by svými vlastnostmi – odolností vůči erozi, vyšší pevností, vznikem před expozicí na zemském povrchu – odpovídaly zpevněným povrchům puklin v lomu Střeleč. Dobře zdokumentovaným jevem s velmi podobnými vlastnostmi jsou deformační proužky (deformation bands), jen několik milimetrů tenké deskovité zóny lokalizované deformace, které nemají smykovou plochu (Fossen et al. 2007). Deformační proužky jsou nejčastějším projevem lokalizované deformace v porézních pískovcích a porézních sedimentech včetně sedimentů kvartérního stáří (Fossen et al. 2007). Byly zjištěny v mnoha oblastech po celém světě v tektonických i atektonických režimech (Fossen 2010). Deformační proužky lze klasifikovat buď podle kinematiky na dilatační, smykové nebo kompakční (Fossen et al. 2007), nebo podle převládajícího deformačního mechanismu: 1. reorganizace zrn (rotace zrn a klouzání); 2. katakláze; 3. lubrikace fyllosilikáty; 4. rozpouštění a cementace (Fossen et al. 2007 a Fossen 2010).

V deformačních proužcích dochází k pohybu v řádu milimetrů až centimetrů. Při pórozitě sedimentu větší než ca 10–15 % lze očekávat nejprve vznik deformačních proužků a teprve poté smykových ploch, pokud je pórozita menší, budou vznikat přímo smykové plochy (Fossen et al. 2007). Deformační proužky tedy vznikají v porézních sedimentech před vznikem smykových ploch a zlomů (Aydin 1978), avšak často deformace pokračuje i po vzniku zlomu (Shipton a Cowie 2003). V porovnání s běžnými puklinami mají deformační proužky často zvýšenou soudržnost, sníženou pórozitu a výrazně sníženou propustnost (až o 6 řádů, v průměru o 2–3 řády; Fossen – Balle 2007) než okolní materiál, takže jsou často považovány za bariéry pro

proudění vody (Fossen et al. 2007 a jím citovaní autoři), přestože v regionálním měřítku zřejmě bude jejich vliv na propustnost relativně malý (Fossen – Bale 2007).

Adamovič et al. (2010) popsali v české křídové pánvi dva hlavní typy deformačních proužků: a) podél severního zlomového okraje pánve se vyskytují mírně zvlněné střížné deformační proužky s kataklázou, široké asi 1 mm, tvořící propletené svazky o šířce až několika centimetrů; b) v oblasti Klokočských a Betlémských skal a na Maloskalské Drábovně se nacházejí dilatační střížné proužky o průměrné šířce 1–2 cm a délce mnoha metrů, vzdálené od sebe obvykle 10–20 cm. Směry deformačních proužků jsou SZ-JV až SSSZ-JJV a ZJZ-VSV. Proužky jsou zřetelné na výchozech díky tomu, že tvoří buď pozitivní, nebo častěji negativní formy reliéfu. Deformační proužky popsané Adamovičem et al. (2010) jsou – co do geomorfologických projevů, šířky i vzhledu – značně odlišné od povrchů puklin v lomu Střeleč.

V lomu Střeleč nejspíše nejde přímo o deformační proužky, protože je zde vždy jasně patrná puklinová plocha, jejíž povrch je zpevněn, zatímco deformační proužky puklinovou či smykovou plochu alespoň primárně prostrádají. Je pravděpodobné, že se jedná o deformační proužky se smykovou plochou, nebo podobný fenomén (dále jev blízký deformačním proužkům). Pro objasnění vzniku zpevnění je třeba další mikroskopické studium.

Model vzniku skalních měst

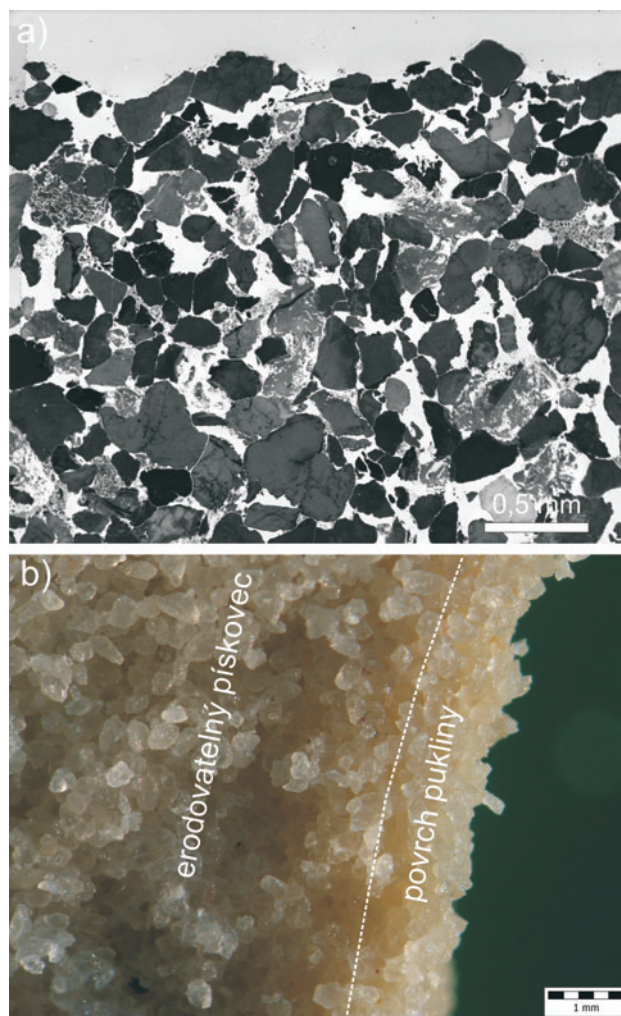
V mnoha skalních městech v České republice jsou dna puklinových prostor a roklí zanesena sedimenty. Výjimkou je Adršpašsko-teplické skalní město, kde zejména v okolí Skalního ostrova (tzv. systém Poseidon, Mlejnek et al. 2009) lze studovat řadu úzkých puklinových prostor, kde je i v současnosti transportován písek a převládá vyklízení puklin nad depozicí. Morfologie puklinových prostor je velmi podobná tvarům kanálů ve Střelči (obr. 1). Vítek (1978) zdůraznil klíčovou skutečnost, že pro vznik těchto prostor je třeba několika paralelních puklin: „... jak vyplývá z jejich morfologie, hlavním předpokladem pro vznik a vývoj těchto jeskyních forem je přítomnost nikoli jedné, ale celé soustavy víceméně svislých puklin“.

Puklinové prostory detailně prozkoumali Mlejnek et al. (2008). Z leteckých snímků Skalního ostrova je zřejmé, že puklinové prostory se periodicky střídají s masivnějšími bloky pískovce v průměrné vzdálenosti zhruba 10 m (Mlejnek et al. 2008).

Jednotlivé puklinové prostory na Skalním ostrově mají průměrnou délku drenážní dráhy ~ 150 m a povodí o ploše ~ 1500 m². Za stoleté povodně lze z jednotlivých puklinových prostor očekávat odtok 1 l/s, za běžných vodních stavů odtok 0,01 l/s. Takové průtoky jsou dostatečné k transportu písčitého materiálu (Soukup et al. 2013).

Na základě podélných řezů publikovaných autory a detailního vlastního průzkumu puklinových prostor a analogie s vývojem kanálů v lomu Střeleč lze vysvětlit vznik těchto prostor následovně (obr. 4):

a) V období před vznikem skalních kůr (glaciál, přechod glaciál/holocén) se na povrchu při okraji pískovcové plo-

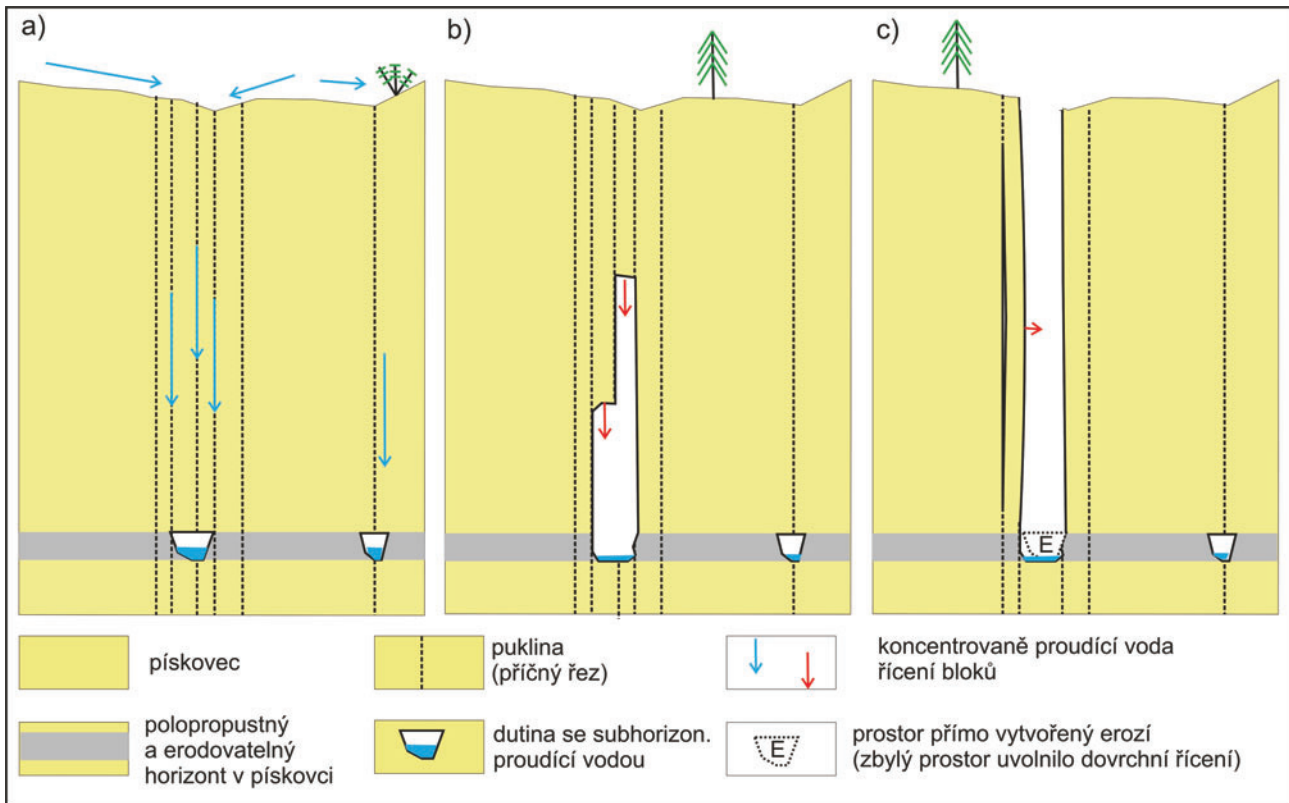


Obr. 3. Příčný řez povrchem pukliny. a – leštěný nábrus (povrch pukliny nahoře), lom Střeleč; b – puklina z kanálu S5, lom Střeleč.

šiny sbírala voda ze srážek, vnikala do trhlin a směřovala dolů až na úroveň polopropustných horizontů nebo na erozní bázi, kde docházelo k subhorizontálnímu proudění. Mrazovým zvětráváním a v zónách erodovatelného pískovce i pouhou činností proudící vody docházelo k podetnutí tenkých, vertikálně protažených bloků pískovce v úrovni proudící vody.

b) Erozně podetnuté a tedy destabilizované bloky se řítily, protože tahová pevnost pískovce je velmi nízká a stropy puklinových jeskyní postupně propagovaly vzhůru a případně i do stran, pokud byla prostora lemována dalšími paralelními puklinami (c). Materiál bloků byl z většiny rozvolněn a odnesen proudící vodou. Řízení často dosáhlo až na zemský povrch a vznikly úzké puklinové rokle (obr. 1f).

Model naznačuje, že drtivá většina materiálu ze silně rozpukavého pásu byla mobilizována říčením, a za hlavní destabilizační proces předcházející řízení považuje erozní podetnutí úzkých bloků pískovce. Pro tento model stačí pak existence jen velmi tenkých, centimetr až decimetr mocných snadno zvětrávajících či erodovatelných horizontů, zbytek profilu může být tvořen odolným pískovcem. Horizonty se stopami zjevné laterální eroze jsou známy



Obr. 4. Model vývoje puklinových prostor a rozčleňování skalního města na příkladu Skalního ostrova v Adršpašsko-teplických skalách (systém Poseidon). Vertikální příčný řez. K řízení dochází po erozním podetnutí tenkých vertikálních bloků pískovce. Eroze na jediné puklině (vpravo) nepovede k řízení, a proto nedojde ke vzniku větších prostor.

z mnoha míst v Adršpašsko-teplickém skalním městě (Mlejnek et al. 2008, obr. 1i, j) i z řady dalších skalních měst v ČR.

Předchozí autoři přitom dosud uvažovali o erozi postupující po svislých puklinách odshora dolů (Mlejnek et al. 2008). Vítek (1978) vysvětluje vznik puklinových jeskynních prostor snazším zvětráváním horniny na puklinových zónách. Nověji Cílek (2010) vysvětloval vznik roklí a skalních měst ve dvou krocích. Nejprve hlubokým zvětráním pískovců podél rozpukaných zón před rozčleněním pískovcových plošin a poté vyklížením zvětralých partií pískovce po vyzdvížení plošin. Proti představě Cílka (2010) svědčí především skutečnost, že skalní dna puklinových prostor a roklí se strmě svažují ve směru spádu vodních toků, což neodpovídá představě náhodné hloubky dosahu hlubokého zvětrání.

Proudění vody odpovídající modelu ve studované oblasti dosud probíhá (viz např. podélné řezy in Mlejnek et al. 2008). V prostorách Adršpašsko-teplického skalního města můžeme pozorovat řadu znaků podporujících modelovou představu (obr. 1). Na základě opálových výrůstků, např. v jeskyni Kořenka (Cílek 1998) či jeskyni Skalní chrám, lze předpokládat, že v současnosti mohou být pískovcové povrchy i v podzemních prostorách zpevněny skalními kůrami, které snížily míru erodovatelnosti pískovce oproti původnímu stavu. V opuštěném lomu v Adršpachu, kde byly povrchy pískovce obnaženy před pouhými padesáti lety, jsou místa, kde dosud dochází k měřitelné erozi pískovce proudící vodou.

Závěr

Je dobře známo, že pukliny mají zásadní význam pro morfologii skalních měst, ale jejich vliv na erozní procesy nebyl dosud plně pochopen.

Pukliny hrají při vzniku skalních měst dvě zcela protichůdné role: 1. puklinové plochy představují vedle skalních kůr dosud neuvažovaný typ „zpevnění“, vznikající již před expozicí pískovce na zemském povrchu pravděpodobně tektonickou činností (jevy blízké deformačním proužkům). Povrchy puklin v lomu Střeleč i ve skalním městě Apolena jsou měřitelně pevnější a odolnější vůči erozi než pískovec v jejich podloží; 2. tenké, vertikálně protažené bloky pískovce oddělené puklinami představují naopak zóny oslabení skalního masivu, protože bývají porušeny sekundárními příčnými trhlinami umožňujícími erozi pískovce, ale především se tyto bloky při podemletí snadno řítí na rozdíl od masivnějšího pískovce v jejich okolí.

Výsledkem dvojaké role puklin je vznik vysokých, ale velmi úzkých puklinových prostor. Prostory vznikají odspoda nahoru, nejprve ve formě jeskyně na erozním horizontu, poté prostor propaguje říčením k povrchu. Protože drtivá většina prostor se uvolňuje říčením a povrchy puklin jsou odolné erozi, nejsou ve stěnách puklinových prostor stopy eroze proudící vodou, která přitom vyklízí veškerý materiál. Systém Poseidon v Adršpašsko-teplických skalách tvořený jeskynnými i nejeskynnými prostorami je dokonalým příkladem.

Puklinové kanály a rokle je třeba odlišovat od rozsedlin, které mohou být na první pohled morfologicky velmi podobné, ale vznikají zcela jiným mechanismem (prostor je pasivně rozevirán svahovými pohyby).

Poděkování. Autoři tímto děkují recenzentům Z. Kukulovi a V. Ouhrabkovi za cenné kritické připomínky, S. Šlechtovi, O. Jägerovi, I. Kůrkové a A. Gregorové za pomoc s terénními pracemi v CHKO Broumovsko, vedení akciové společnosti Sklopísek Střeleč a D. Smutkovi za umožnění terénního průzkumu v lomu a SCHKO Broumovsko za umožnění provádění výzkumu v Adršpašsko-teplickém skalním městě. Tento výzkum byl podpořen grantem Univerzity Karlovy GAUK 380511, výzkumný plán MSM0021620855 a Grantovou agenturou GAČR 13-28040S. Řešeno v rámci vědecko-výzkumného projektu VMG ČL, PřF UK a SCHKO Český ráj „Kvartérní sedimenty pískovcové krajiny středního Pojizeří a Českolipska”.

Literatura

- ADAMOVIČ, J. – MIKULÁŠ, R. – CÍLEK, V. (2010): Atlas pískovcových skalních měst České a Slovenské republiky. – 459 str. Academia. Praha.
- AYDIN, A. (1978): Small faults formed as deformation bands in sandstone. – *Pure appl. Geophys.* 116, 913–930.
- 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.
- CÍLEK, V. (1998): Opálové výrůstky z jeskyně Kořenka na Broumovsku. – *Knihovnička Čes. speleol. Společ.* 32, 164–165.
- CÍLEK, V. (2010): Saxon-Bohemian Switzerland: sandstone rock cities and fascination in a romantic landscape. In: MIGON, P., ed.: *Geomorphological Landscapes of the World*, 201–209. – Springer Verlag.
- FOSSEN, H. (2010): Deformation bands formed during soft-sediment deformation: Observation from SE Utah. – *Mar. Petrol. Geol.* 27, 15–222.
- FOSSEN, H. – BALE, A. (2007): Deformation bands and their influence on fluid flow. – *AAPG Bull.* 91, 12, 1685–1700.
- FOSSEN, H. – SCHULTZ, R. A. – SHIPTON, Z. K. – MAIR, K. (2007): Deformation bands in sandstone: a review. – *J. Geol. Soc., London* 164, 755–769.
- MLEJNEK, R. – OUHRABKA, V. – RŮŽIČKA, V. (2008): Poseidon – the pseudokarst system in the sandstones of the Czech Republic: geomorphological structure and biogeographical importance. – *Proc. 10th Int. Symp.*, 29 April – 2 May 2008, 75–86, Gorizia.
- MLEJNEK, R. – OUHRABKA, V. – RŮŽIČKA, V. (2009): Poseidon – a complex system of underground spaces in sandstone in the Czech Republic. – *NSS News* 67, 8, 4–7, Huntsville.
- SHIPTON, Z. K. – COWIE, P. A. (2003): A conceptual model for the origin of fault damage zone structures in high-porosity sandstone. – *J. struct. Geol.* 25, 333–345.
- SCHWEIGSTILLOVÁ, J. – BRUTHANS, J. – FALTEISEK, L. – VÁLEK, J. (2013): Rychlá tvorba skalních kůr na povrchu hruboskalského pískovce: mikroskopický popis, tahová pevnost, odolnost vůči erozi, vznik a význam pro pískovcový reliéf. – *Zpr. geol. Výzk. v Roce 2012*, 228–234.
- SOUKUP, J. – BRUTHANS, J. – SVĚTLÍK, D. – SCHWEIGSTILLOVÁ, J. – SMUTEK D. (2013): Sebeorganizovaný systém podzemních kanálů vzniklých prouděním vody v puklinách křemenného pískovce v lomu Střeleč. – *Zpr. geol. Výzk. v Roce 2012*, 296–304.
- VÍTEK, J. (1978): Typy pseudokrasových jeskyní ČSR. – *Čs. Kras* 30, 17–28.
- TZUS (2011): <http://www.tzus.cz/content/pristroj-pro-zkousky-slozek-zdiva-typ-pzz-01> (8.9.2011).