

**Univerzita Karlova**  
**Přírodovědecká fakulta**

Studijní program: Aplikovaná geologie



**Mgr. Jaroslav Řihošek**

Vliv napěťového pole na zvětrávání a erozi pískovcových útvarů

Influence of the stress field on weathering and erosion of sandstone landforms

Disertační práce

Vedoucí práce/Školitel: Doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.

Školitel-konzultant: prof. RNDr. David Mašín, M.Phil, Ph.D.

Praha, 2022



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne .....

Jaroslav Řihošek

## Prohlášení

Prohlašuji, že podíl Mgr. Jaroslava Řihoška na společných pracích je významný nebo klíčový a příslušný procentuální podíl na pracích uvedených v disertaci činí:

1) Rihosek, J., Bruthans, J., Masin, D., Filippi, M., Carling, G. T., Schweigstillova, J. (2016): Gravity-induced stress as a factor reducing decay of sandstone monuments in Petra, Jordan. *Journal of Cultural Heritage* 19, 415–425. – **80 %** J Řihošek provedl převážnou část všech prací, je proto prvním autorem.

2) Bruthans, J., Filippi, M., Schweigstillova, J., Řihošek, J. (2017): Quantitative study of a rapidly weathering overhang developed in an artificially wetted sandstone cliff. *Earth Surface Processes and Landforms* 42, 711–723. – **30 %** J. Řihošek provedl měření tahové pevnosti arkózy za různých vlhkostních podmínek a především vytvořil 3D model tvaru převisu z fotogrammetrie a v tomto geometricky komplikovaném tvaru v softwaru Plaxis vypočítal rozložení napětí, které porovnal s intenzitou eroze a výsledky sepsal a diskutoval. Doložil tak vliv napětí na rychlost eroze v reálném měřítku a skutečném výchozu. Protože článek se zabýval mnoha různými hledisky (sole, mrazové zvětrání, rychlost eroze), podíl této důležité části tvoří v celém multidisciplinárním článku 30%.

3) Filippi, M., Bruthans, J., Řihošek, J., Slavík, M., Adamovič, J., Mašín, D. (2018): Arcades: Products of stress-controlled and discontinuity-related weathering. *Earth-Science Reviews* 180, 159–184. – **30 %** . J Řihošek zdokumentoval vývoj arkád v lomu Střeleč pomocí fyzikálního modelování, vytvořil 3D numerické modely rozložení napětí ve velmi různých tvarech arkád, a pod vedením prof. Mašína vytvořil i 3D numerickou simulaci vzniku arkád. Tyto práce tvoří argumentační jádro článku, protože jednoznačně dokazují, jaké procesy arkády tvoří. Článek je nicméně převážně zaměřen na popis, vymezení a a charakterizaci arkád a uvedená, byť klíčová tematika v něm tvoří 30% (jde nicméně o velmi rozsáhlý článek - 26 tiskových stran).

4) Řihošek, J., Slavík, M., Bruthans, J., Filippi, M. (2018): Evolution of natural rock arches: A realistic small-scale experiment. *Geology* 47(1), 71–74. – **90 %** . J Řihošek provedl převážnou část všech prací, je proto i korespondujícím autorem článku.

Doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.



## **Poděkování**

Především bych rád poděkovat mému školiteli Doc. RNDr. Jiřímu Bruthansovi, Ph.D. za jeho důsledné vedení a mnoho cenných rad, bez kterých by tato práce nevznikla. Zvláště jsem vděčný za možnost podílet se na výzkumech zajímavého tématu, kterému je věnována tato doktorská práce. Dále bych rád poděkoval konzultantovi prof. RNDr. Davidu Mašínovi, M.Phil, Ph.D., za zasvěcení do metod numerického modelování napětí a jeho vedení při tvorbě numerických modelů. Na tomto místě je také děkuji autorům a spoluautorům článků, které jsou součástí textu doktorské práce, jmenovitě pak Mgr. Michalu Filippimu Ph.D. a Mgr. Martinu Slavíkovi Ph.D. za společnou práci která vedla ke vzniku těchto publikací. Na tomto místě je třeba také zmínit vděčnost společnosti Sklopísek Střeleč, a.s., která umožnila provádění experimentů v lomu Střeleč, především pak Lukáši Horákovi, který povoloval a řídil naše návštěvy na místě.

Za finanční podporu děkuji Grantové agentuře UK, která poskytla grant GA UK č. 386815, a Grantové agentuře České republiky, která poskytla granty GAČR č. 13-28040S a GAČR 16-19459S.

Velký dík náleží mým rodičům za jejich materiální a psychickou podporu po dobu celého mého studia a v neposlední řadě také Erice Vodičkové, díky jejíž trpělivosti a morální podpoře bych tuto práci asi také nedokončil.



## ABSTRAKT

Vliv mechanického napětí na zvětrávání a erozi byl v pracích věnujících se vzniku pískovcových útvarů přehlížen, ačkoli se ukazuje, že napětí je klíčový faktor pro formování řady různých útvarů. Hlavním cílem doktorské práce bylo pochopení vztahu mezi mechanickým napětím a zvětráváním či erozí při vzniku a vývoji pískovcových útvarů. Vliv mechanického napětí na způsob zvětrávání a rychlost rozpadu materiálu tvořící historické památky v Jordánské Petře byl zkoumán na místě i na vzorcích v laboratoři. Mezi rychlostí solného zvětrávání a velikostí jednoosého stlačení vzorků pískovce z Petry se podařilo doložit negativní exponenciální závislost. Role mechanického napětí jako mechanismu řídicího vznik a vývoj tvaru pískovcového útvaru byla dále studována u skalních převisů, pískovcových arkád a skalních bran v ČR a USA. V doktorské práci je představena a prověřována metoda využívající střelečský pískovec jako přírodního analogu ve fyzikálních modelech simulace zvětrávání a eroze cementovaných pískovců. Tyto fyzikální modely jsou navrženy v podobě, kdy je erozní činitel simulující reálné zvětrávání či erozi (skrápění vodou) aplikován na zmenšený iniciální tvar zkoumaného pískovcového objektu vytvořeného ze střelečského pískovce *in situ* v lomu. Pole mechanického napětí v takovém modelu poté určuje, které části modelu jsou erodovány a které zůstávají zachovány, čímž vzniká výsledný tvar. Průběh eroze je postupně dokumentován na snímcích, což umožňuje i 3D zobrazení útvaru, provedení libovolných řezů tímto tvarem a modelování napětí v útvaru v různých fázích jeho vývoje. Pomocí výpočtu rozložení napětí byly interpretovány výsledky fyzikálních modelů zvětrávání a eroze a podařilo se předvídat místa, kde docházelo z nejintenzivnějším zvětrávání či erozí na skutečných skalních útvarech či vytesaných monumentech z pískovce. Byl též numericky simulován vznik pískovcových arkád. Za pomoci studia různých útvarů se podařilo doložit, že vliv mechanického napětí pro vznik řady pískovcových útvarů je klíčový a poprvé byla za kontrolovaných podmínek vytvořena skalní brána, jako jeden z nejelegantnějších útvarů v pískovcích.

## ABSTRACT

The influence of mechanical stress on weathering and erosion has been overlooked in works focused on sandstone landforms formation, although stress has been shown to be a key factor in the formation of a number of different sandstone landforms recently. The main goal of the doctoral thesis is to understand the relationship between mechanical stress and weathering or erosion in the formation and development of sandstone landforms. The influence of mechanical stress on the mode of weathering and the rate of disintegration of the material forming historical monuments in Petra, Jordan was investigated on the site and on samples in laboratory. A negative exponential dependence has been proven between the speed of salt weathering and the magnitude of uniaxial compression of Petra sandstone samples. The role of mechanical stress as a mechanism controlling the formation and development of the shape of sandstone forms was further studied in rock overhangs, sandstone arcades and rock gates in the Czech Republic and the USA. The doctoral thesis presents and verifies a method using Střeleč sandstone as a natural analogue in physical models simulating weathering and erosion of cemented sandstone. These physical models usually take the form of a reduced initial shape of a sandstone object created *in situ* from the Střeleč sandstone in a quarry, to which an erosion factor simulating real weathering or erosion (water sprinkling) is applied. The field of mechanical stress in such a model determines which parts of the model are preferentially eroded and which remain, thus creating the final shape. The erosive process is continuously photographed, which allows construction of photogrammetric 3D model and arbitrary sections of its 3D shape, and modeling of stress distribution in the form in various stages of its evolution. The calculation of stress distribution has been used to interpret the results of physical models of weathering and erosion, and it has allowed to predict the places where the most intense weathering or erosion occurred on real rock landform or carved historical sandstone monuments. The formation and evolution of sandstone arcades has been also numerically simulated. It has been proven that the influence of mechanical stress on the formation of a number of sandstone landforms is crucial and for the first time a rock arch has been created under controlled conditions as one of the most elegant landforms in sandstones.



## Obsah

1. Úvod.....	10
1.1. Zvětrávání a eroze pískovců .....	11
1.2. Vnitřní faktory zvětrávání a eroze .....	12
1.3. Vnější faktory zvětrávání a eroze.....	13
1.4. Specifika pískovců oproti ostatním horninám.....	16
1.5. Vliv napětového pole na zvětrávání .....	17
1.6. Rozložení napětí v masivu tvořeném pískovcem .....	18
2. Definice výzkumných otázek a úkolů:.....	20
3. Způsob řešení vědeckých otázek: .....	22
3.1. Solné zvětrávací experimenty .....	22
3.2. Tvorba fyzikálních modelů .....	23
3.3. Analýza rozložení napětí a numerická simulace vzniku pískovcovém skalního útvaru 25	
3.3.1. Vyjádření napětí v mechanice kontinua .....	26
3.3.2. Analýza rozložení napětí metodou konečných prvků.....	26
3.3.3. Numerická simulace eroze pískovcového skalního útvaru.....	28
4. Shrnutí hlavních výsledků .....	30
4.1. Solné zvětrávací experimenty.....	30
4.2. Tvorba fyzikálních modelů a numerická analýza napětí .....	32
4.2.1. Zvětrávání a eroze nabatejské skalní architektury .....	32
4.2.2. Rychlý ústup stěny arkózového převisu (Plzeň).....	33
4.2.3. Vznik a vývoj pískovcových arkád .....	34
4.2.4. Vznik a vývoj skalních bran.....	36
5. Závěry .....	39
6. Seznam článků autora, jejich komentáře a autorký přínos .....	40
6.1. Článek 1.....	40
6.2. Článek 2.....	43
6.3. Článek 3.....	46
6.4. Článek 4.....	49

7. Použitá literatura .....	52
8. Plné znění článků 1 – 4 .....	63

## 1. Úvod

Tuto doktorskou práci tvoří souhrn 4 přiložených publikovaných odborných recenzovaných článků, které vznikly během mého doktorského studia. Tyto publikace jsou zaměřené na studium procesů zvětrávání a eroze pískovců a vznik pískovcových skalních útvarů, tedy přirozených výchozů pískovce, jejichž tvary jsou těmito procesy utvářeny.

Pískovce (psamity, arenity) jsou klastické litifikované horniny tvořené z více než 90 % klasty o velikosti 0,0625–2 mm. Klasty pískovců jsou tvořeny hlavně křemennými zrny, ale mohou obsahovat i živce nebo úlomky hornin. Podskupinou pískovců, u nichž převažují křemenná zrna, jsou křemenné pískovce. Obsahují-li pískovce jako další složku více než 10 % živcových zrn, řadí se k arkózám. Naopak litické pískovce obsahují jako další složku více než 10 % úlomků horniny (Dott, 1964).

Pískovce patří k nejrozšířenějším horninám na zemském povrchu. Jejich plošné rozšíření představující cca 15 % zemského povrchu je srovnatelné s rozšířením granitů či vápenců (Meybeck, 1987). Křemenné pískovce, kterých se tato práce především týká, představují přitom přibližně 80 % všech pískovců, zbytek je tvořen drobami a arkózami (Blatt a Jones, 1975).

Pískovcové oblasti jsou popsány ze všech kontinentů a klimatických pásem (Young et al., 2009). Působivé scenerie pískovcových oblastí skalních měst s vysokými skalními věžemi a hlubokými stržemi, skalní brány, vodou vymodelované kaňony či pitoreskně modelované stěny jsou samozřejmě oblíbenými destinacemi nezdědky masového turismu. V krajinářsky nejcennějších pískovcových oblastech byly zřízeny národní parky zaměřené na geologické dědictví. Jedny z nejznámějších lokalit pískovcových útvarů tak jsou například oblasti na Coloradské plošině v USA jako Arches National Park, Zion National Park, Natural Bridges National Monument nebo Rainbow Bridge National Monument. Na Coloradské plošině v Arches National Park a v národním parku Tassili v Alžírsku byla zjištěna nejvyšší koncentrace skalních bran (Debossens, 2007).

Lidmi byla pískovcová krajina vyhledávaná od pradávna, proto není divu, že lokality jako Petra a Vádí Rum v Jordánsku nebo Meteora v Řecku jsou zapsány v Seznamu světového dědictví UNESCO.

Ve střední Evropě se pak na relativně malém území nachází pískovcové oblasti s bohatostí pískovcových forem nejčastěji vázaných na sedimenty křídového moře, zejména na sedimenty hrubozrnných delt (Uličný, 2001). Takovými pískovcovými oblastmi jsou v české křídové pánvi například Labské pískovce, Stolové hory/Góry Stołowe v Polsku a Broumovské Stěny, Adršpašsko-Teplické skály a vrch Ostaš, Český ráj, Kokořínsko a Dokesko, Českolipsko, Ralsko

a Žitavské hory v Německu (Härtel et al., 2007). Tyto lokality jsou kromě bohatosti pískovcových tvarů významné i tím, že podobně jako lokality ve Falckém lese v Německu, Fontainebleau ve Francii či v Sussexu v Anglii, vzbuzují vědecký zájem již od počátku 20. století (Adamovič, 2019).

Oblastem tvořeným pískovci je vlastní charakteristický reliéf, kterému dominují skalní útvary, jakými jsou skalní stěny, sloupy, věže a brány (Koons, 1955; Robinson, 1970; Turkington a Paradise, 2005). Krajinné prvky jako skalní hříby, věže a brány jsou zároveň označovány jako reziduální formy (Migoń, 2021) naznačující jejich tendenci k zachování oproti okolnímu ustupujícímu masivu.

Pískovcové krajinné prvky je možné dle jejich velikosti rozdělit do tří kategorií. Největšími celky jsou makroformy jako kaňony, plošiny, tabulové hory a skalní města. Mezi mesoformy, tedy krajinné prvky střední velikosti patří například skalní římsy, převisy, skalní věže a sloupy, skalní hříby a skalní otvory, mezi které patří skalní okna, brány či tunely. Mikroformy jsou projevy zvětrávacích procesů na skalních površích ve formě skalních voštin, tafoni, skalních mís atd. (Vařilová, 2016).

### **1.1. Zvětrávání a eroze pískovců**

Pískovcové skalní útvary jako například převisy, skalní věže, skalní brány a tafoni jsou výsledkem působení exogenních procesů na pískovcový masiv porušený ať už primárními (mezivrstevní plochy, vrstvy kontrastní litologie) či sekundárními diskontinuitami (pukliny a zlomy). Konkrétními exogenními procesy, které jsou zodpovědné za jejich vznik, jsou zvětrávání a eroze. Účast obou těchto procesů a svahových pohybů má za následek denudaci povrchu spojenou se vznikem charakteristického reliéfu. Za zvětrávání je obecně považován proces, jehož důsledkem je porušení struktury horniny a změna jejího mineralogického složení exogenními procesy při zemském povrchu či mělce pod zemským povrchem (Reiche, 1950; Ollier, 1969; Selby, 1993; Whalley a Warke, 2005). Zvětrávání předchází denudaci a jeho míra a povaha reguluje vývoj reliéfu (Turkington et al., 2005). Zvětrání způsobuje nevratné změny struktury a složení horniny v reakci na podmínky prostředí panující tam, kde přirozeně či uměle vystupují na zemský povrch (Price, 1995). Tradičně se rozlišují fyzikální, chemické a biologické složky zvětrávání.

Při *chemickém* zvětrávání jsou horniny vystavené vlivům atmosféry a hydrosféry na zemském povrchu v podmínkách, které jsou značně odlišné od podmínek prostředí, kde došlo k jejich vzniku, a podléhají změnám, při nichž dochází ke vzniku v daných podmínkách stabilnějších minerálních asociací. Nejběžnějšími procesy při chemickém zvětrávání je rozpouštění, hydrolýza a oxidace (Colman a Dethier, 1986). *Fyzikální* či mechanické zvětrávání je proces, při němž je struktura původní celistvé horniny porušena a dochází k jejímu rozpadu na menší fragmenty či

jednotlivá minerální zrna beze změn jejího celkového chemického či minerálního složení. Převládajícím mechanismem fyzikálního zvětrávání hornin zemského povrchu je na klimatu závislý subkritický vznik a růst puklin (Eppes a Keanini, 2017), který se uplatňuje například u mrazového zvětrávání, u změn teploty kvůli insolaci či exfoliaci v důsledku uvolnění nadložního tlaku. *Biologické* zvětrávání je pak specifická kombinace chemického a mechanického působení živých organismů na horniny.

Erozní procesy úzce navazují na procesy zvětrávání ve chvíli, kdy je hornina navíc vystavena proudícímu médiu (vzduch, voda či led), který může uvolněné částice odnášet, nebo kdy může částice z povrchu horniny odpadnout pod svou vlastní vahou. Takový odnos je navíc spojen s větrnou či vodní abrazí, kdy uvolněné částice narážejí na povrch dané horniny a poškozují její strukturu.

Bohatost výskytu pískovcových skalních útvarů širokého spektra velikostí (mezofomy společně s mikroformami) v pískovcových oblastech bývá považována za důsledek litologické a strukturní rozmanitosti pískovců, přičemž některé z těchto mikroforem a mezoforem jsou známy pouze z pískovců (Migoň, 2021). Vznik zvětrávacích forem v pískovci je řízen vnitřními a vnějšími faktory zvětrávání a eroze (vlivy) a jejich vzájemnou interakcí.

### **1.2. Vnitřní faktory zvětrávání a eroze**

Mezi vnitřní faktory zvětrávání a eroze patří například velikost zrn, porozita a s ní spojená propustnost. Jemnozrnné pískovce jsou obecně náchylnější na zvětrávání než ty hrubozrnné (Warke et al., 2006; Smith et al., 2002). Zvětrávání přitom usnadňuje přítomnost větších i menších pórů v rámci horniny. Větší póry usnadňují pronikání vody pískovcem (Fitzner a Snethlage, 1982). Při testech odolosti proti mrazovému a solnému zvětrávání, prováděných na vzorcích německých pískovců v práci Ruedrich a Siegesmund (2007), se pískovce s vyšší porozitou rozpadaly rychleji, přičemž ještě vyšší rozpadové rychlosti byly asociovány s přítomností mikropórů. Distribuce velikosti pórů také určuje, jak rychle hornina prosychá. U hornin, které vysychají pomaleji, může docházet ke krystalizaci solí pod povrchem místo na povrchu, což vede k vyššímu namáhání pískovce, a tím i k jeho rychlejšímu rozpadu (Ruedrich a Siegesmund, 2007). Důležitou roli hraje i mineralogické složení pískovců. Zvláště přítomnost jílových minerálů, které jsou častou složkou tmelu pískovců (Tallman, 1949), značně snižuje odolnost před procesy zvětrávání (McGreevy a Smith, 1984; Pye a Mottershead, 1995; Smith et al., 2002; Iñigo et al., 2003; Jiménez-González et al., 2008). Některými autory je připisován vznik určitých forem kavernozního zvětrávání rozpouštění karbonátových konkrecí a poloh v pískovcích. Takto vznikají např. tafoni (např. Adamovič a Mikuláš, 2011) či jeskyně (Vítek, 1987; Mertlík a Adamovič, 2005).

Mezi vnitřní faktory zvětrávání a eroze lze počítat i stavbu a strukturální prvky pískovcového masivu, které mohou v rámci výchozu ovlivnit lokalizaci těchto procesů. Robinson (1970) popsal v Národním parku Zion v Utahu vývoj charakteristických pískovcových forem v závislosti na charakteru puklinového systému a jeho průniku s horizontální vrstevnatostí. Zvětrávací a erozní procesy modelují například pískovcové sloupy na průniku dvou vertikálních puklinových systémů, zatímco horizontální římsy a skalní brány vznikají naopak na průniku horizontální vrstevnatosti a jednoho systému vertikálních puklin. Rovněž Cruikshank a Aydin (1994) popisují v Národním parku Arches v Utahu vazbu výskytu skalních bran na již existující puklinové zóny v masivu. Charakter puklinových systémů je řídicím faktorem zvětrávání a eroze mnoha pískovcových oblastí v České Republice i ve světě a je důvodem svébytného krajinného rázu pískovcové krajiny střední Evropy, které dominují skalní věže a pískovcové stěny (Pánek a Hradecký, 2016).

### **1.3. Vnější faktory zvětrávání a eroze**

V pískovcích mírného pásu a chladných oblastí je možné očekávat projevy *mrazového zvětrávání* vlivem opakovaného mrznutí a tání vody (Palmer a Radley, 1961). Projevy mrazového zvětrávání jsou dobře popsány z některých polárních oblastí (Derbyshire, 1972; Bromley a Mikuláš, 2002). Mrazové zvětrávání je také využíváno společně se solným zvětráváním při laboratorním testování odolnosti pískovců proti mechanickému zvětrávání (Williams a Robinson, 1981; Warke et al., 2006).

Velká pozornost je věnována *solnému zvětrávání*, které je vnímáno především jako významný proces při destrukci historických památek a městských staveb i jako proces zvětrávání v přírodě (Goudie a Viles, 1997). Solnému zvětrávání je věnováno značné množství prací napříč několika obory, mezi kterými dominuje geomorfologie, geotechnika a materiálové inženýrství, geochemie, stavebnictví a konzervace památek (např. Doehne, 2002).

Značná pozornost je věnována vlivu solí vzniklých v důsledku znečištění ovzduší exhalacemi SO<sub>2</sub> a NO<sub>x</sub>. Vlivem přínosu těchto látek srážkami se sníženým pH do porézního prostředí pískovce pak dochází k rozpouštění minerálů obsažených v pískovci a vzniku rozpustných solí, které mohou pískovcem migrovat. Jejich krystalizace pod povrchem pískovce potom může narušovat strukturu a urychlovat zvětrávání pískovcového útvaru (Přikryl et al., 2007).

Vliv solí na zvětrávání je značně komplexní a není možné jej popsat jednotným mechanismem. Přítomnost soli a vlhkosti hraje stejně významnou roli jako typ soli, textura, porozita a vnitřní povrch materiálu. Pohyb roztoků v materiálu je poháněn klimatickými podmínkami jako teplotou a relativní vlhkostí vzduchu, se kterým je materiál v kontaktu (Charola, 2000).

Krystalizace solí z přesyceného roztoku v pórech způsobuje namáhání porézního materiálu, které může vést až ke vzniku puklin při překročení pevnosti daného materiálu. Obecně platí, že čím má

materiál větší póry, tím nižší je krystalizační napětí. Krystalizační tlak na hranici rostoucího krystalu, a tedy rozsah poškození materiálu, je úměrný přesycení roztoku danou solí v místě krystalizace a záleží na mnoha faktorech. Kromě složení daných krystalizujících fází záleží především pak na kontaktním úhlu mezi rostoucím krystalem a stěnou póru (Scherer, 1999), dále na rychlosti proudění roztoků a na rychlosti výparu. Poslední dva zmíněné faktory také určují lokalizaci krystalizace – zda dojde ke krystalizaci pod povrchem materiálu, která má za následek jeho poškození, nebo zda dojde k relativně méně poškozujícímu výkvětu soli na povrchu materiálu (Rodriguez-Navarro a Doehne, 1999).

Vznik tafoni v důsledku solného zvětrávání je vysvětlován například v práci Huinink et al. (2004), kdy kontrolním mechanismem je odpařování vlhkosti s obsahem solí v porézním pískovci. Pokud je k dispozici jen malé množství vody k výparu, výparová fronta sestupuje pod povrch a výpar způsobuje ukládání solí v prohlubních pískovce, kde se také odehrává solné zvětrávání, což vede k rozšiřování těchto prohlubní až do podoby tafoni a vzniku kavernózního typu zvětrávání. Vyšší množství dostupné vody posouvá výparovou frontu blíže k povrchu, který je vlivem krystalizace solí zhlazován rovnoměrněji. Podobná pozorování mají i Mikuláš et al. (2010), přičemž zohledňují i efekt povrchově a mělce podpovrchově stékající vody. Pozitivní zpětnou vazbu u kavernózního zvětrávání mezi velikostí prohlubní a rychlostí zvětrávání popisují Turkington a Phillips (2004). Proces zvětrávání přitom zprostředkovává vlhkost, která se koncentruje právě v prohlubních pískovce. Autoři považují proces vzniku prohlubní za neustálený, systém se samovolně stabilizuje při dosažení limitů danými velikostí a hustotou prohlubní či dostupné vlhkosti.

Zvětrávání jako důsledek transportu vlhkosti a solí pod povrchem horniny v pískovcových převisích je popisováno například v práci (Mol a Viles, 2010). Lokální podpovrchové proudění vody urychluje transport rozpuštěných látek směrem k povrchu pískovce, kde může docházet k jejich ukládání ve formě solí, a následnému lokalizovanému opadu materiálu v podobě šupin. Vztah mezi prouděním či přítomností vlhkosti v hornině a zvětráváním je diskutován jako jeden z faktorů společný pro jiné mechanismy zvětrávání (Goudie a Viles, 1997; Conca a Astor, 1987; Halsey et al., 1998).

Za vnější vliv lze považovat rovněž *povrchové zpevnění* (case hardening), kdy na povrchu pískovce vznikají mineralizované krusty, což vede k zvýšené variabilitě rychlosti zvětrávání. Mineralizované krusty vznikají díky migraci vody s rozpuštěnými minerálními látkami směrem k povrchu, kde se po odpaření vody tyto látky ukládají (Robinson a Williams, 1994; Turkington a Paradise, 2005). Některé povrchy jsou tímto procesem stabilizované, zatímco ty nestabilizované erodují progresivně. Takové krusty mohou být složeny z kalcitu a jiných málo rozpustných solí (např. sádrovce) a kaolinitu (Conca & Rossman, 1982). Mezi dalšími popsányými minerály, které

se podílejí na zpevnění povrchů je SiO<sub>2</sub> (opál, chalcedon), oxidy a hydroxidy železa a manganu (Robinson and Williams, 1987; Viles and Goudie, 2004; Adamovič et al., 2011; Dorn et al., 2012). Depozice mineralizovaných krust může být urychlena činností mikroorganismů, především houbových vláken lišejníků, které kolonizují povrch pískovců (Viles a Goudie, 2004; Dorn et al., 2012; Slavík et al., 2017a). Mikroorganismy obydávající čerstvý povrch pískovců mohou také za určitých okolností významně přispět k mechanické stabilizaci takového povrchu (Slavík et al., 2017a). Pískovce s vyvinutými skalními kůrami mohou být také náchylnější na solné zvětrávání, kdy dochází k akumulaci solí pod skalní kůrou, která se následně snadno odlupuje (Vařilová et al., 2010). V případě porušení zpevněné kůry jsou odhalené partie pískovce náchylnější k zvětrávání, a protože je kůra zpravidla méně propustná pro vodní páru, dochází v partiích bez kůry k rychlejšímu výparu a tím pádem i k efektivnějšímu kapilárnímu proudění vody a rozpuštěných látek směrem k povrchu, jak dokládá na případu kavernózního zvětrávání doleritů Conca a Astor (1987).

Křemenné litologie jsou tradičně považovány za prakticky imunní vůči působení chemického zvětrávání (Tricart a Cailleux, 1972, s. 152). Ve specifických případech může nicméně docházet k *rozpuštění křemene* (Martini, 1979; Young, 1986; Young, 1987; Wray, 1997; Wray, 2013; Grimes et al., 2009; Wray a Sauro, 2017), přičemž tímto procesem – částečným rozpuštěním křemenných zrn podél jejich okrajů a porušením soudržnosti pískovce (arenizací) – vznikají v pískovcích různé krasové projevy jako například drobné povrchové projevy jako skalní hrnce a odtokové kanály či jeskyně a propasti (Young et al., 2009). Někteří autoři (Young et al., 2009; Duszyński a Migoń, 2018) nicméně připisují procesu arenizace i podíl na vzniku charakteristické morfologie skalních měst, která se vyznačuje nahloučením skalních věží oddělených soutěskami založenými na systému vertikálních puklin. Terciární arenizaci považuje Cílek (2002) za přípravnou fázi v modelu vzniku skalních měst ve střední Evropě. Proces arenizace je nejčastěji vázán na oblasti budované horninami s vysokým obsahem křemene, s velmi vysokým úhrnem srážek humidního tropického či subtropického klimatu a dlouhé expozice skalních povrchů působení klimatu v oblastech po dlouhou dobu geologicky stabilních. Takové podmínky nicméně není možné v současnosti očekávat v oblastech mírného pásu střední Evropy či Coloradské plošiny v USA (Migoń, 2021).

Diskutováno je zvětrávání pískovců vlivem *teplotní roztažnosti*, kdy v důsledku vzniku teplotního gradientu v povrchových partiích pískovcových forem při slunečním osvětlení oproti nočnímu chladu dochází k odlupování pískovcových šupin. Takové podmínky lze očekávat v pouštním klimatu, kterému je vystavena např. hora Uluru v centrální Austrálii (Ollier a Tuddenham, 1961). Smith et al. (2005) dokládají experimentálně, že cykly zahřívání a ochlazování bez přítomnosti vlhkosti vyvolaly slabé projevy zvětrávání pouze u vzorků pískovce ošetřených NaCl. Numerické modelování teplotní roztažnosti solné krusty v tafonech pískovce nicméně dokládá, že samotný



rozdíl teplotních roztažností pískovce a solné krusty nevytváří dostatečné napětí k porušení pískovce (Wang a An, 2016). K výraznému zvětrávání s opadem šupin a vzniku puklin paralelních s povrchem dochází v laboratorních podmínkách, především pokud jsou cykly zahřívání a ochlazování prováděny na vzorcích ošetřených solemi a s přítomností vlhkosti, která umožňuje mobilizaci solí a jejich rekrystalizaci pod povrchem pískovce (Smith a McGreevy, 1988).

Proměnlivost povrchové teploty skalního povrchu během dne může hrát nezanedbatelnou roli při zvětrávání, zvláště v kombinaci s mrazovým nebo solným zvětráváním. Samotná teplota pak záleží na klimatických podmínkách, expozici skalního povrchu a odrazivosti daného skalního povrchu. Krátkodobé změny teploty postihují relativně tenkou vrstvu skalního povrchu, zvláště u hornin s nižší tepelnou vodivostí (Jenkins a Smith, 1990), a právě v takové vrstvě se často odehrává odprýskávání šupin materiálu či jeho rozpad na jednotlivá zrna (Whalley, 1984). Teplotní oscilace mohou tedy způsobovat namáhání přípovrchové vrstvy a umocňovat jiné druhy zvětrávání (Jenkins a Smith, 1990).

*Exfoliace* se projevuje v menším měřítku vznikem puklin kopírujících stávající reliéf. Dává vzniknout zakřiveným puklinám na svazích pískovcových masivů. Zatímco existují názory, že exfoliace je důsledkem denudací zapříčiněného odlehčení masivu (Bradley, 1963; Ollier a Tuddenham, 1961), velká skupina prací vidí jako příčinu vzniku těchto puklin vliv nerovnoměrného rozložení napětí v hornině důsledkem stávající topografie nerovného terénu (Yatsu, 1988; Carlsson a Olsson, 1982; Martel, 2011). Young et al. (2009) se přiklání k názoru, že exfoliace může být důsledkem odlehčení i stávající topografie, případ od případu.

Erozní procesy mají za následek odnos zvětralého materiálu. Na těchto procesech se podílí transportní média jako tekoucí voda, proudící vzduch a led, a také gravitace. Proudění podzemní vody v porézním pískovci vlivem hydraulického gradientu může způsobovat zrychlenou erozi v místě pramene pod hranou pískovcové kvesty, čímž vzniká údolí s charakteristickým kruhovým čelním půdorysem. Vývoj říční sítě odráží zpětnou vazbu mezi hydraulickým polem podzemní vody a tvarem reliéfu. Proces se nazývá *sapping* (Laity a Malin, 1985; Howard a Kochel, 1988). Podobný proces vzniku podzemních kanálů zpětnou erozí řízený hydraulickým polem – *piping* – byl pozorován v netmelených hruboskalských pískovcích lomu Střeleč v Českém Ráji (Bruthans et al., 2012).

#### **1.4. Specifika pískovců oproti ostatním horninám**

World Arch Database na stránkách <https://arches.stonecanyonadventures.com> obsahuje více než 12 500 záznamů o jednotlivých skalních branách. Ačkoliv některým záznamům chybí přiřazená hornina, pískovci je tvořeno více než 7700 skalních bran. Druhou nejčastější horninou tvořící skalní brány je vápenec s „pouhými“ přibližně 700 záznamy a vulkanické horniny s podobnou

četností. Slepence budují jen 250 identifikovaných skalních bran a granitoidními horninami je tvořeno pouze 64 bran. I přes možné zkreslení kvůli přednostnímu zaměření na již známé lokality s výskytem skalních bran se zdá, že skalní brány se vyskytují dominantně v pískovcích.

V porovnání s ostatními horninami mohou pískovce vykazovat mnohdy i v rámci jediného výchozu značně vyšší variabilitu v míře zvětrávání, což Warke et al. (2006) připisují specifickým charakteristikám porozity a propustnosti. Mineralogické složení křemenných pískovců způsobuje jejich značnou odolnost proti chemickému zvětrávání.

Pískovce mají ve srovnání s jinými horninami specifické projevy zvětrávacích a erozních procesů. Křemen tvořící jejich podpůrnou strukturu je odolný vůči zvětrávání, ale velký vliv má složení matrix a tmelu, které určují efektivitu vnějších vlivů, které na pískovce působí. Bohatost pískovcových tvarů je také vysvětlována jejich strukturami a litologickou variabilitou, které zaručují velkou bohatost tvarů, které mohou pískovce nabývat (Migoń, 2021).

Společným rysem mnohých pískovcových útvarů je tvar jednoduchého architektonického prvku (sloup, klenba, oblouk). I díky tomu máme tendenci používat pro tyto útvary podobnou terminologii jako v architektuře. Dalším charakteristickým znakem je pak často hladký povrch bez přítomnosti výrazných výstupků, tedy pokud nejsou povrchy postiženy kavernózním zvětráváním. Zmíněné mezofomy by tedy mohly sdílet určitý jednotný mechanismus vzniku.

### ***1.5. Vliv napětového pole na zvětrávání***

Vliv mechanického napětí vyvolaný tlakem nadloží na morfologii skalních útvarů byl většinou chápán jako faktor zesilující erozi a zvětrávání (Gerber a Scheidegger, 1969; Gerber a Scheidegger, 1973). Zmíněné práce se zaměřují na situaci, kdy se tektonické napětí koncentruje u paty skalní stěny a v údolích hor. Velikost tohoto napětí protne obálku pevnosti horniny, načež dochází k porušování materiálu, který je tím pádem snadněji erodován. Na druhou stranu byla v minulosti popsána zvýšená stabilita skalních útvarů tvořených klenbou. Vyšší stabilitu oproti rovné stěně mají díky klenbě skalní amfiteátry (Young et al., 2009; Stacey, 1974). Stejně tak byla již dříve popsána role napětového pole pro stabilitu a vývoj skalních bran tvořených obloukem (Young et al., 2009).

Jak nicméně upozorňujeme v práci Bruthans et al. (2014), pokud autoři předchozích studií (McBride a Picard, 2004; Mikuláš, 2001) uvažují kontrolní roli mechanického napětí na proces zvětrávání a eroze, zpravidla nevysvětlují, jakým mechanismem k tomu dochází. V literatuře publikované před rokem 2014 se vyskytuje jediná výjimka, ve které autor na vliv mechanického napětí pohlíží jako na řídicí mechanismus vzniku některých skalních útvarů (Mikuláš, 1997).

K objasnění role mechanického napětí při utváření pískovcových skalních útvarů došlo při zkoumání vzniku podzemních kanálů v pískovci v lomu Střeleč u Mladějova v Českém ráji.

Experimenty poukázaly na unikátní vlastnosti této horniny, která je zde dobývána jako surovina sklářských písků. Ukázalo se, že suchý vzorek pískovce se při zaplavení vodou samovolně rozpadá na jednotlivá zrna, nicméně při zatížení vzorku závažím zůstává vzorek celistvý a nerozpadá se (Bruthans et al., 2014).

Důvodem rozpadu netmeleného střelečského pískovce je slaking. Bubliny vzduchu vytlačované kapilárními silami při sycení vzorku unikají ze struktury materiálu, čímž rozrušují jeho povrch (Arulandan a Heinzen, 1997). Povrch vzorku je tímto procesem rozrušován v místech, kde zrna nejsou dostatečně sevřena. Naopak ty části vzorku, jejichž zrna jsou sevřena zatížením, tomuto procesu odolávají. Tento mechanismus byl v článku Bruthans et al. (2014) zobecněn jako negativní zpětná vazba mezi tlakem a erozí, kdy skalní útvar v gravitačním poli určuje napěťové pole a napěťové pole zase předurčuje, v jaké části daného útvaru bude docházet k erozi. Takto je možné konceptuálně popsat dynamiku zvětrávání a eroze skalních útvarů, jejichž vývoj je řízen napětím. Přírodní skalní útvar budovaný pískovcem přitom zpravidla vykazuje jen jistou míru napětím kontrolovaného zvětrávání či eroze. Tato práce otevřela téma vlivu mechanického napětí na erozi z nové perspektivy a zároveň poskytla metody pro zkoumání tohoto fenoménu.

V některých případech je možné vysledovat vliv mechanického napětí na zvětrávání či erozi na morfologii skalních útvarů přímo v terénu (Mikuláš, 1997). Takové pískovcové útvary se podobají tvarům a prvkům, které jsou běžné v lidské architektuře a sdílejí určité společné morfologické charakteristiky. Povrch takových tvarů je často hladký, bez výrazných výstupků a hran. Tvar může mít přímý průběh, ale pokud je zakřiven, tak má křivka pozvolný průběh. Vznikají tedy tvary cylindrických (válcových) sloupů či sloupů v podobě přesýpacích hodin (u skalních hříbů a tzv. skalních hodin), plné tvary mohou nabývat charakteru homolí či kupolí (např. zakončení skalních věží), podobně i dutiny se zpravidla vyznačují přítomností kleneb (převisy a arkády), přechodným tvarem mezi klenbou a sloupem je pak oblouk u skalních bran a mostů.

V článku Filippi et al. (2018) označujeme proces, který vede ke vzniku tzv. arkád, jako „stress-controlled weathering“, tedy za napětím řízené zvětrávání. V článku Rihosek et al. (2016) podobně označujeme skalní útvary, které těmito procesy vznikly, jako „stress-controlled landforms“, což má evokovat napětí jako hlavní faktor řídící zvětrávání či erozi, které jsou zodpovědné za vznik daného skalního útvaru.

### **1.6. Rozložení napětí v masivu tvořeném pískovcem**

Rozložení napětí v reálném trojrozměrném objektu (skalním útvaru) tvořeném pískovcem s přítomností puklin a mezivrstevních ploch (obecně diskontinuit) je zákonitě nerovnoměrné. Rozložení napětí v homogenním pískovci a přípovrchové vrstvě pískovcové formy je při zohlednění jeho mikrostruktury také značně nehomogenní. Na nerovném povrchu izotropního

materiálu dochází ke koncentraci napětí (Gao, 1991; Medina a Hinderliter, 2014) díky nerovnostem, přičemž tyto nerovnosti mohou vyvolat 2 až 3násobný nárůst napětí v případě slabě zvlněného povrchu. K nerovnoměrné distribuci napětí dochází i uvnitř polykrystalického materiálu, jakým je například granit (např. Burnley, 2013). V případě pískovců je problematika distribuce mechanického napětí dále komplikována faktem, že jakožto klastická hornina je struktura pískovce primárně tvořena zrny křemene, které přenášejí napětí. Dále se ale na přenášení napětí mohou podílet i matrix a tmel, pokud jsou přítomny. V čistě partikulárních látkách dochází při jejich zatížení k přenosu napětí mezi kontakty jednotlivých zrn, přičemž tento přenos je preferenčně lokalizován na komplikovaných sítích složených z jednotlivých zrn daného materiálu (force chains), zatímco jiné části struktury pro přenos napětí využitě nejsou (Oda et al., 1985; Radjai et al., 1998; Majmudar a Behringer, 2005; Peters et al., 2005; Ostojic et al., 2006). Fonseca et al. (2013) popsali vznik deformačních pásů (shear bands) při triaxiálních testech na cementovaném fontainebleauském pískovci, což interpretují jako projev lokalizovaného přenosu napětí materiálem.

Zhodnocení rozložení mechanického napětí se zvláštním zaměřením na jeho přívěrchovou vrstvu je komplikováno nemožností jeho přímého pozorování. Existují sice metody měření vyvinuté pro studium napětí v krystalických horninách v prostředí uměle vytvořených podzemních prostor, jako jsou štoly dolů nebo tunely, které umožňují bodové měření napětí jak skalního povrchu, tak i v hloubi masivu (Ljunggren et al., 2003). Tyto metody jsou ale zcela nevyužitelné pro měření napětí zvětrávajících/erodovaných pískovcových povrchů a ze své podstaty neumožňují zmapování napěťového pole ve 3D objektu. Pole mechanického napětí v hornině je nicméně možné při jistém zjednodušení komplexní reality analyzovat numerickými metodami.

## 2. Definice výzkumných otázek a úkolů:

Publikované články, které jsou součástí textu této práce, si kladou za cíl objasnit vliv mechanického napětí na procesy zvětrávání a eroze pískovců. V článku „Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion“ (Bruthans et al., 2014), jehož jsem spoluautorem, a který byl sepsán krátce před mým nástupem do doktorského studia, byl představen nový princip, který řídí rozpad pískovce při působení různých zvětrávacích a erozních činitelů. Ukázalo se, že část pískovcového útvaru, která nepřenáší mechanické napětí a není stlačena, podléhá rychlejší erozi, než zatížená část. Tím se mění rozložení hmoty pískovcového útvaru, a to má za následek další změnu zatížení. Mezi stlačením a erozí pískovcového útvaru tedy platí princip negativní zpětné vazby. Tento článek také předznamenal směr následujících výzkumů a dále shrnuje a předkládá efektivní způsoby a metody studia zvětrávání a eroze, do té doby v literatuře prakticky nevyužité. Další výzkumy byly proto zaměřeny na ověření předdeslaných principů a postupů na reálných případech pískovcových útvarů vystavených zvětrávání a erozi.

Jednou z výzkumných otázek bylo ověření principů negativní zpětné vazby mezi napětím a zvětráváním na dlouhodobě exponovaných architektonických památkách vytesaných do pískovce, u kterých bychom mohli odhadnout jejich původní tvar, a které již podlely značné míře rozpadu.

Dalším úkolem bylo zjistit, zda existuje určitý práh stlačení, který ostře limituje rozpad pískovce při působení daného zvětrávacího nebo erozního činitele, nebo jestli míra stlačení pozvolna snižuje rychlost zvětrávání a eroze bez existence prahové hodnoty. Výsledkem by byla funkce mezi rychlostí rozpadu a mírou stlačení.

V původní práci byly prováděny simulace zvětrávání nebo eroze s využitím efektu slakingu na střelečském pískovci (Bruthans et al., 2014). Bylo nutné nalézt a ověřit využití odlišného mechanismu eroze střelečského pískovce pro jeho použití jako univerzálního přírodního analogu k simulaci zvětrávání a eroze pískovců, který by z mechanického hlediska lépe odpovídal přírodním podmínkám. Takový mechanismus by materiál erodoval pouze při jeho povrchu, a na rozdíl od slakingu by nerozrušoval strukturu materiálu zevnitř. Hledaný způsob simulace by měl být schopen vytvářet na střelečském pískovci tvary (zmenšené i v reálné velikosti), které odpovídají pískovcovým útvarům přirozeně se vyskytujícím v pískovcových oblastech.

Podstatným úkolem bylo použití výše zmíněného principu a nových postupů pro vysvětlení a popis vzniku a vývoje dalších pískovcových útvarů, jakými jsou například skalní převisy, drobné seřazené dutiny a sloupky na planárních diskontinuitách v pískovcích („pískovcové arkádky“) a skalní brány. Vznik tvarů podobných skalním branám byl již v předchozí práci popsán (Bruthans et al., 2014). Tehdy se nicméně jednalo o netypickou formu ve tvaru písmene „A“ tvořenou

dvěma sbíhajícími se sloupky, a nikoliv o běžnější formu skalní brány tvořené nelomeným obloukem.

Mechanickým napětím řízená eroze je jednoduchý fyzikální princip, který objasňuje vznik některých pískovcových útvarů. Z toho pohledu by mělo být možné využít tento princip v numerickém modelu, který by simuloval jejich vznik a vývoj bez použití experimentálních metod, tedy bez nutnosti používat experimentální materiál (reálně existující, např. pískovec). Posledním úkolem bylo tedy sestavit takový numerický model (matematický model v počítači), který by byl schopen předpovídat vývoj iniciálního tvaru pískovcového útvaru podrobeného simulovaným procesům zvětrávání a eroze.

### 3. Způsob řešení vědeckých otázek:

K řešení výše zmíněných otázek jsem použil několik na sebe navazujících metod. Jsou jimi *solné zvětrávací experimenty, tvorba fyzikálních modelů, analýza rozložení napětí v pískovcovém skalním útvaru nebo fyzikálním modelu a numerická simulace eroze pískovcového skalního útvaru.*

#### 3.1. Solné zvětrávací experimenty

Testy solného zvětrávání slouží ke zjištění odolnosti hornin (zpravidla stavebního materiálu historických památek) vůči destruktivním účinkům krystalizace solí. Tyto testy lze využít i pro laboratorní ověření vlivu mechanického napětí na rychlost zvětrávání/eroze. Abych ověřil vliv různých úrovní stlačení na rychlost zvětrávání/eroze pískovců, provedl jsem solné zvětrávací experimenty na vzorcích pískovce souvrství Umm Ishrin, ve kterém jsou vytesány skalní hrobky a další helénské architektonické objekty nabatejské kultury v městě Petra v Jordánsku. Souvrství Umm Ishrin je tvořeno kambro–ordovickými středně zrnitými dobře vytrřiděnými pískovci s matrix tvořenou autigenním kaolinitem a cementem hematitu, goethitu a podřízeně kalcitu (Delmonaco et al., 2013), s porozitou v rozsahu 4–21 % a obsahem cementu 7–50 % (Heinrichs, 2008).

Testy solného zvětrávání jsem prováděl na šesti vzorcích pískovce v podobě krychlí o hraně délky 4 cm. Dva vzorky jsem nechal jako kontrolní nestlačené, dva vzorky jsem jednoose stlačil pomocí závaží o hmotnostech 5,9 a 11,5 kg a zbylé dva vzorky jsem jednoose stlačil ve stahovacích ocelových klecích pomocí závitových tyčí a dotažením šroubů momentovým klíčem na 0,3 a 0,7 Nm podobně jako v práci Bruthans et al. (2014). Vznikla tak sada vzorků, kde dva vzorky nebyly zatíženy, a další čtyři vzorky byly stlačeny napětím o velikostech 36 kPa, 70 kPa, 250 kPa a 680 kPa. Napětí u všech stlačených vzorků bylo přenášeno na pískovec ocelovými destičkami podloženými několika vrstvami PE potravinové folie. Všechny vzorky jsem následně vystavil opakovaným 24hodinovým cyklům, kdy jsem vzorky vždy nejprve nasýtil ponořením do 16% roztoku  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , následně sušil v laboratorní peci po dobu 20 h a poté vyndal z laboratorní pece, aby vychladly před jejich dalším nasycením roztokem  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Vzorky jsem po každém cyklu zvážil a na laboratorních vahách jsem změřil také hmotnost uvolněného materiálu – písku. Celý proces jsem prováděl opakovaně, dokud nedošlo ke kompletnímu rozpadu vzorků vlivem krystalizace mirabilitu  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  (Rihosek et al., 2016). Procedura sušení v laboratorní peci byla inspirovaná normou EN12370 (1999), kdy byla teplota během 7 hodin zvýšena na 105 °C, a tato teplota byla držena dalších 13 hodin neměnná. Oproti normě EN12370 (1999) jsem použil roztok  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  o vyšší koncentraci. Použití vysoké koncentrace  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  má za následek velmi vysokou rychlost zvětrávání, která je vnímána jako nerealistická pro simulaci solného zvětrávání pískovcových povrchů v přírodě (McGreevy a Smith, 1982; Smith et al., 2005), zvýšení rychlosti

rozpadu při použití koncentrovaného roztoku lze nicméně využít pro zjištění vlivu míry stlačení na rychlost solného zvětrávání.

### **3.2. Tvorba fyzikálních modelů**

Jednou ze základních metod mého studia vzniku a vývoje pískovcových skalních útvarů byla tvorba fyzikálních modelů zvětrávání/eroze s využitím střelečského pískovce. Fyzikálním modelem je myšlen objekt vytvořený z modelového materiálu, který je kontrolovaně vystaven eroznímu procesu, přičemž takový model má ve své skutečné či zmenšené podobě reprezentovat vznik a vývoj přírodního či člověkem pozmeněného skalního útvaru při zachování přirozených vlastností daného materiálu a mechanismů jeho eroze.

Střelečský pískovec nebo dle práce Bruthans et al. (2014) střelečský uzamčený písek (SLS – Strelec Locked Sand; dále v práci střelečský pískovec) je varieta hruboskalského pískovce těženého v lomu Střeleč u Mladějova v Českém ráji. Těleso hruboskalského pískovce bylo uloženo v prostředí mořských hrubozrnných písčítých delt ve svrchním turonu až spodním coniacu a náleží teplickému souvrství české křídové pánve (Uličný, 2001). Střelečský pískovec má na lokalitě ve střelečském lomu oproti nadložnímu slévárenskému žlutavému pískovci bělošedou barvu. Tvoří až několik decimetrů mocné izoklinálně ukloněné foresety. Je to středně zrnitý až hrubozrnný čistý křemenný pískovec s nízkým obsahem kaolinitu – cca 1,2 % (Schweigstillová et al., 2013). Je takřka zcela bez přítomnosti tmelu s porozitou 22 %. Zrna křemene tvořící tento pískovec jsou angulární s hrubým povrchem a projevy epitaxiálního narůstání křemene.

Pro použití tohoto materiálu při tvorbě fyzikálních modelů a dále pro numerickou analýzu rozložení napětí v těchto modelech a pro numerickou simulaci eroze je důležitá znalost mechanických parametrů střelečského pískovce. Triaxiální testování odhalilo vysoký úhel vnitřního tření pískovce ( $72^\circ$ ). Jednoosá pevnost střelečského pískovce v tlaku má velikost až 3 MPa, což je relativně vysoká hodnota v porovnání s jeho nízkou pevností v tahu (Bruthans et al., 2014). V suchém stavu je značně křehký a snadno se drolí a obrušuje bříšky prstů. Pokud jeho povrch není kolonizován mikroorganismy (Slavík et al., 2017b), je snadno erodován proudící vodou a deštěm. Experimentálně bylo stanoveno minimální kritické napětí 0,5–2,6 kPa, kterým má být pískovec stlačen, aby po ponoření do vody nedocházelo vlivem slakingu k výraznější destrukci jeho struktury (Bruthans et al., 2014).

Podle charakteristik dle práce Dusseault a Morgenstern (1979) lze střelečský pískovec přiřadit k tzv. uzamčeným pískům, které jsou obecně křehké a drolivé, jsou díky absenci tmelu nesoudržné, mají nižší porozitu než maximálně zhutněný písek, obecně vysoký úhel vnitřního tření a vysokou pevnost v tlaku oproti nízké pevnosti v tahu. Tyto vlastnosti jsou způsobeny vzájemným zaklesnutím angulárních zrn, ze kterých jsou uzamčené písky tvořeny. Pozoruhodné



mechanické vlastnosti střelečského pískovce jsou způsobeny právě jeho strukturou. V rámci ČR byly identifikovány i další arenity, které mají podobné charakteristiky a které lze jednotně označit za tlakově stabilizované písky. Patří mezi ně například kaolinické pískovce klikovského souvrství z Hosína (důlní dílo Orty) nebo arkózovité pískovce kladenského a týneckého souvrství z důlního díla u Nevřeně u Plzně. Tyto dva pískovce sice obsahují v porovnání se střelečským pískovcem vyšší podíl kaolinického tmelu, ten je nicméně snadno rozplavován vodou (Bruthans a Řihošek, 2017).

Vytvořené fyzikální modely simulující zvětrávání/erozi mají podobu napodobeniny pískovcového skalního útvaru zmenšeného i skutečného měřítka. Iniciální stav jsem vytvořil z homogenního bloku střelečského pískovce *in situ* v lomu Střeleč, na který je následně aplikován erozní proces. V práci Řihošek et al. (2016), Filippi et al. (2018) a Řihošek et al. (2018) jsem tento erozní proces napodobil kropením vodou, kdy energie dopadajících kapek z kroupidla rozrušovala ty části fyzikálního modelu, které nepřenášejí mechanické napětí indukované gravitací (nejsou stlačené, nebo jsou v tahu), a eroze vodou vypreparovává ty části fyzikálního modelu, které napětí přenášejí.

Ve střelečském pískovci jsem pomocí akumulátorové vrtačky, dlát a ruční pily vytvořil dva zmenšené idealizované modely nabatejské skalní architektury v Jordánské Petře představující skalní obydlí s oknem a skupinu kvádrových dutin v ukloněné lomové stěně. Tyto iniciální modely jsem posléze kropil vodou a to buď kontinuálně pomocí ponorného čerpadla s napojenou kropicí násadou, nebo v jednotlivých krocích pomocí zahrádkářské kropicí konve. Proces eroze jsem zaznamenával pomocí digitálního fotoaparátu umístěného na stativu vždy po konstantním množství aplikované vody (stejná potenciální intenzita eroze). Následně jsem z pořízených snímků sestavil časosběrné záznamy vývoje tvarů těchto erodujících objektů (Řihošek et al., 2016).

Podobný postup jsem využil pro tři verze simulací vzniku pískovcových arkád, tedy drobných seřazených dutin a sloupků umístěných na planárních diskontinuitách v pískovcích.

V první verzi simulace vzniku pískovcových arkád jsem využil stávající subhorizontální zvrstvení střelečského pískovce jako diskontinuitu, na které dochází ke vzniku těchto útvarů. Přibližně vertikální stěnu střelečského pískovce v lomu Střeleč jsem zarovnal a zhladil tak, abych odstranil rozvolněný a pionýrskými lišejníky kolonizovaný povrch. Tuto stěnu jsem následně kontinuálně kropil vodou pomocí ponorného čerpadla s napojenou kropicí násadou.

Ve druhé a třetí verzi simulace vzniku pískovcových arkád jsem s pomocí akumulátorové vrtačky vytvořil horizontální přerušovaný nebo nepřerušovaný zářez o hloubce několika cm umístěný cca 15 cm pod horním okrajem přibližně vertikální lomové stěny střelečského pískovce. Takto

připravené zářezy představující planární diskontinuity jsem následně kropil vodou pomocí zahrádkářské kropicí konve.

Proces tvorby oválných dutin ve třech verzích experimentu jsem zaznamenával pomocí digitálního fotoaparátu umístěného na stativu. Z pořízených snímků jsem sestavil časosběrný záznam vzniku a vývoje tvarů podobných pískovcovým arkádám (Filippi et al., 2018).

Výše uvedené experimenty simulací zvětrávání/eroze na fyzikálních modelech ze střelečského pískovce mi umožnily pochopit způsob jejich vzniku a chování střelečského pískovce vystaveného erozi dopadajících vodních kapek. Byl jsem tedy schopen vytvořit z tohoto hlediska pokročilejší model, představující vznik a vývoj zaoblené skalní brány. Iniciální tvar v podobě úzkého bloku o šířce 20 cm jsem vytvořil s pomocí pily *in situ* na neporušeném bloku střelečského pískovce ve Střelečském lomu. Do tohoto úzkého bloku jsem s pomocí dlouhého vrtáku a akumulátorové vrtačky vytvořil horizontální zářez o délce 37 cm protínající příčně tento blok ve vzdálenosti 13 cm od jeho horní hrany. Na takto vzniklý iniciální tvar jsem následně v pravidelných krocích aplikoval rovnoměrně vodu kropením z kropicí konve.

Proces vzniku, vývoje a zániku skalní brány jsem dokumentoval v jednotlivých krocích cyklech digitálním fotoaparátem umístěným na stativu. Pořízené snímky byly využity k analýze lokalizace eroze a také jsem z nich sestavil časosběrný záznam vzniku skalní brány.

Fotografická dokumentace byla po každých deseti cyklech doplněna snímkováním pro účely fotogrammetrické analýzy vývoje tvaru ve 3D. Ze snímků jsem pomocí fotogrammetrického softwaru sestavil fotogrammetrické modely pro několik fází vývoje tvaru brány. Fotogrammetrické 3D modely jsem následně importoval do programu Blender (Hess, 2010), abych je následně s využitím referenčních bodů (body fyzikálního modelu brány, které nebyly během simulace zvětrávání/eroze pozměněny) seskládal na sebe. Takto seskládané modely jsem potom využil k tvorbě řezů zobrazujících vývoj tvaru brány ve 3D. Dále jsem řezy využil k odvození rychlosti eroze na oblouku brány a k určení změny plochy a obvodu oblouku během vývoje brány (Řihošek et al., 2018).

### **3.3. Analýza rozložení napětí a numerická simulace vzniku pískovcovém skalního útvaru**

Pro pochopení vlivu napětí na proces zvětrávání/eroze pískovcového masivu bylo nutné zjistit, jaké je rozložení napětí uvnitř daného pískovcového útvaru nebo fyzikálního modelu. K tomuto účelu jsem využil softwaru pro analýzu rozložení napětí, který se běžně využívá pro analýzu deformace a stability v geotechnickém inženýrství a mechanice hornin a zemin (Herle, 2003). Po doplnění takového geotechnického softwaru o funkci změny geometrie je možné jej využít i pro sestavení simulací zvětrávání/eroze pískovcových útvarů.

### **3.3.1. Vyjádření napětí v mechanice kontinua**

Horninové prostředí bez přítomnosti diskontinuit (zlomy, pukliny, mezivrstevní plochy) a se zanedbáním struktury tvořené jednotlivými zrny se v geotechnice zjednodušuje jako kontinuum. To nám umožňuje jednoduše popsat mechanický stav v dané části skalního útvaru.

Pod pojmem pole mechanického napětí si představujeme rozložení mechanického napětí v trojrozměrném objektu. Napětí je definováno jako síla působící na rovinu o jednotkové ploše. Napětí na dané ploše lze reprezentovat vektorem. Pokud napětí nepůsobí kolmo na danou plochu, rozkládá se na normálovou a střížnou složku. Každým bodem kontinua lze proložit nekonečné množství ploch, které jsou asociovány s dvojicí stejně velkých napěťových vektorů vzájemně opačného směru kolmých na danou plochu. Obal všech těchto napěťových vektorů představuje grafickou reprezentaci napěťového stavu v daném bodě, která se nazývá napěťový elipsoid. Napěťový elipsoid lze přitom obecně popsat třemi na sebe vzájemně kolmými hlavními napětími ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ). Maximální hlavní napětí je zpravidla označeno jako  $\sigma_1$ , zatímco minimální hlavní napětí je označeno jako  $\sigma_3$ . Dalším způsobem, jak vyjádřit napěťový stav daného bodu kontinua je jeho tenzorové vyjádření. Napěťový tenzor se skládá z dvou střížných složek a jedné normálové složky pro každou ze tří ortogonálních stěn infinitezimální krychle. S tenzorovým vyjádřením napěťového stavu se setkáváme v numerické simulaci průběhů napětí a deformací metodou konečných prvků (Suppe, 1985; Herle, 2003).

### **3.3.2. Analýza rozložení napětí metodou konečných prvků**

Metoda konečných prvků (MKP; anglicky Finite element method) je numerická metoda, která slouží mimo jiné k simulaci průběhů napětí a deformací v daném modelu. Jádrem metody konečných prvků je materiálový (konstituční) model, který co nejlépe charakterizuje hledané aspekty mechanického chování modelovaného materiálu. Mezi nejjednodušší materiálové modely patří např. lineárně elastický izotropní materiálový model či Mohr-Coulombův materiálový model plasticity (Herle, 2003). V rámci metody konečných prvků používané v geomechanice se přitom neuvažují jednotlivá zrna či skalní bloky tvořící modelovaný objekt, ale skalní masiv se považuje za kontinuum. Sestavení matematického modelu metody konečných prvků v geomechanice sestává z následujících kroků:

Nejprve je spojitě kontinuum tvořícího tělo modelu rozděleno (diskretizováno) na konečné množství základních prvků (elementů; ve dvourozměrném problému např. v podobě trojúhelníků, ve třírozměrných úlohách např. v podobě čtyřstěnných či šestistěnných prvků) s uzly tvořícími styčné body sousedících prvků. Všem uzlům jsou předepsány počáteční podmínky tj. hodnoty neznámých hledaných veličin (např. poloha, napěťový tenzor dle materiálového modelu) uvnitř modelovaného objektu na počátku výpočtu – před jeho zatížením; uzlům tvořící okraje modelu jsou napevno předepsány okrajové podmínky. Vnější zatížení je dále převedeno na síly působící v

uzlech prvků. Sestaví se rovnice rovnováhy vnějšího a vnitřního zatížení prvků (na základě materiálového modelu a bilančních rovnic – zákon zachování hybnosti a hmotnosti) a iterativně se hledá takové řešení soustavy zpravidla parciálních diferenciálních rovnic, při kterém jsou vnější a vnitřní síly všech prvků v rovnováze (Herle, 2003).

Klíčové pro analýzu napětí je nejprve definovat geometrii a rozměry modelovaného objektu, v našem případě skalního útvaru nebo fyzikálního modelu v jeho iniciálním, průběžném nebo konečném stavu. Softwarový balík pro geotechnické modelování Plaxis 3D (Brinkgreve et al., 2013), který jsem k výpočtu rozložení napětí využil, obsahuje editor určený k tvorbě geometrie objektu a má také funkci, která umožňuje importovat danou geometrii vytvořenou v softwaru pro 3D projektování a konstruování (CAD) nebo v programech pro tvorbu třírozměrné počítačové grafiky.

Vstupní 3D tvar pro výpočet rozložení napětí v iniciálních fázích dvou zmenšených idealizovaných modelů nabatejské skalní architektury v práci Řihošek et al. (2016) jsem vytvořil podle měření fyzikálních modelů v lomu Střeleč ve volně šířitelném programu Blender (Community, 2018). Tento program slouží především pro modelování třírozměrné počítačové grafiky (Hess, 2010). Stejněho programu jsem využil také pro tvorbu 3D modelů pískovcových arkád v práci Filippi et al. (2018). V této práci jsem vytvořil modely několika různých typových geometií arkád, kdy měly arkády podobu přerušovaného zářezu ve skalní stěně (s přerušovanou horizontální diskontinuitou), podobu vertikálně protažených oválných prohlubní, podobu horizontálně protažených oválných prohlubní a podobu horizontálně protažených oválných prohlubní s rovnými dny.

V pracích Bruthans et al. (2017) a Řihošek et al. (2018) jsem s použitím digitálního fotoaparátu pořídil snímky, z nichž jsem následně sestavil pomocí fotogrammetrického softwaru 3D modely. K zjednodušení jejich geometrie a opravě chyb geometrie jsem využil program Blender.

Tímto způsobem jsem všechny vytvořené 3D vstupní tvary následně importoval do programu Plaxis 3D. Vstupní tvary jsem rozdělil (diskretizoval) na jednotlivé čtyřstěnné prvky tvořící těla modelů.

Úlohy jsem řešil pomocí Mohr-Coulombova materiálového modelu plasticity s parametry odrážejícími chování střelečského pískovce (Řihošek et al., 2016; Řihošek et al., 2018) nebo lineárně elastického izotropního materiálového modelu na základě publikovaných parametrů pískovců (Filippi et al., 2018; Bruthans et al., 2017; Řihošek et al., 2018).

Parametry Mohr-Coulombova materiálového modelu plasticity sestávají z Youngova modulu, Poissonova čísla, soudržnosti a úhlu dilatance. Tyto parametry pro střelečský pískovec byly podloženy různými testy. Na základě testů rychlosti ultrazvukových vln jsem určil Youngův

modul  $E=606,3$  MPa (Rihosek et al., 2016). Úhel vnitřního tření  $\phi=72^\circ$  byl převzat z výsledků triaxiálních testů (Bruthans et al., 2014). Hodnotu soudržnosti jsem odvodil z výsledků triaxiálních zkoušek a testů jednoosé pevnosti v tlaku uvedených v Bruthans et al. (2014) jako  $c=238$  kPa (Rihosek et al., 2016). Hodnoty úhlu dilatace  $\psi=24^\circ$  a Poissonova čísla  $\nu=0,25$  byly odhadnuty (Rihosek et al., 2016).

Numerickým modelům byly předepsány okrajové podmínky určující, které uzly povrchu jsou v prostoru fixované (nulová rychlost ve všech třech souřadnicích prostoru – zpravidla báze modelu), kterým je umožněn pouze vertikální pohyb (nulová rychlost v souřadnicích  $x$  a  $y$  – v některých případech boční strany modelu) a které mají neomezený pohyb („odhalené“ strany modelu).

Na modely byl následně v několika krocích aplikován vliv gravitace, který vyvolal vnější zatížení na uzlech prvků. Podle vnějšího zatížení byly pomocí materiálového modelu a bilančních rovnic iterativně vyrovnány hodnoty vnitřních sil prvků, čímž bylo vypočítáno mechanické napětí v modelech.

Pro ilustraci rozložení napětí v 3D modelech jsem pomocí softwaru Plaxis 3D zkonstruoval řezy zobrazující velikosti a směry maximálního hlavního napětí  $\sigma_1$  v zájmových částech 3D modelů. Takové řezy ukazují ty části pískovcového masivu nebo fyzikálního modelu, které jsou podle teorie napětím řízeného zvětrávání/eroze nejméně náchylné k erozi – s vyššími hodnotami  $\sigma_1$ , a nejvíce náchylné k erozi – nižšími hodnotami  $\sigma_1$  (Rihosek et al., 2016; Bruthans et al., 2017; Filippi et al., 2018; Řihošek et al., 2018).

### ***3.3.3. Numerická simulace eroze pískovcového skalního útvaru***

Abych ověřil využití napětím řízeného zvětrávání/eroze pro simulaci vzniku charakteristických prvků pískovcových skalních útvarů s předpokládaným vlivem mechanického napětí, sestavil jsem numerickou simulaci vzniku pískovcových arkád. Pískovcové arkády jsou nově popsaným povrchovým fenoménem pískovcových stěn a ukloněných povrchů s přítomností planárních diskontinuit. Mají podobu prohlubní seřazených na povrchu pískovcového masivu podél výrazné plochy vrstevnatosti nebo pukliny, navzájem jsou odděleny polosloupky. Jednotlivé prohlubně mohou být nicméně také částečně propojené, a pokud tomu tak je, bývají vzájemně odděleny pískovcovými sloupky v podobě skalních hodin. Jsou projevem kavernózního zvětrávání podobně jako voštiny nebo tafoni, ale liší se svou vazbou na planární diskontinuitu (Filippi et al., 2018).

Pro tvorbu numerické simulace jsem využil geotechnický software Tochnog (Roddeman, 2017). Jedná se stejně jako u softwaru Plaxis 3D o software využívající metodu konečných prvků k analýze napětí v geotechnických modelech. Kód programu je částečně otevřený, takže lze zasáhnout do procedury výpočtu, a pomocí subrutiny podle předepsaného pravidla upravovat během simulace tvar daného útvaru, a tím napodobovat erozi. Samotná simulace v programu

Tochnog byla rozdělena na výpočtové fáze, kdy byl v každé fázi nejprve proveden výpočet rozložení mechanického napětí v modelu metodou konečných prvků, a následně byla spuštěna „erozní“ subrutina.

Vstupní 3D tvar jsem definoval jako hranol s tenkým horizontálním polokruhovitým zářezem simulujícím přítomnou horizontální diskontinuitu. Tento tvar jsem pravidelně rozdělil (diskretizoval) na prvky tvaru kostek, které budou „erozní“ subrutinou během simulace eroze odstraňovány. Odstranění prvku prováděné subrutinou mělo podobu podmínky, kdy jsou odstraněny všechny prvky, které se vyskytují na povrchu modelu, a zároveň u kterých je maximální hlavní napětí  $\sigma_1 < 2$  kPa (2 kPa je hodnota stlačení určená na základě experimentů se střeleckým pískovcem, při které již nedochází k rozpadu tohoto pískovce vlivem slakingu).

Jako materiálový model jsem použil Mohr-Coulombův model plasticity s odhadnutými mechanickými parametry pro zvětralý pískovec. Okrajové podmínky jsem předepsal tak, aby co nejlépe odpovídaly situaci, kdy je modelovaný tvar součástí vertikální stěny masivu. Uzly báze modelovaného tvaru byly zafixovány ve všech třech souřadnicích. Uzly zadní strany modelu směřující do masivu byly zafixovány v souřadnicích x a y, uzly bočních stran modelu byly zafixovány v souřadnicích x, uzly přední strany se zářezem a následně vznikající prohlubně neměly omezený pohyb.

Na model byl následně v několika krocích aplikován vliv gravitace a dodatečného vertikálního zatížení působící na horní část modelu, které odpovídalo zatížení vyvolaného cca 5 m nadloží. Tím bylo navozeno vnější zatížení na uzlech prvků. Podle vnějšího zatížení byly pomocí materiálového modelu a bilančních rovnic iterativně vyrovnány hodnoty vnitřních sil prvků, čímž bylo vypočítáno mechanické napětí v modelu. Poté následovalo první spuštění subrutiny odstraňující nedostatečně stlačené krychlové prvky z odhalené přední strany modelu. V dalších několika fázích se vždy opakoval proces výpočtu mechanického napětí v pozměněné geometrii modelu a odstraňování nedostatečně zatížených prvků, dokud se tvar modelu neustálil ve stavu, kdy u všech prvků modelu bylo hlavní napětí  $\sigma_1 > 2$  kPa, a simulace eroze se tím zastavila. Z průběžných náhledů modelu po každé fázi simulace jsem sestavil animaci ukazující vývoj izolované prohlubně tvořící základní jednotku pískovcové arkádky. Na příkladu řezů zobrazujících rozložení napětí v modelu jsem také prezentoval, ve kterých částech modelu bude probíhat eroze materiálu (Filippi et al., 2018).

## 4. Shrnutí hlavních výsledků

### 4.1. Solné zvětrávací experimenty

Pro zjištění, jestli existuje vztah mezi mírou stlačení a rychlostí rozpadu pískovce a jakou má tento vztah podobu, jsem provedl v laboratoři sérii testů solného zvětrávání. Na stlačených vzorcích krychlí částečně zvětralého pískovce souvrství Umm Ishrin jsem pozoroval rychlost rozpadu těchto vzorků v závislosti na míře jejich stlačení. Na základě těchto experimentů jsem doložil, že mezi stlačením a rychlostí rozpadu pískovce souvrství Umm Ishrin existuje inverzní vztah. Nestlačené vzorky se kompletně rozpadly během 9 a 13 cyklů. Rozpad nestlačených vzorků byl charakteristický postupným zakulacováním původní kostky s tím, jak se v jednotlivých cyklech rozvolňovaly a rozpadávaly povrchové vrstvy pískovcových vzorků.

Stlačené vzorky naproti tomu vydržely více cyklů. Záleželo přitom na míře stlačení. Více stlačené vzorky se rozpadaly obecně pomaleji. Kostky sevřené na počátku experimentu napětím 36, 70, 250 a 680 kPa se rozpadly během 15, 26, 49 a 44 cyklů. Vzorky stlačené mezi dvěma destičkami byly během zvětrávacích cyklů rovněž zaoblovány, na rozdíl od nestlačených vzorků (kulovitý rozpad) však získávaly podobu sloupků.

U vzorků stlačených v ocelových klecích pomocí závitových tyčí a dotažením šroubů momentovým klíčem na počátku experimentu napětím 250 a 680 kPa nebylo možné zaručit stálou sílu sevření během zvětrávacích cyklů. Důvodem byla vysoká tuhost klecí a i jejich malá deformace vlivem tepla při sušení vzorků v kleci mohla vézt k nezanedbatelné změně síly stlačení. Naproti tomu u vzorků stlačených iniciálně 36 a 70 kPa pomocí závaží bylo možné určit nárůst napětí s tím, jak se během experimentu zužoval sloupek tvořený vzorkem. Na konci experimentu tak dosáhla úroveň stlačení vzorků přibližně 150 kPa (u vzorku stlačeného původně 36 kPa) a cca 350 kPa (u vzorku stlačeného původně 70 kPa). Díky měření hmotnosti uvolněného písku jsem byl schopen určit průměrnou mocnost vrstvy zóny vzorku, která v jednotlivých cyklech ze sloupků odpadla. Při grafickém znázornění stlačení oproti mocnosti vrstvy, která v jednotlivých cyklech odpadávala, bylo vidět, že se skupiny bodů pro oba experimenty částečně překrývaly. To naznačilo, že existuje empirický vztah mezi stlačením a rychlostí zvětrávání. Matematická funkce, kterou lze body v grafu proložit, má podobu:

$$\frac{dV_i}{A_i} = R_0 e^{-\alpha \sigma_i}$$

kde  $V_i$  je uvolněný objem písku v daném zvětrávacím cyklu  $i$ ,  $A_i$  je odhalená plocha vzorku (plášť válce tvořící vzorek).  $\frac{dV_i}{A_i}$  tedy odpovídá mocnosti odpadlé zóny pískovce v cm v daném cyklu  $i$ ,  $R_0$  je rychlost zvětrávání za jeden cyklus při sevření tlakem 0 kPa o hodnotě 0,22 cm,  $\alpha$  je

koeficient exponentu o hodnotě  $0,006 \text{ kPa}^{-1}$  a  $\sigma_i$  je napětí v kPa v daném cyklu  $i$ . Pomocí tohoto vzorce lze odvodit, jaká mocnost pískovce odvětrá za jeden cyklus solného zvětrávání s využitím  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  podle metody inspirované normou EN12370 (1999) při dané úrovni stlačení. Vzorec a naměřené hodnoty naznačují, že rychlost zvětrávání prudce roste při nižší míře stlačení a při vyšší míře stlačení klesá ke konstantní hodnotě nebo nule. Experiment neumožnil zjistit konkrétní rychlost zvětrávání při zatížení vyšším než 350 kPa (Rihosek et al., 2016).

Solné zvětrávací experimenty jednoose stlačených pískovcových vzorků (Rihosek et al., 2016) navazovaly na solné zvětrávací experimenty, jejichž výsledky byly publikovány v Bruthans et al. (2014), lišily se nicméně využitím několika různých úrovní zatížení. Navíc byly použity dva různé způsoby zatěžování (stlačování šroubováním a gravitační zatěžování závažím). Navazující dosud nepublikované testy solného zvětrávání s využitím stejné metody jako v Rihosek et al. (2016), které jsem prováděl na různých typech pískovců, ukazují podobný vztah mezi napětím a rychlostí solného zvětrávání. Další směřování výzkumů by mohlo mít podobu experimentů využívající jiný proces zvětrávání/eroze nebo terénního měření, které by ověřilo, zda má tento vztah univerzální platnost. Cílem takových výzkumů by také bylo nalézt reálné parametry pro daný proces zvětrávání/eroze, prostředí a litologii, které by lépe definovaly rychlost zvětrávání/eroze vyjádřenou v rychlosti ústupu skalní stěny za jednotku času. Pro fasády nabatejských hrobek a dalších architektonických prvků byly stanoveny rychlosti ústupu stěn v rozsahu  $0\text{--}0,350 \text{ mm}\cdot\text{rok}^{-1}$  (Paradise, 1995; Paradise, 2002; Paradise, 2013; Heinrichs, 2008), přičemž jako zvětrávací/erozní procesy byly uvažovány solné zvětrávání, eroze proudící vodou během dešťových průtrží, bobtnání vlivem vlhkosti a insolace (Wedekind a Ruederich, 2013; Paradise, 2002; Heinrichs, 2008). Zde se jedná o značně nerovnoměrně distribuované kavernózní zvětrávání, přičemž velký vliv mají také vlastnosti (např. porozita) a složení daného pískovce (Paradise, 1995; Heinrichs, 2008). Ke studiu vlivu napětí na rychlost zvětrávání/eroze v terénu by tedy bylo nutno nalézt takovou lokalitu, kde je stejně jako v Petře možné odhadnout původní tvar skalního útvaru v minulosti, a kde by za zvětrávání/erozi byl zodpovědný, pokud možno jeden v čase neproměnný, rovnoměrně distribuovaný proces.

Na základě výsledků testů solného zvětrávání lze předpokládat, že, stejně jako u pískovců souvrství Umm Ishrin, je i rychlost zvětrávání/eroze některých dalších pískovců závislá na velikosti jednoosého stlačení, přičemž více stlačená hornina se rozpadá pomaleji. Pískovec Umm Ishrin tedy vykazuje podobné chování jako vzorek krychle ze střelečského pískovce, který se vlivem slakingu po ponoření do vody rozpadal do podoby sloupu, jehož tloušťka byla nepřímou úměrná hmotnosti závaží, jakým byl tento vzorek zatížen (Bruthans et al., 2014). Fyzikální modely nabatejské architektury vybudované ze střelečského pískovce podrobené kontrolovanému procesu eroze (kropení vodou; viz níže) tedy mohou být použity pro simulaci zvětrávacích/erozních procesů, kterými jsou vystaveny památky v Jordánské Petře, čemuž se



věnuje odpovídající oddíl následující podkapitoly (Zvětrávání a eroze nabatejské skalní architektury).

#### **4.2. Tvorba fyzikálních modelů a numerická analýza napětí**

Výsledky fyzikální simulace zvětrávání/eroze útvarů vytvořených ze střelečského pískovce metodou kroupení jsem kombinoval s výsledky numerického výpočtu rozložení napětí v těchto útvarech, abych ověřil předpoklady predestřené v práci Bruthans et al. (2014), a to, že k erozi dochází přednostně tam, kde pískovec není stlačen působením gravitace na hmotu pískovce. Pokud je tedy erozi vystaven fyzikální model, jehož tvar způsobuje nepravidelné rozložení mechanického napětí, bude preferenčně docházet k erozi v zónách sníženého napětí, zatímco zóny zvýšeného napětí budou erozi lépe odolávat. Pouze v práci Bruthans et al. (2017) jsem fyzikální model nevytvořil, protože u daného převisu v Plzni, který je tvořen arkózami, byla monitorována rychlost eroze na vybraných profilech.

##### **4.2.1. Zvětrávání a eroze nabatejské skalní architektury**

Abych zjistil, jakým způsobem probíhá eroze zmenšených modelů nabatejské skalní architektury a zda lze tímto způsobem simulovat procesy zvětrávání/eroze postihující reálné historické pískovcové památky, vytesal jsem v ukloněné stěně pískovce v lomu Střeleč dva modely nabatejských staveb, které jsem následně podrobil erozi kroupením vodou. Modely měly podobu skalního obydlí s oknem a skalního obydlí tvořeného dvěma kvádrovými dutinami, přičemž každý z modelů pokrýval plochu v řádu několika čtverečních decimetrů pískovcového povrchu. Získaná dokumentace vývoje fyzikálních modelů nabatejské skalní architektury kontrolovaně skrápěných vodou mi posloužila k identifikaci struktur a tvarů, které jsou náchylné k erozi.

Obecně lze konstatovat, že po aplikaci kroupení byly nejprve relativně rychle zaobleny exponované hrany modelů. To se týkalo zejména pilířů čtverhranného průřezu, které získaly podobu sloupů oválného průřezu. Střední části překladů a zárubní obdélníkových a čtverečných průzorů (např. „oken“ a „dveří“) byly rovněž rychle erodovány, takže otvory získaly oválný tvar. Pokud byla přítomna skrytá puklina, byla eroze podél ní výraznější. Po erodování zúžených sloupů došlo ke zrychlené erozi těch částí modelu, které byly těmito sloupy podpírány. Na vývoji mocnosti sloupů podpírajících části (stropy) modelů bylo možné sledovat, jak reagují na úbytek hmoty ve svém nadloží. Po rychlém zaoblení původně čtverhranných pilířů se jejich eroze dočasně zpomalila a urychlena byla až ve chvíli, kdy byla erodována masa horniny, která tyto pilíře zatěžovala.

Průběžné a výsledné tvary modelů ze střelečského pískovce dobře odpovídají pozorovaným tvarům skalní architektury v Jordánské Petře. Zvláště blízké jsou tvarům poškození skalních obydlí a hrobek, které byly díky své expozici na okrajích masivů vystaveny výraznějšímu zvětrávání a erozi (Rihosek et al., 2016).

Numerické analýzy určily rozložení mechanického napětí v iniciálních tvarech fyzikálních modelů nabatejské skalní architektury Jordánské Petry. Zóny zvýšeného maximálního hlavního napětí  $\sigma_1$  byly lokalizovány na konkávních rozích a hranách modelů jako například v rozích obdélníkových otvorů. Naopak nejnižší hodnota  $\sigma_1$  byla pozorována v horních částech modelů („střecha“) zvláště pak tam, kde vyčnívaly konvexní rohy a hrany, a dále v prostorech nad obdélníkovými otvory, kde měl „tlakový stín“ podobu oblouku. Lokalizace nejintenzivnější eroze prostorově úzce korelovala právě s nižšími hodnotami  $\sigma_1$ . Nejintenzivnější eroze těchto částí modelů vedla k zaoblování konvexních částí modelu. Vyšší odolnost před erozí vykazovaly také čtverhranné pilíře, kde byly lokalizovány vyšší hodnoty  $\sigma_1$  (Rihosek et al., 2016).

Numerické analýzy napětí v iniciálních tvarech fyzikálních modelů poskytly předpověď, které části fyzikálních modelů budou v prvních fázích procesu eroze odstraněny, a tato předpověď dobře souhlasila s pozorováním. To lze označit za relativně robustní důkaz správné identifikace faktoru, který určuje, které části dané geometrie budou erodovány – tedy intenzity pole mechanického napětí. Nicméně převážná většina nabatejských památek je postižena selektivním a kavernózním zvětráváním, které je řízené také koncentrací solí, nahromaděním vlhkosti, stupněm oslunění či litologickou variabilitou dané stavby (Wedekind a Ruederich, 2013; Paradise, 2002; Heinrichs, 2008). Charakter poškození, který byl nasimulován kropením fyzikálních modelů, byl pozorován pouze na těch nejexponovanějších architektonických objektech, přičemž ne vždy je možné s jistotou určit, jaký byl jejich původní tvar.

#### **4.2.2. Rychlý ústup stěny arkózového převisu (Plzeň)**

Arkózový převis Čertova kazatelna se nachází v městském obvodu Plzeň 7 – Radčice. Tento převis je významný díky velmi rychlému ústupu stěny vlivem prosakující vody z kanalizace. K opadu velkého množství materiálu dochází převážně v zimních měsících. K zrychlenému ústupu masivu zde dochází již přibližně 35 let, přičemž jeho rychlost byla monitorována po dobu přibližně 27 měsíců mezi prosincem 2012 a březnem 2015. Bylo zjištěno, že rychlost ústupu stěny na tomto výchoze se pohybuje od jednotek milimetrů za rok až po 31 mm za rok. Rychlost zvětrávání a eroze je tedy vlivem antropogenních podmínek přibližně 2000krát vyšší než na výchozech bez antropogenního vlivu a lze ji proto měřit a porovnat s rozložením napětíového pole.

Na rozdíl od simulace zvětrávání/eroze zmenšených fyzikálních modelů budovaných ze střelečského pískovce se v tomto případě jedná o analýzu rozložení napětí v reálném skalním útvaru, která slouží k pochopení, proč určité části převisu ustupují rychleji, než jiné. V této práci jsem pro získání věrné geometrie komplikovaného tvaru převisu pro numerickou analýzu rozložení napětí použil metodu fotogrammetrie.

Řezy numerického modelu v arkózovém převisu v Plzni, jehož geometrii jsem vytvořil na základě fotogrammetrických snímků, ukázaly, že nejvyšší hodnoty maximálního hlavního napětí  $\sigma_1$  ( $> 150$  kPa) jsou lokalizovány v nejzazší části stěny převisu, naproti tomu nejnižší hodnoty  $\sigma_1$ , které odpovídají až tahovým podmínkám ( $-10$  až  $+50$  kPa), byly vysledovány v nejvíce vybíhající části převisu. V zadní části převisu byly změřeny relativně nízké rychlosti ústupu masivu (cca  $4 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ ), zatímco nejrychlejší ústup masivu (až  $31 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ ) byl vysledován právě v nejvíce vybíhající části, kde se hornina dostává do podmínek tahu (Bruthans et al., 2017).

#### **4.2.3. *Vznik a vývoj pískovcových arkád***

V práci zaměřené na popis nové formy kavernózního zvětrávání pískovcových stěn – pískovcových arkád – jsem v lomu Střeleč vytvořil fyzikální modely simulující vznik tohoto fenoménu za účelem potvrzení jeho strukturní vazby na planární diskontinuitu a kontrolní roli napětí, které řídí tvar a velikosti jednotlivých prohlubní a polosloupků, jež tvoří pískovcové arkády.

V první verzi fyzikální simulace vzniku arkád jsem skrápěl vertikální stěnu s přítomností přirozeného subhorizontálního zvrstvení. Výsledkem byla rychlá eroze povrchu stěny, přičemž během několika minut skrápění vzniklo několik desítek půlměsícovitých prohlubní podél mezivrstevních ploch, které oddělovaly drobné sloupky. Poté se eroze prakticky zastavila, ačkoliv skrápění pokračovalo. Takové pozorování naznačuje, že vznik arkád může být velmi rychlý, avšak výsledné tvary mohou po značnou dobu přetrvávat.

V druhé a třetí verzi fyzikální simulace vzniku skalních arkád byl vodou skrápěn uměle vytvořený průběžný a přerušovaný zářez ve skalní stěně. Výsledkem u obou verzí byl vznik skupiny seřazených prohlubní na místě původních zářezů. Tyto prohlubně byly navzájem odděleny polosloupky. Zpočátku byla eroze preparující arkády značně rychlá, načež se zpomalovala. Přestože byla následná eroze pomalejší, docházelo díky erozivnímu ústupu polosloupku sporadicky k erozi větších částí jeho nadloží a podloží. Eroze skrápěním postihovala především části masivu v napěťovém stínu (části masivu nepřenášející zatížení) a zachovány byly ty části masivu, kam se průběžně během eroze povrchu koncentrovalo napětí (Filippi et al., 2018). Mezivrstevní plocha tvoří přirozené mechanické přerušení homogenního masivu a na jejím průniku s vertikální skalní stěnou dochází k redistribuci napětí.

Význam relativně tenkých horizontálních vložek hornin odlišných mechanických vlastností („critical partings“) pro vznik stupňovitého reliéfu pískovcových oblastí v Utahu zdůraznil Oberlander (1980). Tyto vložky mají tedy roli diskontinuity, jejíž vliv zásadně ovlivňuje utváření pískovcové krajiny. Mezivrstevní plocha či puklina má také roli diskontinuity, která nicméně ovlivňuje pískovcový masiv v menším rozsahu, důsledkem tohoto vlivu je nicméně vznik například pískovcových arkád.

Numerické analýzy rozložení napětí v několika typech skalních arkád ukazovaly lokalizaci zvýšeného maximálního hlavního napětí  $\sigma_1$  a lokalizaci sníženého maximálního hlavního napětí  $\sigma_1$ . Zatímco zvýšené  $\sigma_1$  se vyskytovalo ve středních částech polosloupků skalních arkád a v jejich zadních stěnách, nejnižší  $\sigma_1$  bylo pozorováno v podobě vybíhajících oblouků „tlakových stínů“ nad a pod zářezy v modelu s přerušovanou horizontální diskontinuitou, stejně jako nad a pod prohlubněmi modelů s horizontálně protaženými prohlubněmi. Výjimkami byl model s vertikálně protaženými prohlubněmi, kde byl rozsah „tlakového stínu“ nad a pod prohlubni značně omezen, a model horizontálně protažených oválných prohlubní s rovnými dny, kde byl „tlakový stín“ nad prohlubni výrazně menší než tlakový stín vyvinutý pod rovným dnem. Modely rozložení napětí na modelu se zářezem a na několika typech arkád tedy ukázaly, že přítomnost horizontální diskontinuity vede k takovému přerozdělení napětí, které napomáhá vzniku těchto útvarů s relativně odolnými polosloupky a prohlubni vyrovnaných podél diskontinuity a že z hlediska napětíového rozdělení budou nejvíce stabilní ty arkády, jejichž prohlubně jsou vertikálně protažené (Filippi et al., 2018).

Kromě numerického výpočtu rozložení napětí jsem také provedl numerickou simulaci erozního průběhu vzniku prohlubně arkády, která potvrdila předpoklady rozšíření původního horizontálního zářezu směrem vzhůru a dolů, kde vznikly klenby. Jedná se o evoluční model, protože po odstranění všech nezátížených kubických prvků z povrchu dochází k přepočítání napětí v celém modelu. V důsledku toho se rozložení napětí mezi jednotlivými kroky mění, jak je vidět na příčných řezech modelu v jednotlivých krocích. Odstraňování prvků se spontánně zastavilo, jakmile hodnota maximálního hlavního napětí  $\sigma_1$  dosáhla předepsané úrovně ve všech odhalených prvcích (po deseti krocích). Na začátku byla nejvyšší hodnota  $\sigma_1$  koncentrována v zadní stěně zářezu modelu a nejnižší hodnoty  $\sigma_1$  ( $< 2$  kPa) byly situovány v zónách nad a pod zářezem (jedná se o stejný výsledek jako u numerického výpočtu rozložení v modelu se zářezem). Výsledkem posledního kroku výpočtu byla prohlubeň, v jejímž okolí již nebyly přítomny zóny snížených hodnot maximálního hlavního napětí  $\sigma_1$  (Filippi et al., 2018).

Numerické simulace napětím řízené eroze jako první publikoval Ostanin et al. (2017). Tyto simulace, které využívaly princip negativní zpětné vazby mezi napětím a erozí (Bruthans et al., 2014) byly zaměřeny především na vznik skalních bran a skalních věží. Numerická simulace publikovaná v Filippi et al. (2018) vysvětlila vznik nově rozeznávaného prvku pískovcových stěn. K simulaci byl přitom použit běžný software pro geotechnickou analýzu. Numerická simulace vzniku pískovcových arkád a sloupků v práci Safonov et al. (2020) zdokonalila předchozí simulace předepsáním jiné úrovně kritického napětí pro horizontální diskontinuitu (diskontinuita je tedy tenký a snáze erodovatelný planární útvar), čímž se autoři vyhnuli nutnosti zadávat diskontinuitu jako prázdného prostoru, ale spíše jako materiál kontrastních mechanických vlastností, které jsou způsobeny například odlišnou litologií. Zajímavé výsledky numerické

simulace zvětrávání poskytla bakalářská práce V. Cimbury, kde byla numerická geomechanická simulace postavená na materiálových parametrech nahrazena jednodušší simulací, u níž byla hornina složena z voxelů o předepsané „odolnosti proti zvětrávání“. Iniciální tvar byl složen z vrstev voxelů a každá vrstva měla vlastní předepsaný rozsah odolností proti zvětrávání. Každému voxelu dané vrstvy byla poté náhodně přidělena hodnota odolnosti v rozsahu určeném konkrétní vrstvě. Zjednodušený model dále zahrnul i vliv napětí zpomalující erozi a efekt snižování odolnosti voxelů podle míry jejich expozice na povrchu modelu. Přestože tento přístup nedovolil zohlednění laterálního přenosu napětí a nebyl ani postaven na přírodě blízkém materiálovém modelu, výsledné grafické výstupy byly blízké přírodním tvarům (Cimbura, 2020).

#### **4.2.4. *Vznik a vývoj skalních bran***

Pro simulaci vzniku a vývoje skalní brány zvětráváním a erozí, jsem využil metodu skrápění iniciálního tvaru vymodelovaného z pískovce v lomu Střeleč vodou. Iniciální tvar měl podobu úzkého bloku střelečského pískovce s horizontálním zářezem, který tento blok příčně protínal. Postupným skrápěním vodou pomocí kropicí konve jsem vytvořil dokonalou zmenšeninu skalní brány, jejíž tvar odpovídal skalním branám, s jakými bychom se mohli setkat v přírodě.

Horní strana iniciálního tvaru byla erodována hlavně dopadajícími kapkami, ve spodní části modelu byla eroze kapkami doplněna i erozí stékající vodou. Části kryté před dopady kapek překladem budoucí brány byly omezeně erodovány stékající vodou. Povrchová struktura pískovce byla erozí narušována, přičemž se rozpadala na jednotlivá zrna. V části překladu brány, která byla v převisu, bylo přítomno i tahové odlupování šupin. Na základě analýzy obrazové dokumentace tvarových změn byly stanoveny tři vývojová stádia skalní brány – iniciální stádium, vyvrálost a degradace. Během iniciálního stádia byly erodovány především masiv po levé a pravé straně budoucí brány. Byl také ztenčen překlad budoucí brány – místo kde následně vznikala oblouk skalní brány. Stádium vyvrálosti charakterizovalo zpomalení eroze, která přitom postihovala rovnoměrně všechny povrchy modelu. Ve stádiu degradace došlo k urychlení eroze oblouku brány, který byl zrychleně ztenčován, až do okamžiku jeho kolapsu. Vývoj brány byl zachycen v 95 erozních krocích, přičemž jeden erozní krok představovalo vyprázdnění dvou objemů kropicí konve. Prvních 40 erozních kroků odpovídalo iniciálnímu stupni vývoje, dalších 45 kroků odpovídalo stupni vyvrálosti a posledních 10 kroků odpovídalo stupni degradace. Z řezů zkonstruovaných na základě fotogrammetrických 3D modelů vyplynulo, že oblouk brány byl výrazněji ztenčován ze své frontální strany a hmota oblouku se během eroze posouvala směrem k zadní straně modelu. Eroze oblouku byla kontrolována mocností pískovce při bázi obou křídel brány. Ve chvíli, kdy byla erozí odstraněna tato báze, se eroze více lokalizovala v horní části oblouku. Zatímco samotný oblouk během kropení erodoval relativně stálou rychlostí, a ta se zvýšila až v posledních cca 10 krocích, pro okolí oblouku platilo, že zde byla eroze nejrychlejší především na počátku kropení a postupně se tato rychlost zpomalovala (Řihošek et al., 2018).

Numerické modely rozložení napětí jsem vytvořil pro iniciální a konečný tvar (před zřícením oblouku) fyzikálního modelu brány ze střelečského pískovce a pro skalní bránu Landscape Arch v Národním parku Arches v USA. K tvorbě geometrií modelů jsem využil fotogrammetrii. Pořízené vertikální podélné řezy zobrazily distribuci hodnot maximálního hlavního napětí  $\sigma_1$  v těchto objektech a umožnily jejich vzájemné porovnání. V modelu rozložení napětí v iniciálním tvaru fyzikálního modelu byly nejvyšší hodnoty maximálního hlavního napětí  $\sigma_1$  koncentrovány v rozích horizontálního zářezu a zvýšené  $\sigma_1$  vytvářely oblouk nad tímto zářezem. Nejnižší hodnoty  $\sigma_1$  byly naopak situovány mezi zářezem a zónou zvýšených hodnot  $\sigma_1$  tvořícího oblouk. Zde hodnoty  $\sigma_1$  dosahovaly až záporných hodnot, značících podmínky tahu.

Model konečného tvaru fyzikálního modelu, kde byla již brána vypreparovaná, byl tvořen obloukem pískovce, ve kterém převažovaly zvýšené hodnoty  $\sigma_1$ . Rozložení napětí v tomto modelu bylo shodné s rozložením napětí v modelu Landscape Arch. Nejvyšší úroveň tlaku a tlakové gradienty jsou situovány v místech, kde oblouk přechází v okolní skalní masiv, a v nejtenčích částech obou bran. Oba modely se liší maximální velikostí  $\sigma_1$  (u Landscape Arch je jeho hodnota 333 krát vyšší), což především odráží značně odlišnou velikost obou útvarů. Rozpětí modelované brány bylo 0,35 m a rozpětí brány Landscape arch je 93 m (pozn. v článku Řihošek et al. (2018) je na Obr. 4 chybně vyneseno měřítko naznačující rozpětí brány Landscape arch cca. 300 m). Dalším rozdílem je méně pravidelné rozložení napětí v modelu Landscape Arch, což plyne z jeho méně pravidelné geometrie. Severozápadní křídlo Landscape Arch je ztenčené (jedná se o místo nedávného řízení pískovcových bloků) a zde je i nevyšší hodnota  $\sigma_1$ , zatím co v mocnějším jihovýchodním křídle je  $\sigma_1$  nižší (Řihošek et al., 2018).

Eroze oblouku kontrovaná mocností jeho báze a přesun eroze vzhůru souhlasí s pozorováním propagace eroze podél obloukových puklin v důsledku tahových sil, které v oblouku dominují, což bylo pozorováno v pískovcích souvrství navajo v Národním parku Zion v USA (Robinson, 1970). Experiment prokázal, že pro vznik brány jsou dostačujícími předpoklady materiál, jehož zvětrávání/eroze je řízena polem mechanického napětí, existence horizontální nebo ukloněné diskontinuity a tenký blok exponované horniny, kterou tato diskontinuita protíná. Podle práce Cruikshank a Aydin (1994) je důvod vysoké koncentrace skalních bran v Národním parku Arches v USA asociován s výskytem vertikálních paralelních puklin, které vytvářejí úzké hřbety, a puklinových zón, které místy tyto hřbety horizontálně protínají. Popis vývoje našeho nejznámějšího skalního oblouku – Pravčické brány – podle Vařilové et al. (2015) a Vařilové (2016) rámcově odpovídá pozorovanému vývoji fyzikálního modelu. Vznik Pravčické brány je vysvětlován prohlubováním převisů vyvinutých v úrovni slepencového horizontu na protilehlých stěnách úzkého výběžku pískovce. Procesy prohlubování jsou selektivní eroze a zvětrávání. Po propojení převisů byl otvor brány postupně rozšiřován podél obloukových puklin vzniklých v důsledku rozložení mechanického napětí v masivu brány. Identifikované vývojové stupně

fyzikálního modelu v hrubých rysech rovněž odpovídají vývojovým stupňům Pravčické brány podle Vařilové et al. (2015; klasifikace podle The Natural Arch and Bridge Society).

Vznik zmenšené skalní brány jednoduchým způsobem za pomoci simulace erozního činitele kropením materiálu tvořeného střeleckým pískovcem dokládá užitečnost tohoto materiálu pro fyzikální modelování skalních útvarů.

Ztenčování oblouku brány je výsledkem dříve popsáno efektu negativní zpětné vazby mezi napětím a erozí (Bruthans et al., 2014), což jsem na numerických modelech doložil průběžným přesunem nejvyšších hodnot  $\sigma_1$  do oblouku, který během eroze zůstává zachován, zatímco eroze více postihuje ty části povrchu, které mají nižší hodnoty  $\sigma_1$ .

K hlubšímu pochopení procesu vzniku a vývoje skalních bran by dopomohlo sledování vzniku a zániku bran na litologiích snadno podléhajících erozi s vlastnostmi podobnými střeleckému pískovci. Dobrým příkladem je rychlý vznik, vývoj a zánik skalní brány La Damme Blanche v blízkosti města Dieulefit ve Francii, kde celý proces vzniku a zániku brány v jílovitých pískovcích trval cca 5 let. Budoucí výzkum by se také mohl zaměřit na vlastnosti pískovců, ve kterých je častý výskyt skalních bran. Nejdůležitějším parametrem by přitom byla rychlost a charakter zvětrávání či eroze vyvolaných kontrolovaným procesem při různých mírách stlačení. Numerická analýza napětí se osvědčila jako vhodná metoda pro zhodnocení stability a stupně vývoje skalní brány. Přítomnost zvýšených gradientů a zón snížených napětí v bráně mohou ukazovat na místa minulého nebo potenciálního budoucího skalního říčení.

V práci Ostanin et al. (2017) byly vytvořeny numerické simulace vzniku skalních bran, které využívaly princip negativní zpětné vazby mezi napětím a erozí (Bruthans et al., 2014). Tyto simulace využívaly lineárně elastický izotropní materiálový (konstituční) model, stejně jako numerický model výpočtu napětí v Landscape Arch a hodnotu kritického napětí, nad kterou již nedochází k erozi. Z výsledků Rihosek et al. (2016) nicméně plyne, že rychlost zvětrávání/eroze klesá spojitě se vzrůstajícím napětím podle určité funkce a že neexistuje jedna hodnota, nad kterou již k zvětrávání/erozi nedochází. Navíc při vysokých tlacích dochází k změnám ve struktuře pískovce a při překročení pevnostní obálky materiálu k jeho porušení. Z toho plyne, že numerickým simulacím eroze řízené napětím do této chvíle chybí schopnost věrně napodobovat erozní procesy a chování materiálu při překročení jeho pevnostní obálky. Tyto oblasti lze tedy označit za slibné pro směřování budoucích výzkumů.

## 5. Závěry

Závislost rychlosti zvětrávání a eroze na mechanickém napětí se může projevat i na architektonických památkách vytesaných v pískovci. Znázornění napětového pole může pomoci identifikovat části stavby či skalního útvaru, které jsou ohroženy vyššími rychlostmi zvětrávání a eroze. Jsou jimi ty exponované části, které mají oproti ostatním částem geometrie nízké úrovně tlakového napětí nebo jsou tahově namáhány. Ohroženy jsou nicméně také ty části, ve kterých je napětí extrémně zvýšené do té míry, že dochází k jeho porušování vlivem nadměrného namáhání materiálu (např. na některých částech oblouků velmi úzkých skalních bran).

Mezi velikostí jednoosého stlačení pískovcového vzorku a rychlostí jeho solného zvětrávání existuje matematický vztah podoby negativní exponenciální funkce. Lze očekávat, že takovou formu může mít i závislost mezi napětím a rychlostí zvětrávání či eroze, které jsou vyvolané jiným procesem než solnou krystalizací – například mrazovým zvětráváním, pipingem či sappingem.

Na fyzikálních modelech nabatejské architektury, pískovcových arkád a pískovcových skalních bran byl prověřen způsob simulace zvětrávání/eroze využívající kropení. U pískovcových arkád a skalních bran byly prověřeny předpoklady, které vedou k jejich vzniku. Pískovcové arkády se utvářejí v důsledku přítomnosti mechanické nehomogenity ve skalní stěně, přičemž tato nehomogenita nemusí být nutně horizontální (tyto tvary byly popsány i na ukloněných puklinách). Jejich vznik může být relativně rychlý, přičemž následně se eroze povrchu může zpomalit a tyto tvary tak mohou být stabilizovány vzniklou redistribucí napětí po velmi dlouhá období. U skalních bran byly definovány minimální předpoklady pro jejich vznik – tj. existence úzkého bloku horniny s horizontální či ukloněnou diskontinuitou či oslabenou vrstvou. Tato oslabená vrstva má za následek vznik oblouku vyšších tlakových napětí uvnitř masivu, které brání erozi, oproti tahovým stínům, ve kterých je eroze primárně lokalizovaná. Díky simulaci eroze byla také dokumentována tři stadia vývoje skalní brány, která se liší lokalizací a rychlostí zvětrávání či eroze – iniciální stádium, stádium vyzrálosti a stádium degradace.

K simulaci vzniku a vývoje pískovcových útvarů (skalních arkád) byl využit 3D numerický model využívající principy mechanickým napětím řízené eroze. Tato simulace vedla ke vzniku stabilního výsledného tvaru. Jeho utváření bylo řízeno rozložením napětí (maximálního hlavního napětí) a mechanickými vlastnostmi materiálu, z nichž pro proces vzniku bylo nejdůležitější tzv. kritické napětí. Exponované části tvořící model (elementy), jejichž maximální hlavní napětí bylo nižší než kritické napětí, byly postupně odstraněny. U konečného tvaru splňovaly všechny exponované elementy podmínku, že jejich maximální hlavní napětí bylo vyšší než kritické napětí.



## 6. Seznam článků autora, jejich komentáře a autorký přínos

### 6.1. Článek 1

Rihosek J., Bruthans J., Masin D., Filippi M., Carling G. T., Schweigstillova J. (2016) Gravity-induced stress as a factor reducing decay of sandstone monuments in Petra, Jordan. *Journal of Cultural Heritage* 19: 415–425. IF=2,224

Práce je zaměřena na studium zvětrávání a eroze nabatejských hrobek v Petře v Jordánsku a vliv napětí horninového masivu na rychlost rozpadu kambro-ordovických pískovců souvrství Umm Ishrin a Disi, do kterých jsou tyto hrobky vytesány. Pískovcové hrobky v okolí starověkého města Petra v Jordánsku jsou již přibližně 2000 let vystaveny klimatickým vlivům a solnému zvětrávání, díky čemuž na jejich površích vznikají např. tafoni, škrapy či voštiny.

Zvětrávací a erozní procesy v průběhu času na mnohých místech značně pozměnily tvar památek. Hrany silným zvětráváním ovlivněných hrobek jsou zaoblovány, podobně jsou měněny tvary původně obdélníkových otvorů a nik. Některé části hrobek získaly díky zvětrání a erozi vzhled přírodních tvarů, jako jsou například sloupky, skalní brány či skalní okna, jež se vyskytují jako přirozeně vzniklé formy v okolí historické lokality. Ve výjimečných případech byla původní architektura hrobek dokonce zcela zastřena. Tvary jako brány a sloupky vzniklé na zvětralých hrobkách nesou významnou podobnost s tvary vzniklých v materiálech, jejichž zvětrávání a eroze je řízena tlakem a u kterých lze nalézt zápornou zpětnou vazbu mezi napětím a zvětráváním či erozí.

Z terénních pozorování se zdálo, že pískovce Umm Ishrin a Disi patří do kategorie materiálů se zvětráváním/erozí řízenou napětím. Pro ověření této hypotézy jsem prováděl solné zvětrávací experimenty na vzorcích tvaru krychle z pískovce Umm Ishrin. Čtyři vzorky byly jednoosé zatíženy čtyřmi stupni zatížení (36 kPa, 70 kPa, 250 kPa a 680 kPa), zatímco dva vzorky byly ponechány nezatíženy. Na získaných výsledcích jsem ilustroval, že nezatížené vzorky se rozpadaly nejrychleji a méně zatížené vzorky se rozpadaly rychleji než ty více zatížené.

Cílem dalšího experimentu bylo vytvořit zmenšené fyzikální modely hrobek ve snadno erodovatelném materiálu, jehož eroze se řídí napětím, a pozorovat, zda eroze bude vytvářet podobné tvary jako na zbytcích hrobek v Petře po 2000 letech povětrnostních vlivů. Takovým materiálem je střelečský pískovec. Dva modely skalních hrobek jsem vytesal *in situ* v lomové stěně lomu ve Střelči tak, aby postihly některé prvky složité morfologie nabatejských hrobek, jako jsou pravoúhlé místnosti a otvory, sloupy, a vertikální fasády. Tyto modely jsem po důkladné fotodokumentaci v několika krocích podrobil rovnoměrné erozi navozené kropením vodou. Měňící se tvar modelů jsem průběžně dokumentoval fotograficky ze stativu. Modely během eroze

postupně získávaly vzhled zvětralých hrobek. Jejich pravoúhlé tvary jako otvory a sloupky byly zaoblovány, ztenčování sloupků bylo rychlejší, pokud sloupky nebyly zatíženy. Modely prokázaly, že rychlost ústupu pískovce na stejně exponovaných částech nebyla rovnoměrná, vyšší rychlosti ústupu byly pozorovány na částech, které nebyly výrazně zatíženy tlakem, jež by efektivně bránil erozi. Proces eroze fyzikálních modelů umožnil simulaci 2000 let trvajícího zvětrávání/eroze hrobek v Petře v krátkém čase.

Pro ověření platnosti výše popsaných fyzikálních modelů jsem vytvořil numerické simulace rozložení napětí. Iniciální tvary fyzikálních modelů jsem vytvořil v programu Blender. Na základě těchto 3D tvarů jsem poté vybudoval numerické modely pro analýzu rozložení maximálního hlavního napětí v geotechnickém softwaru Plaxis 3D. Vstupními parametry pro numerickou analýzu byly známé hodnoty mechanických parametrů střelečského pískovce a Mohr-Coulombův materiálový model. Napětí v modelu bylo následně generováno postupným gravitačním zatěžováním až do úrovně přirozeného gravitačního zrychlení. Numerické simulace rozložení napětí ukázaly, že maximální hlavní napětí dosahuje nejvyšších hodnot ve vnitřních rozích pravoúhlých otvorů 3D modelů, střední hodnoty napětí jsou lokalizovány ve sloupcích a vertikálních stěnách modelu a minimální hodnoty maximálního hlavního napětí jsou lokalizovány nad překlady otvorů a ve vnějších rozích modelů díky efektu kleneb. Numerická simulace rozložení napětí tedy správně predikuje výsledky fyzikálních modelů, přičemž ukazuje tvorbu kleneb tvořených vyšším maximálním hlavním napětím, a tím předpovídá celkové zaoblování fyzikálních modelů během eroze. Zaoblení fyzikálního modelu pak vede k více rovnoměrně rozloženému napětí v klenbových strukturách, které jsou relativně více odolné proti erozi, díky čemuž je eroze více rovnoměrná a relativně pomalejší.

Výsledky studie ukazují, že člověkem vytvořené stavby tesané v pískovcovém masivu mohou během 2000 let vlivem zvětrávání a eroze nabývat forem podobných přírodním útvarům, jako jsou skalní sloupky, skalní brány, skalní okna a převisy. Studie dále dokazuje, že pískovec ze souvrství Umm Ishrin lze řadit mezi materiály, jejichž zvětrávání/eroze jsou řízené napětíovým polem navozeným gravitací, stejně jako je tomu u střelečského pískovce. Článek je významný využitím principu popsaného jako negativní zpětná vazba mezi napětím a erozí pro pochopení zvětrávacích/erozních procesů významných architektonických a kulturních památek. Toto v kombinaci s využitím střelečského pískovce pro tvorbu zmenšených fyzikálních modelů nám dalo příležitost simulovat několik staletí dlouhý proces zvětrávání a eroze pískovce během doslova několika minut. Ve studii bylo naznačeno, že principy, které byly popsány v článku Bruthans et al. (2014), tak mohou být využity pro řešení reálné problematiky v aplikovaném výzkumu.

*U článku vystupuji jako hlavní autor. Pro článek jsem tvořil a dokumentoval fyzikální zmenšené modely a tvořil numerické modely. Designoval a prováděl jsem laboratorní měření solného zvětrávání a analýzu jejich výsledků. Se spoluautory jsem napsal text článku. Vytvořil jsem video zaznamenávající proces eroze fyzikálních modelů, které je součástí přílohy článku.*

## 6.2. Článek 2

**Bruthans J., Filippi M., Schweigstilllová J., Řihošek J. (2017) Quantitative study of rapidly weathering overhang developed in an artificially wetted sandstone cliff. Earth Surface Processes and Landforms 42: 711–723. IF=3,722**

Článek je zaměřen na studium převisu nacházejícího se ve skalním defilé karbonských arkózových pískovců až slepenců (kladenské souvrství, nýranské vrstvy) na lokalitě Čertova kazatelna v Plzni-Radčicích. Tento převis byl pro studium vybrán kvůli zjevným projevům rychlého ústupu stěny v porovnání s okolním masivem, což se projevuje značnou akumulací opadlého materiálu v podobě šupin horniny pod tímto převisem. Rychlost depozice materiálu je odhadovaná na  $50 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ , naznačující rychlé zvětvávání/erozi, zatímco rychlost ústupu stěn v okolí tohoto převisu zřejmě nedosahuje ani  $0,01 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Rychlost ústupu stěny v převisu je dle odhadu minimálně 2000krát vyšší než v okolí.

Studovaný převis zároveň představuje jediné místo lokality s výraznými projevy prosakující vody, jako je zvýšená vlhkost horniny a odkapávající voda. Jako původce této vlhkosti byl identifikován průsak vody pravděpodobně z výše položené nádrže odpadní vody, zdroj vlhkosti je tedy v tomto případě antropogenní. To se odráží i na složení analyzovaných vod z převisu s obsahem rozpuštěných látek  $1007\text{--}1152 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ , a výrazně zvýšenými obsahy  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  a  $\text{K}^+$  oproti podzemním vodám v okolí.

Rychlost opadu materiálu byla na lokalitě zjištěna pomocí sběrných folií rozprostřených pod převisem v několika kratších intervalech (0,2–1 den) v různých ročních obdobích a v období od prosince 2012 do března 2015 byl opad měřen stejným způsobem průběžně v intervalu 1–3 měsíců. Bylo zjištěno, že opad nastává dominantně v zimních měsících zvláště po mrazivých epizodách. Rychlost ústupu stěny vyčnívající části převisu dosahuje průměrných hodnot  $14 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$  ve sledovaném období. Bylo odhadnuto, že během posledních 35 let dosahovala dokonce  $36 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ .

Na lokalitě byly do převisu skály nainstalovány laminátové tyče tvořící profil (od nejnižší části převisu P1–P5) pro měření ústupu skalní stěny. Maximální rychlost ústupu skalního povrchu byla zjištěna na horní hraně převisu (P5;  $31 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ ), zatímco nejnižší rychlost ústupu povrchu byla zjištěna v nejhlubší části převisu (P2 a P1;  $3 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$  a  $4 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ ).

Na lokalitě byla v období od října 2013 do března 2015 na předem určených místech převisu průběžně měřena vlhkost horniny, obsah solí v prosakující vodě a sací tlak v hornině. Nejvyšší hodnoty vlhkosti a inverzně nejnižší hodnoty sacího tlaku a obsahu rozpuštěných látek byly zaznamenány v zimních měsících, tedy v obdobích maximální rychlosti ústupu stěny.

Obsah rozpuštěných minerálů v prosakující vodě a jejich krystalizace v přípovrchové zóně (především krystalizace sádrovce) zřejmě není hlavní příčinou rozpadu horniny v převisu, neboť k rozpadu dochází především v zimních měsících a výkvěty na některých místech převisu vzniklé během teplých a suchých období jsou před ještě příchodem zimy rozpuštěny. Krystalizace minerálů sádrovce, případně halitu a nitronatritu nicméně mohou přispívat k snížení pevnosti horniny během jara a léta.

Pro ověření vlivu nasycení vodou na tahovou pevnost horniny byly na lokalitě odebrány vzorky spontánně odlomených šupin z převisu. V blízkosti převisu byl odebrán blok reprezentující horninu nepostiženou mrazovým zvětráváním. Na těchto vzorcích jsem určoval tahovou pevnost metodou měření tahové síly potřebné k odtržení epoxidovým lepidlem přilepených kovových štítků. Stejnou metodu jsem použil pro určení tahové pevnosti šupin z převisu po jejich nasycení vodou. Výsledky jasně ukazují, že tahová pevnost mrazem nepostižené horniny byla průměrně 266 kPa, zatímco tahová pevnost mrazem navětralých šupin byla relativně nižší, průměrně 194 kPa. Tahová pevnost šupin byla nicméně o řád snížena po jejich saturaci, kdy dosahovala průměrně pouze 27 kPa.

Hlavní příčina rychlého ústupu stěn na lokalitě je kombinace vysoké vlhkosti horniny a mrazového zvětrávání. To bylo potvrzeno testy náchylnosti vůči mrazovému zvětrávání na vzorcích horniny odebraných na lokalitě. Pro tento účel byly z odebraného pískovce zhotoveny kostky (o straně délky 4 cm). Část těchto vzorků byla umístěna do ocelových klecí, které vzorky jednoose stlačovaly tlakem 680 kPa. Stlačené i nestlačené kostky byly poté nasyceny destilovanou vodou a střídavě umísťovány do mrazničky, kde voda zmrzla a do vodní lázně, kde byly vzorky opět saturovány destilovanou vodou a kde došlo zároveň k uvolnění a opadu zrn horniny při roztátí ledu expandovaného v pórech horniny. Průběžně byla měřena hmotnost vzorků. Stlačené vzorky se rozpadaly 2–6x pomaleji než nestlačené vzorky.

S testy mrazového zvětrávání nepřímo souvisí i numerická analýza rozložení napětí ve skalním převisu a na sousední neerodující stěně, které jsem prováděl. Vstupními daty pro numerické modelování byl fotogrammetrický model zájmové části skalního defilé, který jsem vyhotovil. Otevřený trojrozměrný tvar povrchu jsem následně upravil a doplnil do podoby uzavřeného tělesa. Toto těleso tak představovalo skalní blok s čelní a svrchní stranou představující skalní povrch. Na základě tohoto 3D tvaru jsem poté vybudoval numerický model pro analýzu rozložení maximálního hlavního napětí v geotechnickém softwaru Plaxis 3D. Vstupními parametry pro numerickou analýzu byly generalizované hodnoty mechanických parametrů pro málo pevné pískovce a Mohr-Coulombův materiálový model. Napětí v modelu bylo následně generováno postupným gravitačním zatěžováním až do úrovně přirozeného gravitačního zrychlení. Dvourozměrné řezy zachycující profil skalního převisu a profil vertikální stěny v těsné blízkosti

převisu, která sice také jevila známky průsaku vlhkosti, ovšem erodovala značně pomaleji ( $< 2 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ ), ukazují, že místa změřeného maximálního ústupu skalního povrchu korespondují se zónami nejnižšího maximálního hlavního napětí.

V zónách s rozpětím hodnot maximálního hlavního napětí +50 kPa až -10 kPa (odpovídá tahu) tak dochází k maximálním rychlostem ústupu povrchu  $17\text{--}31 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ . V zónách převisu se zvýšeným maximálním hlavním napětím (70–200 kPa) byly naopak dokumentovány rychlosti ústupu povrchu  $3\text{--}4 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Na vertikální stěně v těsné blízkosti převisu dosahovala velikosti maximálního hlavního napětí až 150 kPa, přičemž tato stěna vykazovala nejnižší rychlosti ústupu povrchu ( $< 2 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$ ).

Rychlost ústupu povrchu je tedy ovlivněna navíc napětím horniny v přívěškové zóně. Výsledky numerického modelování a měření rychlosti ústupu stěny *in situ* souhlasí s výše uvedenými výsledky testů mrazového zvětrávání.

Nejdůležitějším sdělením publikovaného článku je, že mrazové zvětrávání v kombinaci se zvýšenou vlhkostí je odpovědné za rychlý průběh zvětrávání pískovců v mírném pásu. Zvýšení vlhkosti pískovce snižuje tahovou pevnost na 14 % pevnosti suchého vzorku a zvyšuje rychlost ústupu v převisu na úroveň až o 4 řády vyšší v porovnání se stejnou horninou o přirozené vlhkosti mimo převis. Publikována data o datování holocenních výplní mělkých jeskyní a depositů pod převisy naznačují, že skalní stěny křídových pískovců v české křídové pánvi ustoupily pouze o 2–5 mm za tisíc let v posledních 8–11 tisíci letech (Cílek, 2007; Cílek a Žák, 2007). Podobná zjištění byla prokázána např. i v pískovcových oblastech Coloradské plošiny v USA, kde byly pískovcové převisy a pseudokrasové jeskyně vytvořeny již před 13 tisíci lety (Jennings, 1980; Davis et al., 1984). Naproti tomu v poslední době ledové byla oproti dnešku nižší míra evapotranspirace a nižší teploty, a tedy lze v tomto období očekávat vyšší intenzitu mrazového zvětrávání. Antropogenní vliv ve studovaném převisu lokality Čertova kazatelna umožnil zvýšení vlhkosti horniny, která se stala tím pádem náchylnější na mrazové zvětrávání. Lokálně je rychlost zvětrávání ovlivněna tlakovým polem, kdy zatížené části jsou méně snadno rozrušovány mrazovým zvětráváním. Rychlost zvětrávání (v laboratoři a v terénu) výrazně poklesla při zvýšení zatížení.

*V článku vystupuji jako spoluautor. Na tomto článku jsem se podílel především tvorbou fotogrammetrického modelu převisu, numerickou analýzou rozložení napětí ve studovaném výchozu, tvorbou řezů maximálních hlavních napětí ve dvou vybraných profilech a měřením tahové pevnosti studovaných pískovců zasucha a po jejich saturaci vodou.*

### 6.3. Článek 3

**Filippi M., Bruthans J., Řihošek J., Slavík M., Adamovič J., Mašín D. (2018) Arcades: Products of stress-controlled and discontinuity-related weathering. Earth-Science Reviews 180: 159–184. IF=9,530**

Článek prezentuje nový podtyp kavernózního zvětrávání – arkády, které jsou vázány na planární diskontinuity v hornině a mají charakteristickou podobu seřazených prohlubní oddělených polosloupy až sloupky tvaru přesýpacích hodin. Tyto formy jsou svým tvarem a vznikem odlišné od jiných typů kavernózního zvětrávání, jakým jsou např. tafoni a voštiny. Pro všechny formy kavernózního zvětrávání platí, že se jedná o prohlubně vertikálních a subvertikálních skalních stěn s hojným výskytem v pískovcích.

Mezi v literatuře rozeznávané typy kavernózního zvětrávání patří voštiny (honeycombs) a tafoni. Hlavní rozdíl mezi nimi spočívá v tom, že voštiny, na rozdíl od tafoni, jsou zpravidla menší a vyskytují se ve skupinách, kdy tvar a velikost každé prohlubně je výsledkem kompetice mezi sousedními dutinami. Arkády, jsou naproti tomu touto prací definované jako prohlubně a dutiny různých velikostí a tvarů, kterým je ale vždy vlastní právě vazba na planární diskontinuitu, podél níž jsou na skalní stěně seřazené. Arkády se vyskytují zpravidla v pískovcích, nicméně vzácně se s nimi můžeme setkat také v některých dalších horninách (např. v granitech).

Existenci arkád dokládáme v první řadě obrazovou dokumentací jejich výskytu v terénu v různých klimatických pásmech a geologických podmínkách na několika světově významných lokalitách pískovců. Klíčovou oblastí pro pozorování tohoto fenoménu je Český ráj s lokalitami hruboskalského pískovce (křída, teplické souvrství; především skalní město Apolena), který lze označit za uzamčený písek či křehký pískovec (friable sandstone; Richards a Barton, 1999). V lomu Střeleč byl dokonce pozorován a zdokumentován samovolný vznik arkád na diskontinuitách lomových stěn díky oscilaci hladiny vodní nádrže v lomu. Je zřejmé, že ačkoliv se na vzniku arkád může podílet více zvětrávacích činitelů, jejich základní morfologie je vždy podobná a jejich vznik tím pádem musí být řízen jednotným principem.

Pro vysvětlení vzniku a tvarů arkád byl využit již dříve publikovaný princip záporné zpětné vazby mezi mechanickým napětím a erozí (Bruthans et al., 2014). K ověření této hypotézy jsem využil numerickou analýzu rozložení napětí v arkádách. Touto metodou bylo možné odhalit zóny sníženého napětí, které mohou být snáze erodovány. Vytvořil jsem také numerickou simulaci vzniku arkád.

Pro zhodnocení rozložení napětí na různých typech arkád a jejich iniciálních tvarů jsem provedl numerickou analýzu rozložení napětí v arkádách. Na základě konceptuální představy o tvaru arkád a fotografické dokumentace jsem zhotovil 3D modely tvarových koncových členů těchto forem v programu Blender. Jednalo se o model tvořený úzkými horizontálními deskovitými

půlkruhovými zářezy, seřazenými ve stěně, dále o model arkád tvořených ve stěně seřazenými eliptickými prohlubněmi protaženými ve vertikálním směru, modely arkád s čočkovitými prohlubněmi protaženými horizontálně a modely s čočkovitých prohlubněmi s plochými dny. Na základě 3D modelů jsem pomocí metody konečných prvků v geotechnickém softwaru Plaxis 3D provedl analýzu rozložení velikostí maximálního hlavního napětí a jeho směrů. Při analýze jsem využil publikované mechanické parametry pískovců a elastický materiálový model. Tato analýza prokázala, že u modelu tvořeného úzkým horizontálním deskovitým půlkruhovým zářezem ve stěně vzniká výrazná zóna tahového napětí nad i pod zářezem. U modelů ostatních typů arkád byla zóna tahového napětí značně redukována. Taková zjištění naznačují, že oblast nad diskontinuitou bude snadněji erodována a že arkády vzniklé na diskontinuitě budou více odolné proti zvětrávání/erozi.

Numerický evoluční model simulující vznik arkád jsem vytvořil s využitím programu Tochnog. Iniciální tvar modelu byl tvořen úzkým horizontálním deskovitým půlkruhovým zářezem umístěným v kvádru, jehož frontální strana představovala skalní stěnu. Tento iniciální tvar byl seskládán z kubických prvků. Všem prvkům jsem přiřadil mechanické parametry pro zvětralý pískovec a pro vytvoření numerické simulace jsem použil Mohr-Coulombův materiálový model. Na horní plochu modelového tvaru bylo při simulaci aplikováno zatížení odpovídající 5 metrům nadloží a celý model byl navíc zatížen gravitačně. Simulace vzniku arkád byla pojata jako erozní proces, který cyklicky odebírá prvky modelu z jeho frontální strany (kam ústí polokruhovitým zářez) na základě srovnání maximálního hlavního napětí každého odhaleného prvku s hodnotou kritického napětí 2 kPa. Hodnotu kritického napětí 2 kPa jsem převzal z Bruthans a kol. (2014). Pokud byla hodnota maximálního hlavního napětí daného prvku nižší než hodnota kritického napětí, byl element odstraněn. Po každém cyklu odstraňujícím prvky následovala rekalkulace napětí ve zbývajících prvcích modelu. Cykly odstraňování prvků a rekalkulace napětí se opakovaly, dokud všechny odhalené prvky modelu nesplňovaly podmínku, aby jejich maximální hlavní napětí bylo vyšší než hodnota kritického napětí 2 kPa. V tu chvíli ustala eroze modelu a na místě polokruhovitého zářezu vznikla prohlubeň kosočtverečného tvaru z frontálního pohledu.

Dalším předloženým průkazním materiálem pro obhájení arkád jakožto samostatné formy kavernózního zvětrávání byly fyzikální modely vzniku arkád. Zhotovení fyzikálních modelů jsem prováděl v lomu Střeleč. Při jejich tvorbě jsem využíval mechanických vlastností uzamčených písků a jejich snadné erodovatelnosti tekoucí vodou.

Fyzikální model A představoval náhodný vznik arkád na přirozené diskontinuitě. Pískovcovou stěnu jsem otesal tak, aby byla tvořena rovnou, téměř vertikální plochou bez jakýchkoliv nerovností. Voda aplikovaná kropením volně stékala po stěně a erodovala povrch. Během eroze byly preparovány jednotlivé lavice pískovce (tvořené foresety) s tím, že výrazněji ustupovaly



lavice na horní hraně připravené stěny. Erozi byly odhaleny kontakty lavic v podobě subhorizontálních zářezů, ve kterých zcela přirozeně vznikly drobné vertikální sloupce v podobě přesýpacích hodin oddělující nepravidelné protáhlé otvory a tím utvořily strukturu podobnou arkádám. Tyto arkády byly vůči další erozi výrazně odolnější.

Fyzikální modely B a C zachycovaly vznik arkád na uměle vytvořené diskontinuitě. Pilou jsem v pískovcové stěně vytvořil přerušovaný (B) a nepřerušovaný (C) zářez simulující diskontinuitu. Stěnu s takto vytvořenou diskontinuitou jsem opakovaně skrápěl vodou, až do chvíle, kdy eroze dosáhla zadní stěny zářezu a kdy na ní začaly vnikat struktury podobné přírodním arkádám.

Článek je významný svou základní premisou, tedy vyčleněním specifického podtypu formy kavernózního zvětrávání. K tomuto využívá v rámci svého zaměření nově nástroje numerického modelování. Využití numerické evoluční simulace je zde inovativní, neboť do té doby byl světově publikován pouze jeden případ, kde by bylo využito podobného přístupu na příkladu modelování vzniku skalních bran (Ostanin et al., 2017). Nutno podotknout, že numerický model použitý v našem článku využívá vstupní parametry odvozené z mechanických vlastností zjištěných na přírodním materiálu. Vznik arkád je vždy vázán na diskontinuitu, podél které jsou jednotlivé prohlubně seřazeny. Tato diskontinuita je příčinou redistribuce napětí způsobené gravitací. V tlakových stínech (zónách sníženého tlaku) vzniká zvětráváním a erozí prohlubeň arkády, a naopak v místech vyššího tlaku vznikají polosloupky až sloupky arkády.

*V článku vystupuji jako spoluautor. Podílel jsem se na tvorbě fyzikálních modelů, dokumentaci a analýze výsledků, tvorbě 3D modelů, numerickém modelování, tvorbě grafiky k článku, tvorbě videa zaznamenávající proces vzniku skalní brány v příloze článku a tvorbě a finalizaci kompletního textu článku.*

#### 6.4. Článek 4

**Řihošek J., Slavík M., Bruthans J., Filippi M. (2019): Evolution of natural rock arches: A realistic small-scale experiment. *Geology* 47 (1): 71–74. IF=4,768**

V předchozích publikacích (Bruthans et al., 2014; Řihošek et al., 2016; Filippi et al., 2018) bylo dokázáno, že mechanické vlastnosti netmeleného hruboskalského pískovce, který je těžen poblíž obce Střeleč v Českém ráji, lze dobře využít pro simulaci vzniku a vývoje některých pískovcových skalních forem (skalní sloupky, skalní hříby, skalní brány tvaru A). Realistická simulace vzniku skalní brány s obloukem nicméně do této doby ještě nebyla provedena.

V tomto článku je prezentována právě simulace postihující vývoj typické skalní brány. Eroze je zpomalena na těch částech pískovcového masivu, které jsou stlačeny napětím způsobeným vlivem gravitace na hmotu pískovce. Naopak části pískovcového masivu, které nejsou stlačeny, jsou vůči erozi více náchylné. Tímto způsobem lze dobře simulovat vývoj takových pískovcových forem, jejichž vznik a vývoj (tvaru) je dominantně řízen napětím („stress controlled landforms“/napětím řízené formy).

Jako erozního činitele je využita energie dopadajících vodních kapek. Nestlačený vzorek střelečského pískovce je dopadajícími vodními kapkami snadno erodován díky absenci tmelu, a tedy nízké tahové pevnosti tohoto materiálu.

Počáteční (iniciální) tvar budoucího zmenšeného modelu skalní brány jsem vytvořil přímo *in situ* v horní části protáhlého výběžku pískovcového bloku. Při přípravě iniciálního tvaru jsem využil přirozeného tvaru skalního výchozu, u kterého jsem předem zkontroloval homogenitu a nepřítomnost puklin. Horní stranu výchozu jsem upravil do podoby hranolu o délce 90 cm, šířce 20 cm a výšce 40 cm. V hloubce 13 cm od svrchní plochy hranolu jsem umístil horizontální zářez o délce 37 cm procházející hranolem naskrz. Tento zářez měl imitovat horizontální diskontinuitu, tedy např. puklinu či mezivrstevní plochu méně pevného materiálu.

Takto připravený iniciální tvar jsem následně podrobil erozi v 93 cyklech, kterou simulovalo uniformě distribuované kropení s využitím zahradní konve z výšky 30–40 cm. Po každém cyklu kropení jsem pořídil fotografický snímek z přední strany tvaru a po každé desítce kropení jsem provedl fotogrammetrickou dokumentaci měnícího se tvaru. Jednotlivé kroky vývoje skalní brány byly označeny zkratkou ES (erosional step) a číslem, tedy ES0 až ES93, kdy krok vývoje ES0 představuje iniciální tvar a ES93 představuje krok před zhroutilím brány.

Během eroze zmenšeného modelu skalní brány se postupně ztenčoval oblouk brány, zatímco se zvětšoval otvor pod tímto obloukem. Oblouk brány byl po 93. cyklu ztenčen natolik, že se v následujícím cyklu kropení zhroutil. Fotografická dokumentace mi posloužila pro tvorbu videa dokumentujícího vývoj skalní brány a pro popis tvarové změny z frontálního pohledu. Snímky

z fotogrammetrické dokumentace jsem využil pro tvorbu 3D modelů jednotlivých fází vývoje v programu pro tvorbu fotogrammetrických modelů. Získané 3D modely jsem v programu Blender shodně zorientoval a transformoval je tak, aby se překrývaly a bylo možné popsat prostorový vývoj celého tvaru a vyčíst prostorové parametry jako obsah a obvod kolmého průřezu oblouku pro další analýzu.

Na základě pozorovaných změn tvaru oblouku byly stanoveny tři stadia vývoje skalní brány. Jsou jimi iniciální stádium (initial stage), vyzrálost (mature stage) a degradace (senile stage). V iniciálním stadiu (zahrnující ES0–ES40) docházelo k úbytku materiálu po stranách oblouku a k ztenčování průřezu oblouku. Rovněž byla tato fáze charakteristická erozí tlakově nezatížených částí, což vedlo k srovnání nerovností povrchu a k zaoblení pravoúhlých okrajů tvaru. Ve stádiu vyzrálosti (zahrnující ES40–ES85) byla rychlost eroze po stranách oblouku srovnatelná s rychlostí eroze oblouku. Ve stádiu degradace (zahrnující ES85–ES93) docházelo k zrychlené erozi povrchu oblouku až do jeho zhroucení. Stadia vyzrálosti a degradace byly charakteristické víceméně uniformní rychlostí eroze celého povrchu.

3D model iniciálního tvaru brány (ES0) a 3D model tvaru brány ve stádiu dagraďace (ES90) jsem využil k vytvoření 3D numerického modelu rozložení velikostí maximálního hlavního napětí a jeho směrů. Tyto numerické modely jsem vytvořil pomocí metody konečných prvků v geotechnickém softwaru Plaxis 3D s využitím známých mechanických parametrů střelečského pískovce a elastického materiálového modelu. Výsledky numerických modelů posloužily k demonstraci rychlé eroze v částech modelu s nízkým maximálním hlavním napětím a pomalé eroze v částech modelu s vysokým maximálním hlavním napětím. Tato demonstrace potvrzuje základní premisu výzkumu o erozi řízené rozložením napětí. Validitu získaného finálního tvaru zmenšeného modelu brány jsem ilustroval srovnáním rozložení velikostí napětí v 3D modelu tvaru brány ve stádiu degradace (ES90) a 3D modelu brány Landscape arch, který se nachází v Národním parku Arches (Arches National Park) v Utahu ve Spojených státech.

Nejdůležitějším sdělením publikovaného článku je úspěšná simulace vývoje skalní brány jakožto přírodní pískovcové formy, jejíž zvětrávání/eroze je řízena rozložením napětí. Toto je prokázáno využitím střelečského pískovce, tedy materiálu, jehož eroze je řízena napětím, jako materiálu tvořícího zmenšený fyzikální model brány, dále analýzou rozložení napětí v počátečním a závěrečném kroku vývoje brány a srovnáním s reprezentativním příkladem brány v přírodě. Díky využití optimálního modelového materiálu a metody fotogrammetrie bylo vůbec poprvé možné simulovat vznik pískovcové brány na přírodním materiálu v reálném čase a pozorovat stadia vývoje takového tvaru ve všech třech rozměrech. K článku je jako doplňkový materiál přiřazeno i video zachycující vývoj tvaru fyzikálního modelu brány. Článek rovněž na základě demonstrování modelu definuje tři nutné a postačující podmínky pro vznik brány. Jsou jimi

úzký protáhlý masiv horniny, horizontální (nebo ukloněná) diskontinuita a materiál podléhající zvětráváním/erozi řízenému napětím.

*V článku vystupuji jako hlavní autor. Podílel jsem se na tvorbě samotného fyzikálního modelu, dokumentaci a analýze výsledků, tvorbě 3D modelů, numerickém modelování, tvorbě grafiky k článku, tvorbě videa zaznamenávající proces vzniku skalní brány v příloze článku a tvorbě a finalizaci kompletního textu článku.*

## 7. Použitá literatura

- Adamovič, J., Mikuláš, R. (2011): Vznik některých elipsoidálních dutin rozpouštěním karbonátového tmelu v pískovcích jizerského souvrství na Kokořínsku. *Zprávy o geologických výzkumech* 44, 9–13.
- Adamovič, J., Mikuláš, R., Schweigstillová, J., Böhmová, V. (2011): Porosity changes induced by salt weathering of sandstones, Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 8(1), 29–45.
- Adamovič, J. (2019): Recent advances in sandstone geomorphology. In: Klimeš, J., Hartvich, F. (eds.): *Český ráj '19: State of geomorphological research in 2019*, International annual conference, Book of abstracts, 3.–5. 4. 2019 [online]. Institute of Rock Structure and Mechanics CAS, v.v.i., Czech Association of Geomorphologists and Geopark Český Ráj, o.p.s. Dostupné z: [https://www.irsm.cas.cz/cag2019/CAG2019\\_Book\\_of\\_Abstracts.pdf](https://www.irsm.cas.cz/cag2019/CAG2019_Book_of_Abstracts.pdf)
- Arulandan, K., Heinzen, R. T. (1977): Factors influencing erosion in dispersive clays and methods of identification. *ASTM Special technical publication* 623, 202–217.
- Blatt, H., Jones, R. L. (1975): Proportions of Exposed Igneous, Metamorphic, and Sedimentary Rocks. *GSA Bulletin* 86(8), 1085–1088.
- Bradley, W. A. (1963): Large-scale exfoliation in massive sandstones of the Colorado Plateau. *Geological Society of America Bulletin* 75, 519–528.
- Brinkgreve, R. B. J., Engin, E., Swolfs, W. M. (2013): *Plaxis 3D, General Information Manual*. Plaxis bv, Delft.
- Bromley R. G., Mikuláš R. (2002): Sandstone phenomena of East Greenland. In: Kopřivová L. (ed.): *Abstract Book, Sandstone Landscapes: Diversity, Ecology and Conservation*, 14–20 September, Doubice in Saxonian-Bohemian Switzerland, 2.
- Bruthans, J., Řihošek, J. (2017): Tlakově stabilizované písky v České republice a jejich zvláštní geomechanické vlastnosti. *Zprávy o geologických výzkumech* 50, 247–253.
- Bruthans, J., Filippi, M., Schweigstillová, J., Řihošek, J. (2017): Quantitative study of a rapidly weathering overhang developed in an artificially wetted sandstone cliff. *Earth Surface Processes and Landforms* 42, 711–723.
- Bruthans, J., Svetlík, 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.

- Bruthans, J., Soukup, J., Vaculikova, J., Filippi, M., Schweigstilova, J., Mayo, A. L., Masin, D., Kletetschka, G., Rihosek, J. (2014): Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion. *Nature Geoscience* 7, 597–601.
- Burnley, P. C. (2013): The importance of stress percolation patterns in rocks and other polycrystalline materials. *Nature Communications* 4, 2117.
- Charola, A. E. (2000): Salts in the deterioration of porous materials: an overview. *Journal of The American Institute for Conservation* 39, 327–343.
- Carlsson, A., Olsson, T. (1982): Rock bursting phenomena in a superficial rock mass in southern central Sweden. *Rock Mechanics*, 15, 99–110.
- Cílek, V. (2002): The relief formation of sandstone castelated areas of the Czech Republic, Abstracts of the Conference on Sandstone Landscapes: Diversity, Ecology and Conservation, 14–20 September, 2002, Doubice in Saxonian-Bohemian Switzerland, Czech Republic.
- Cílek, V. (2007): Climate, microclimate and paleoclimate of sandstone areas of Central and Northern Bohemia (Czech Republic). In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. (eds.): *Sandstone Landscapes*. Academia, Praha, str. 97–103.
- Cílek, V., Žák, K. (2007): Late Glacial and Holocene sedimentation under sandstone rock shelters of Northern Bohemia (Czech Republic). In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. (eds.): *Sandstone Landscapes*. Academia, Praha, str. 133–138.
- Cimbura, V. (2020): Weathering of rocks. Weathering simulation of sandstone formations. Praha, Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická. Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Sloup.
- Colman, S. M., Dethier, D. P., (1986): An overview of rates of chemical weathering. In: Colman, S. M., Dethier, D. P. (eds.): *Rates of chemical weathering of rocks and minerals*. Academic, New York, str. 1–15.
- Community, B. O. (2018): Blender – a 3D modelling and rendering package. Stichting Blender Foundation, Amsterdam. Dostupné z: <http://www.blender.org>
- Conca, J. L., Rossman, G. R. (1982): Case hardening of sandstone. *Geology* 10, 520–523.
- Conca, J. L., Astor, A. M. (1987): Capillary moisture flow and the origin of cavernous weathering in dolerites of Bull Pass, Antarctica. *Geology* 15, 151–154.
- Cruikshank, K. M. & Aydin, A. (1994): Role of fracture location in arch formation, Arches National Park, Utah. *Geological Society of America Bulletin* 106, 879–891.

- Davis, O. K., Agenbroad, L., Martin, P. S., Mead, J. I. (1984): The pleistocene dung blanket of Becham Cave, Utah. In: Genoways, H. H., Dawson, M. R. (eds.): Contribution in Vertebrate Paleontology. Volume in Memorial to John E. Guilday. Carnegie Museum Natural History Special Publication 8. Carnegie Museum, Pittsburgh, PA, str. 267–282.
- Debossens, G. (2007): The Natural Arches of Tassili National Park, Tassili N'Ajjer, Algeria. Dostupné z: <http://www.naturalarches.org/tassili/index.htm> [cit. 27. 12. 2021].
- Delmonaco, G., Margottino, C., Spizzichino, D. (2013): Slope dynamic, monitoring and geological conservation of the Siq of Petra (Jordan). In: Viggiani, C. (ed.): Geotechnical engineering for the preservation of monuments and historic sites. London, CRC Press, str. 325–334.
- Derbyshire, E. (1972): Tors, rock weathering and climate in Southern Victoria Land, Antarctica. In: Price, R. J., Sugden, D. E. (eds.): Polar Geomorphology. London, Institute of British Geographers, str. 93–106.
- Doehne, E. (2002): Salt weathering: a selective review. In: Siegesmund, S., Vollbrecht, S. A., Weiss, T. (eds.): Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies. Geological Society of London, Special Publication 205, str. 51–64.
- Dorn, R. I., Dorn, J., Harrison, E., Gutbrod, E., Gibson, S., Larson, P., Cervený, N., Lopat, N., Groom, K. M., Allen, C. D. (2012): Case hardening vignettes from the western USA: convergence of form from a divergence of hardening processes. *Yearbook of the Association of Pacific Coast Geographers* 74, 1–12.
- Dott, R. H. (1964): Wacke, graywacke and matrix – what approach to immature sandstone classification. *Journal of Sedimentary Petrology*, 34 (3), 625–632.
- Dusseault, M. B., Morgenstern, N. R. (1979): Locked sands. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 12, 117–131.
- Duszyński, F., Migoń, P. (2018): Geneza skalnych miast na płaskowyżach piaskowcowych – The origin of „rock cities“ on sandstone plateaus. *Przegląd Geograficzny* 90, 379–402.
- EN 12370 (1999): Natural stone test methods – Determination of resistance to salt crystallization. European standard EN12370:1999, European Committee for Standardization.
- Eppes, M., Keanini, R. (2017): Mechanical weathering and rock erosion by climate-dependent subcritical cracking. *Reviews of Geophysics* 55, 470–508.

- Filippi, M., Bruthans, J., Řihošek, J., Slavík, M., Adamovič, J., Mašín, D. (2018): Arcades: Products of stress-controlled and discontinuity-related weathering. *Earth-Science Reviews* 180, 159–184.
- Fitzner, B., Snelhage, R. (1982): Einfluß der Porenradienverteilung auf das Verwitterungsverhalten ausgewählter Sandsteine. *Bautenschutz und Bausanierung* 5, 97–103.
- Fonseca, J., Bésuelle, P., Viggiani, G. (2013): Micromechanisms of inelastic deformation in sandstones: an insight using x-ray micro-tomography. *Géotechnique Letters*, 3(2), 78–83.
- Gao, H. (1991): Stress concentration at slightly undulating surfaces. *Journal of Mechanics and Physics of Solids* 39, 443–458.
- Gerber, E., Scheidegger, A. E. (1969): Stress-induced weathering of rock masses. *Eclogae Geologicae Helveticae* 62, 401–415.
- Gerber, E., Scheidegger, A. E. (1973): Erosional and stress-induced landforms features on steep slopes. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementary Issue* 18, 38–49.
- Goudie, A., Viles, H. (1997): *Salt Weathering Hazards*. Wiley, Chichester. 241 str.
- Grimes, K. G., Wray, R. A. L., Spate, A., Houshold, I. (2009): *Karst and Pseudokarst in Northern Australia, Report to the Commonwealth Department of Water, Heritage and the Arts, Optimal Karst Management*, Canberra, 85 str.
- Halsey, D. P., Mitchell, D. J., Dews, S. J. (1998): Influence of climatically induced cycles in physical weathering. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 31(4), 359–367.
- Härtel, H., Adamovič, J., Mikuláš, R. (2007): General overview of European sandstone landscapes, In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. (eds.): *Sandstone landscapes*, Academia, Praha, str. 275–285.
- Heinrichs, K. (2008): Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra, Jordan. *Environmental Geology* 56, 653–675.
- Herle, I. (2003): *Základy matematického modelování v geomechanice*. Univerzita Karlova v Praze – Nakladatelství Karolinum, Praha, 162 str.
- Hess, R. (2010): *Blender Foundations: The Essential Guide to Learning Blender 2.6*. Focal Press, Burlington. 404 str.



- Howard, A. D., Kochel, R. C. (1988): Introduction to cuesta landforms and sapping processes on the Colorado Plateau. In: Howard, A. D., Kochel, R. C., Holt, H. E. (eds.): *Sapping Features of the Colorado Plateau*. NASA, Washington, str. 6–56.
- Huinink, H. P., Pel, L., Kopinga, K. (2004): Simulating the growth of tafoni. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 1225–1233.
- Iñigo, A. C., García-Talegón, J., Trujillano, R., Molina, E., Rives, V. (2003): Evolution and decay processes in the Villamayor and Zamora sandstones. In: Perez-Rodríguez J. L. (ed.): *Applied Study of Cultural Heritage and Clays*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Sevilla, Spain, str. 47–57.
- Jenkins, K. A., Smith, B. J. (1990): Daytime rock surface temperature variability and its implications for mechanical rock weathering: Tenerife, Canary Islands. *Catena* 17, 449–459.
- Jennings, J. D. (1980): *Cowboy Cave*. University of Utah Anthropological Papers 104. University of Utah Press, Salt Lake City, UT, 240 str.
- Jiménez-González, I., Rodríguez-Navarro, C., Scherer, G. W. (2008): Role of clay minerals in the physicochemical deterioration of sandstone. *Journal of Geophysical Research* 113, F02021.
- Koons E. D. (1955): Cliff retreat in the southwestern United States. *American Journal of Science* 253, 44–52.
- Laity, J. E., Malin, M. C. (1985): Sapping processes and the development of theater-headed valley networks on the Colorado Plateau. *Geological Society of America Bulletin* 96, 203–217.
- Ljunggren, C., Chang, Y., Janson, T., Christiansson, R. (2003): An overview of rock stress measurement methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 40(7–8), 975–989.
- Majmudar, T. S., Behringer, R. P. (2005): Contact force measurements and stress-induced anisotropy in granular materials. *Nature* 435, 1079–1082.
- Martel, S. J. (2011): Mechanics of curved surfaces, with application to surface-parallel cracks. *Geophysical Research Letters* 38, L20303.
- Martini, J. E. J. (1979): Karst in Black Reef Quarzite near Kaapsehoop, Eastern Transvaal. *Annals of the South African Geological Survey* 13, 115–128.
- McBride, E. F., Picard, M. D. (2004): Origin of honeycombs and related weathering forms in Oligocene Macigno Sandstone, Tuscan coast near Livorno, Italy. *Earth Surf. Process. Landf.* 29, 713–735.

- McGreevy J. P., Smith B. J. (1982): Salt weathering in hot deserts: observations on the design of simulation experiments. *Geografiska Annaler* 64A(3–4), 161–170.
- McGreevy J. P., Smith B. J. (1984): The possible role of clay minerals in salt weathering, *Catena* 11(1), 169–175.
- Medina, H., Hinderliter, B. (2014): The stress concentration factor for slightly roughened random surfaces: analytical solution. *International Journal of Solids and Structures* 51 (10), 2012–2018.
- Mertlík, J., Adamovič, J. (2005) Some significant geomorphic features of the Klokočí Cuesta, Czech Republic. *Ferrantia* 44, 171–175.
- Meybeck, M. (1987): Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads, *American Journal of Science* 287, 401–428.
- Migoń, P. (2021): Sandstone geomorphology – Recent advances. *Geomorphology* 373, 107484
- Mikuláš, R. (1997): Plešivecká brána a skalní kanci, neboli pár poznámek k pískovcovému fenoménu Dubských skal. *Speleo* 25, 23–25.
- Mikuláš, R. (2001): Gravity and orientated pressure as factors controlling „honeycomb weathering“ of the Cretaceous castellated sandstones (Northern Bohemia, Czech Republic). *Bulletin of Czech Geological Survey* 76, 217–226.
- Mikuláš, R., Adamovič, J., Čílek, V. (2010): Vliv vody stékající po povrchu pískovců na mikrorelief pískovcových skalních útvarů. *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2010*, 31–35.
- Mol, L., Viles H. A. (2010): Geoelectric investigations into sandstone moisture regimes: Implications for rock weathering and the deterioration of San Rock Art in the Golden Gate Reserve, South Africa. *Geomorphology* 118(3–4), 280–287.
- Oberlander, T. M. (1980): Origin of segmented cliffs in massive sandstones of southeastern Utah. In: Doehring, D. O. (ed.): *Geomorphology in arid regions*, A proceedings volume of the eighth annual geomorphology symposium held at the State University of New York at Binghamton, Sept, 23-24, 1977. George Allen and Unwin, Boston, str. 79–114.
- Oda, M., Nemat-Nasser, S, Konishi, J. (1985): Stress-induced anisotropy in granular masses. *Soils and Foundations* 25(3), 85–97.
- Ollier, C. D. (1969): *Weathering*. Longman, London, 304 str.
- Ollier, C. D., Tuddenham, W. G. (1961): Inselbergs of central Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 5, 257–276.

- Ostanin, I., Safonov, A., Oseledets, I. (2017): Natural Erosion of Sandstone as Shape Optimisation. *Scientific Reports* 7, 17301.
- Ostojic, S., Somfai, E., Nienhuis, B. (2006): Scale invariance and universality of force networks in static granular matter. *Nature* 439 (7078), 828–830.
- Palmer, J., Radley, J. (1961): Gritstone tors of the English Pennines. *Zeitschrift für Geomorphologie* 5, 37–52.
- Pánek, T., Hradecký, J. (2016): *Landscapes and Landforms of the Czech Republic*. World Geomorphological Landscapes. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, 422 str.
- Paradise, T. R. (1995): Sandstone weathering thresholds in Petra, Jordan, *Physical Geography* 16(3), 205–222.
- Paradise, T. R. (2002): Sandstone weathering and aspect in Petra, Jordan, *Zeitschrift für Geomorphologie* 46, 1–17.
- Paradise, T. R. (2013): Assessment of tafoni distribution and environmental factors on a sandstone djinn block above Petra, Jordan. *Applied Geography* 45, 176–185.
- Peters, J. F., Muthuswamy, M., Wibowo, J., Tordesillas, A. (2005): Characterization of force chains in granular material. *Physical Review E*. 72 (4 Pt 1), 041307.
- Price, D. G. (1995): Weathering and weathering processes. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 28(3), 243–252.
- Přikryl, R., Melounová, L, Vařilová, Z., Weishauptová Z. (2006): Spatial relationships of salt distribution and related physical changes of underlying rocks on naturally weathered sandstone exposures (Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic). *Environmental Geology* 52, 409–420.
- Pye, K., Mottershead D. N. (1995): Honeycomb weathering of Carboniferous sandstone in a sea wall at Weston-super-Mare, UK, *Quarterly Journal of Engineering Geology* 28, 333–347.
- Radjai, F., Wolf, D. E., Jean, M., Moreau, J. J. (1998): Bimodal character of stress transmission in granular packings. *Physical Review Letters* 80, 61.
- Reiche, P. (1950): *Survey of weathering processes and products*. University of New Mexico Publications in Geology 3, The University of New Mexico Press, Albuquerque, New Mexico, 95 str.

- Rihošek, J., Bruthans, J., Masin, D., Filippi, M., Carling, G. T., Schweigstillova, J. (2016): Gravity-induced stress as a factor reducing decay of sandstone monuments in Petra, Jordan. *Journal of Cultural Heritage* 19, 415–425.
- Řihošek, J., Slavík, M., Bruthans, J., Filippi, M. (2018): Evolution of natural rock arches: A realistic small-scale experiment. *Geology* 47(1), 71–74.
- Richards, N. P., Barton, M. E. (1999): The Folkestone Bed sands: microfabric and strength. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 32, 21–44.
- Robinson, E. R. (1970): Mechanical disintegration of the Navajo sandstone in Zion Canyon, Utah. *Geological Society of America Bulletin* 81, 2799–2806.
- Robinson, D. A., Williams, R. B. G. (1987): Surface crusting of sandstones in southern England and northern France. In: Gardiner, V. (ed.): *International Geomorphology 1986 Part II*. Wiley and Sons, London, str. 623–635.
- Robinson, D. A., Williams, R. B. G. (1994) Sandstone weathering and landforms in Britain and Europe, In: Robinson, D. A., Williams, R. B. G. (eds.): *Rock weathering and landform evolution*. John Wiley and Sons, Chichester, str. 371–392.
- Roddeman, D. (2017): Tochnog professional. Finite element application technology. Dostupné z: [www.feat.nl](http://www.feat.nl) [cit. 12. 07. 2021].
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E. (1999): Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 101–209.
- Ruedrich, J., Siegesmund, S. (2007): Salt crystallisation in porous sandstone. *Environmental Geology* 52, 225–249.
- Safonov, A., Filippi, M., Mašín, D., Bruthans, J. (2020): Numerical modelling of arcades and rock pillars. *Geomorphology* 365, 107260.
- Selby, M. J. (1993): *Hillslope Materials and Processes*. 2<sup>nd</sup> ed. Oxford University Press, Oxford, 264 str.
- Scherer, G. W. (1999): Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research* 29, 1347–1358.
- Schweigstillová J., Bruthans J., Falteisek L., Válek J., Soukup J. (2013): Rychlá tvorba skalních kůr na povrchu hruboskalského pískovce. *Zprávy o geologických výzkumech v roce 2012*, 228–234.

- Slavík, M., Bruthans, J., Filippi, M., Schweigstilllová, J., Falteisek, L., Řihošek, J. (2017a): Biologically-initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion. *Geomorphology* 278, 298–313.
- Slavík, M., Bruthans, J., Schweigstilllová, J., Falteisek, L. (2017b): Vliv biokolizace na erozi a odolnost různých typů pískovcových povrchů v lomu a na přirozených výchozech. *Zprávy o geologických výzkumech* 50, 81–87.
- Smith, B. J., McGreevy, J. P. (1988): Contour scaling of a sandstone by salt weathering under simulated hot desert conditions. *Earth Surface Processes and Landforms* 13, 697–706.
- Smith, B. J., Turkington, A. V., Warke, P. A., Basheer P. A. M., McAlister, J. J., Meneely, J., Curran, J. M. (2002): Modelling the rapid retreat of building sandstones: a case study from a polluted maritime environment. In: Siegesmund, S., Weiss, T., Volbrecht, A. (eds). *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*. Geological Society of London Special Publication 205, The Geological Society, London, str. 347–362.
- Smith, B. J., Warke, P. A., McGreevy, J. P., Kane, H. L. (2005): Salt-weathering simulations under hot desert conditions: agents of enlightenment or perpetuators of preconceptions? *Earth Surface Processes and Landforms* 67, 211–227.
- Stacey, T. R. (1974): Technical note 2. The behaviour of two- and three-dimensional model rock slopes. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 8, 67–72.
- Suppe, J. (1985): *Principles of structural geology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N. J., 537 str.
- Tallman, S. L. (1949): Sandstone types: Their abundance and cementing agents. *Journal of Geology* 57, 582 – 591.
- Tricart, J., Cailleux, A. (1972): *Introduction to Climatic Geomorphology*. Longmans, London, 295 str.
- Turkington, A. V., Paradise, T. R. (2005): Sandstone weathering: a century of research and innovation. *Geomorphology* 67, 229–253.
- Turkington, A. V., Phillips, J. D. (2004): Cavernous weathering, dynamical instability and self-organisation. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 665–675.
- Turkington A. V., Phillips J. D., Campbell S. W. (2005): Weathering and landscape evolution. *Geomorphology* 67, 1–6.
- 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.

Vařilová, Z., Příkryl, R., Cílek, V. (2011): Pravčice Rock Arch (Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic) deterioration due to natural and anthropogenic weathering. *Environmental Earth Sciences* 63, 1861–1878.

Vařilová, Z., Příkryl, R., Zvelebil, J. (2015): Factors and processes in deterioration of a sandstone rock form (Pravčická brána Arch, Bohemian Switzerland NP, Czech Republic). *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementary Issues* 59(1), 81–101.

Vařilová, Z. (2016): Elbe Sandstones. In: Pánek, T., Hradecký, J. (eds.): *Landscapes and Landforms of the Czech Republic. World Geomorphological Landscapes*. Springer Verlag, Heidelberg, Berlin, str. 43–57.

Viles, H. A., Goudie, A. S. (2004): Biofilms and case hardening on sandstones from Al-Quwayra, Jordan. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 1473–1485.

Vítek, J. (1987): Pseudokrasové tvary v pískovcích Klokočských skal. *Československý kras* 38, Praha, 71–85.

Wang Z. -T., An Z. -S. (2016): A simple theoretical approach to the thermal expansion mechanism of salt weathering. *Catena* 147, 695–698.

Warke, P. A., McKinley, J., Smith, B. J. (2006): Variable weathering response in sandstone: Factors controlling decay sequences. *Earth Surface Processes and Landforms* 31, 715–735.

Wedekind, W., Ruedrich, J. (2013): Salt-weathering, conservation techniques and strategies to protect the rock cut facades in Petra/Jordan. In: Fort R., Álvarezde-Buergo M., Gomez-Heras M., Vazquez-Calvo, C. (eds.): *Heritage, weathering and conservation*. Taylor & Francis, London, str. 261–268.

Whalley, W. B. (1984) High altitude weathering processes. In: Miller, K. J. (ed.): *International Karakorum Project, Vol 1*. Cambridge University Press, str. 616–633.

Whalley, W. B., Warke, P. A. (2005): Weathering. In: Selley, R. C., Cocks, L. R. M., Plimer, I. R. (eds). *Encyclopaedia of Geology* 5. Elsevier, Oxford, str. 581–590.

Williams, R. B. G., Robinson, D. A. (1981): Weathering of sandstone by the combined action of frost and salt. *Earth Surfaces Processes and Landforms* 6, 1–9.

Wray, R. A. L. (1997): A Global Review of Solutional Weathering Forms on Quartz Sandstones. *Earth Science Reviews* 42(3), 137–160.

Wray, R. A. L. (2013): Solutional weathering and karstic landscapes on quartz sandstones and quartzite. In: Shroder, J., Frumkin, A. (eds.): *Treatise on Geomorphology, Vol. 6, Karst Geomorphology*. Academic Press, San Diego, str. 463–483.

Wray, R. A. L., Sauro, F. (2017): An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Science Reviews*, 171, 520–557.

Yatsu, E. (1988): *The Nature of Weathering*. Sozosha, Tokyo, 624 str.

Young, R. W. (1986): Tower karst in sandstone: Bungle Bungle massif, northwestern Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie* 30(2): 189–202.

Young, R. W. (1987): Sandstone landforms of the tropical East Kimberley region, northwestern Australia. *Journal of Geology* 95, 205–218.

Young, R. W., Wray, R. A. L., Young, A. R. M. (2009): *Sandstone Landforms*. Cambridge University Press, Cambridge, 304 str.

**8. Plné znění článků 1 – 4**





Available online at  
**ScienceDirect**  
[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

Elsevier Masson France  
**EM|consulte**  
[www.em-consulte.com/en](http://www.em-consulte.com/en)



Original article

# Gravity-induced stress as a factor reducing decay of sandstone monuments in Petra, Jordan



Jaroslav Rihosek<sup>a</sup>, Jiri Bruthans<sup>a,\*</sup>, David Masin<sup>a</sup>, Michal Filippi<sup>b</sup>, Gregory T. Carling<sup>c</sup>, Jana Schweigstillova<sup>d</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Science, Charles University in Prague, Albertov 6, 12843 Prague 2, Czech Republic

<sup>b</sup> Institute of Geology, CAS, v. v. i., Rozvojova 269, 16500 Prague 6, Czech Republic

<sup>c</sup> Brigham Young University, Department of Geological Sciences, Brigham Young University, 84602 Provo, UT, USA

<sup>d</sup> Institute of Rock Structure and Mechanics, CAS, v. v. i., V Holesovickach 41, 18209 Prague 8, Czech Republic

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 31 July 2015

Accepted 22 October 2015

Available online 28 November 2015

### Keywords:

Sandstone monument

Stress

Stability

Decay

Petra

## ABSTRACT

Recent work has shown that gravity-induced stress within a landform due to vertical loading reduces weathering and erosion rates, contrary to commonly held hypotheses. The purpose of this investigation is to evaluate the negative feedback between stress and weathering of sandstone monuments at the Petra World Heritage Site in Jordan via field observations, salt weathering experiments, and physical and numerical modeling. Previous studies on weathering of Petra monuments have neglected the impact of stress, but the ubiquitous presence of stress-controlled landforms in Petra suggest that it has a substantial effect on weathering and erosion processes on manmade monuments and natural surfaces. Laboratory salt weathering experiments with cubes of Umm Ishrin sandstone from Petra demonstrated the inverse relationship between stress magnitude and decay rate. Physical modeling with Střeleč locked sand from the Czech Republic was used to simulate weathering and decay of Petra monuments. Sharp forms subjected to water erosion decayed to rounded shapes strikingly similar to weathered tombs in Petra. The physical modeling results enabled visualization of the recession of monument surfaces in high spatial and temporal resolution and indicated that the recession rate of Petra monuments was far from constant both in space and time. Numerical modeling of stress fields confirmed the physical modeling results. This novel approach to investigate weathering clearly demonstrates that increased stress decreases the decay rate of Petra monuments. To properly delineate the endangered zones of monuments, the potential damage caused by weathering agents should be combined with stress modeling and verified by documentation of a real damage.

© 2015 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

## 1. Introduction

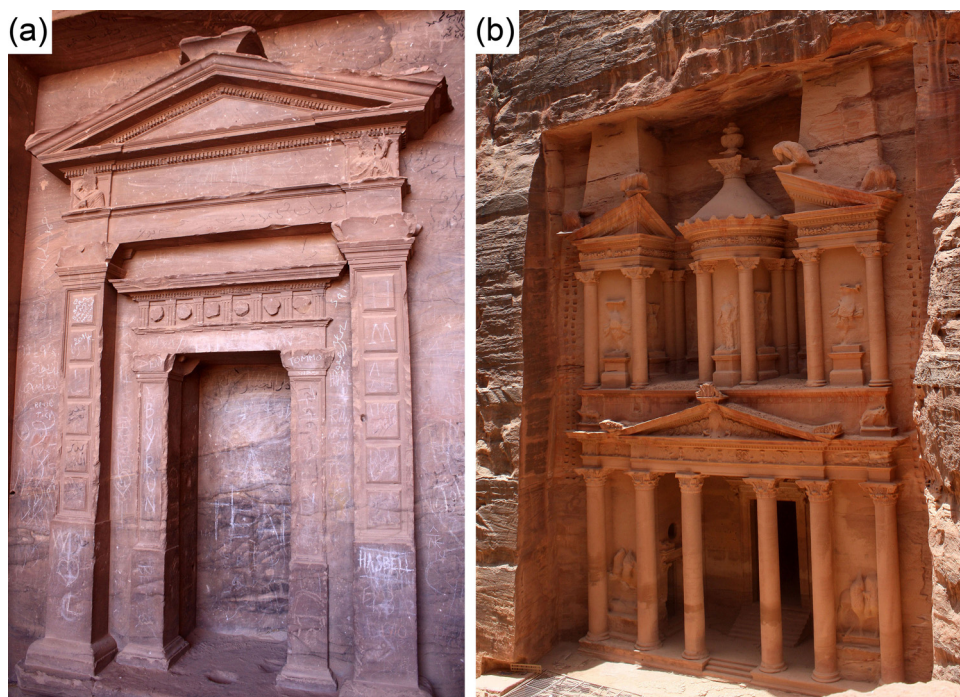
Weathering of manmade sandstone monuments is an important problem studied by a variety of approaches [1–4]. Gravity-induced stress (hereafter “stress”) is a phenomenon that is widely considered to limit the stability of sandstone monuments if rock strength is exceeded, and its effect on weathering or erosion rate is generally neglected [5–7]. However, Bruthans et al. [8] demonstrated that stress plays a crucial role in the origin of common natural sandstone landforms like pillars, arches, alcoves, and pedestal rocks, and showed that these landforms are actually stress-controlled wherein stress causes the rock to resist weathering. Various weathering and erosion processes (e.g., salt and frost weathering,

raindrop impact, overland flow and slaking) proceed faster on surfaces with lower stress and are considerably less erosive in areas with higher stress. Erosion and weathering are coordinated by the stress field to reshape the original rock exposure into a new geometry where low-stress portions (i.e., portions with low loading) are removed. This idea is supported by evidence from both physical modeling with real sandstone under controlled conditions and numerical modeling.

The effect of stress on weathering and decay might be readily observable at manmade sandstone monuments exposed for sufficient time. The Petra World Heritage Site in Jordan, with well dated monuments, is an excellent laboratory to investigate clearly defined long-term weathering rates. Several hundred tombs were carved in Paleozoic sandstones by the Nabatean civilization in Petra between 200 B.C and 150 A.D. [9]. Similar Nabatean tombs can also be found at generally lesser known Al-Hijr (Madâin Sâlih) site in northern Saudi Arabia. Reported recession rate of tomb facades

\* Corresponding author. Tel.: +42 0221 951566.

E-mail address: [bruthans@natur.cuni.cz](mailto:bruthans@natur.cuni.cz) (J. Bruthans).



**Fig. 1.** Characteristic well-preserved original shapes of monuments in Petra: a: portal in a chamber across from Ad Deir (Monastery); b: Al Khazna (Treasury). Human and animal figures in Al Khazna were damaged artificially (iconoclasm), not due to the weathering.

and other outer sandstone surfaces range from 0 to 350 mm/kyr (“kyr” is 1000 of years) [10–13]. Salt weathering, flowing water during rain storms, hygric swelling, and insolation are considered the major weathering processes responsible for sandstone decay [9,11,13]. In many cases, monuments carved by the Nabateans have degraded into pillars and arches and rectangular openings have become rounded, suggesting that weathering is controlled by stress fields. However, the effect of stress on weathering has not been considered in previous studies on Petra [9–14].

The purpose of this study is to assess the effect of stress on weathering and decay of monuments carved into sandstone in Petra. This is accomplished by four complementary approaches:

- document landforms that appear to originate from the negative feedback between stress and weathering on manmade monuments and natural rock exposures;
- evaluate the relationship between stress and decay rate via salt weathering experiments;
- perform physical modeling experiments on simplified down-scaled replicas of Petra monuments to simulate weathering processes;
- develop numerical models to evaluate stress-controlled erosion of replica monuments over time.

## 2. Geological settings and material characteristics

### 2.1. Petra sandstone monuments

Petra is situated in southern Jordan on the eastern rim of Dead Sea rift valley at an elevation of 900–1100 m a.s.l. [15]. Mean annual precipitation is 298 mm and rain occurs mainly during winter [16]. Mean annual temperature is 22 °C [17]. Cambro-Ordovician sandstones, which host Nabatean monuments, were deposited on the Precambrian igneous basement complex and are covered by Lower Cretaceous sandstones [15]. Two formations within the Cambro-Ordovician sequence are exposed: the Umm Ishrin formation overlain by the Disi formation [9,13]. Umm Ishrin and

Disi sandstones (total thickness of ~500 m) were deposited in an alluvial braided plain and dip gently to the east (09°) [15]. The ~400 m thick Umm Ishrin sandstone consists of multicolored medium-coarse grained and well sorted quartz combined with highly variable proportions of authigenic kaolinite, hematite, goethite, and subordinate calcite as a cementing material [18]. Total porosity varies between 4 and 21% and matrix content varies between 7 and 50% [13]. The ~100 m thick Disi formation consists of mostly whitish-beige color coarse-grained sandstone with prevailing quartz and subordinate feldspar. Secondary quartz and clay minerals are the main cementation components with minor hematite and calcite. Diagenetic cementation is characterized by syntaxial quartz overgrowth [9].

### 2.2. Weathering of Petra sandstone

The ancient city of Petra is a unique architectural/historical monument with columns, cornices, metopes, triglyphs and friezes carved into sandstone [19]. Many shapes like tomb chambers were originally rectangular with mostly rectangular openings (Fig. 1). The weathering of artificial forms in Petra has resulted in rounded shapes remarkably similar to those commonly found in surrounding natural sandstone cliffs and also in cliffs of the same lithology over a wider area [20]. Tafoni, channels, cavities, rillen, stonelace, pits and spalled surfaces are found on both natural and manmade monuments [11,14]. Wedekind and Ruedrich [9] recognized two kinds of tafoni:

- horizontal alveolar running below and markedly above ferruginous zones with water-damping effects that bring salt-rich moisture to the sandstone surface;
- vertical with narrow strips of temporary flowing water from storms.

Salt weathering is one of the most important factors controlling deterioration of Petra monuments based on field evidence and the high sensitivity of Umm Ishrin sandstone to salt weathering

**Table 1**  
Střeleč locked sand (SLS) properties.

Parameters	SLS
Porosity [%]	22
Matrix content ( $\leq 25 \mu\text{m}$ ) [%]	1.4
UCS dry [MPa]	2.7–3.2
UCS saturated [MPa]	3.0
Peak friction angle [°]	74
Peak cohesion [kPa]	6

UCS: uniaxial compressive strength.

tests [9]. Salts in Petra primarily consist of halite and gypsum with minor amounts of other salts [9,13]. A considerable proportion of salt components (up to 10 wt.%) is derived from rain and occurs in the first few centimeters of the depth profile of tafoni [9,13]. Rain, water flow on sandstone exposures, flash floods, and humidity are also contributing factors for weathering [13]. Paradise [10] suggested that insolation is an important factor in decay but Heinrichs [13] found no correlation between insolation and weathering damage. Wind contributes to erosion of loosened stone material and evaporation of salt solutions in pore space [9].

Sandstone characteristics, slope aspect, and lichen coverage also have an effect on weathering rates. Susceptibility to weathering is positively correlated with increasing grain size and increasing porosity in sandstones [13]. Disi sandstone is more friable than Umm Ishrin sandstone making it more susceptible to weathering. The effect of slope aspect on intensity of weathering was studied by Paradise [11,12] on djinn blocks (large rocks shaped into a cube-like form). In one case weathering was highest on the E-W faces and lowest on the N face, yet in another case weathering was lowest on the E-W faces and highest on the S face. Lichen thali cover > 50% of the surface on some north facing sandstone surfaces. Lichens appear to decrease the overall surface recession where they cover original stone-dressing marks [14]. Sandstone recession rates, calculated as the ratio of distance between the original surface with stone-dressing marks to the present surface over the elapsed time period (~2000 years), range between 10–220 mm/kyr at horizontal and vertical surfaces of a Roman theatre and djinn blocks [10–12]. Heinrichs [13] reported maximum recession rates at portions of the monuments at 350 mm/kyr, but for whole monuments the average rates are <80 mm/kyr. The recession rate is higher in friable younger Disi sandstone. The recession rate is assumed to increase exponentially with time [13]. No disintegration is expected in first 500–1000 years after finishing the monuments while more than 50% recession is expected to occur in last few hundred years, but these estimates are unsupported by direct measurements [13].

### 2.3. Střeleč locked sands (SLS)

For physical modeling of weathering of Petra monuments (described in Section 3.3) we used Střeleč locked sand (referred to hereafter as SLS) from lower part of Střeleč Quarry, situated 70 km NE of Prague, Czech Republic. SLS is part of the Hrubá Skála Formation, which is a Cretaceous marine sandstone of upper Turonian and Coniacian age deposited in a shallow environment as coarse delta bodies [21]. SiO<sub>2</sub> content varies between 95–99%. The fine fraction (<25  $\mu\text{m}$ ) is composed of well-ordered kaolinite (75%), quartz (24%), and illite (1%). Non-dispersive kaolinite was identified as the only mineral-binding agent [22]. For other SLS characteristics see Bruthans et al. [8].

Generally, cohesion in locked sand results from interpenetrative fabric of quartz grains due to diagenetic processes reducing the porosity [23]. Similar to other locked sands, SLS has high compressive strength, high peak friction angle, high critical state friction angle, and brittle behavior (Table 1) [8,23–25]. Explosives are needed to separate material in the quarry (scale of tens of

meters), but a cube of the same material with an edge length of 3 cm is so fragile that it cannot be lifted by hand. SLS is so friable that it can be disaggregated by brushing the surface and it disintegrates when fully immersed in water (without external load). Locked sand samples are less stable with diminishing size [26]. The origin of locked sands is attributed to a pressure solution of detrital quartz grains [27], which results in an interlocked texture (quartz grains with crystal overgrows – pyramidal truncations [23]). Based on experimental evidence the three processes responsible for disintegration and erosion of SLS in the quarry are raindrop impact, overland flow, and slaking. Slaking is caused by excess air pressure in capillaries that is generated by surface tension forces of water that enters the pores previously occupied by air. The entrapped air in the pores exerts pressure on the sides of the pores that is sufficient to break loose the material [28]. However, erosion of SLS by all of these processes can be completely stopped by applying high enough stress (>2 kPa) [8].

## 3. Methods

### 3.1. Field observations and measurements

Particular objects within the ancient city of Petra and surrounding natural sandstone landforms were richly photo-documented (Fig. 2). We focused on both natural and artificial forms that displayed the apparent effect of the stress-controlled weathering and erosion. These features included hourglass-shaped pillars, honeycomb structures, and arches.

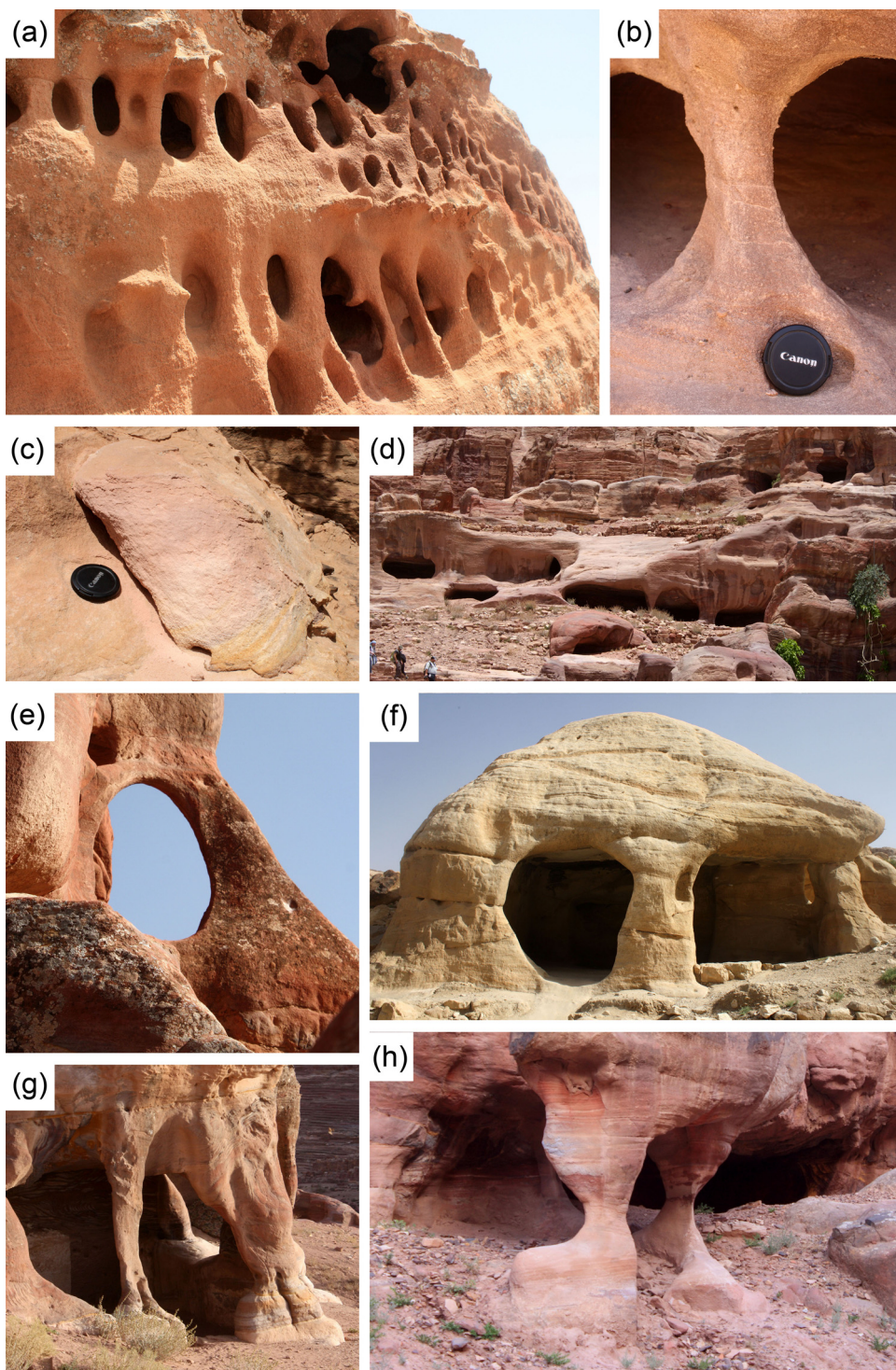
### 3.2. Laboratory measurements and analyses

The effect of stress on salt weathering of Umm Ishrin sandstone was studied by applying different uniaxial loads to six cube samples with 4-cm long edges. Two unconfined cubes were left bare (PJ<sub>a</sub> and PJ<sub>b</sub>), touching only on their lower base. Fig. 3 shows the two different types of cube compression. Two cubes – PJ<sub>1</sub> and PJ<sub>2</sub> – were loaded by lead weights of 5.9 and 11.5 kg, respectively. The other two cubes – PJ<sub>3</sub> and PJ<sub>4</sub> – were compressed by placing 4 cm × 4 cm steel plates on opposite sides of the cubes and tightening nuts on the steel casing constructed around the cubes with a torque screwdriver to 0.30 and 0.70 Nm, respectively. The corresponding confinement (in MPa) for each cube was determined by calibration with a tensiometer. Uniaxial stress values were 36 kPa for PJ<sub>1</sub>, 70 kPa for PJ<sub>2</sub>, ~250 kPa for PJ<sub>3</sub>, and ~680 kPa for PJ<sub>4</sub>. Based on a mean sandstone density of ~2.4 g/cm<sup>3</sup> [11] these values are equivalent to an overburden thickness of 1.5 m for PJ<sub>1</sub>, 3 m for PJ<sub>2</sub>, 11 m for PJ<sub>3</sub>, and 30 m for PJ<sub>4</sub>.

All cubes were exposed to repeated 24-hour cycles where they were submerged in 16% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution at room temperature for 2 hours, dried in an oven for 20 hours, and left to cool at room temperature for 2 hours. During the drying step, the temperature gradually increased from 25 °C to 105 °C in the first 7 hours and then remained stable at 105 °C for 13 hours. The cubes were weighed after each cycle. This method follows the procedure of EN12370 [29] except that a higher concentration of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> was used to increase disintegration rates [8].

### 3.3. Physical and numerical modeling

Whereas the effect of stress on weathering and erosion of cemented sandstones cannot be directly observed in the field due to slow weathering rates, we conducted physical modeling experiments using SLS, in which erosion proceeds instantly. Field experiments were done *in situ* at the Střeleč Quarry 50 m below the original ground surface on SLS outcropping in the quarry wall. Surface crusts (if present) were carefully removed. Two simplified

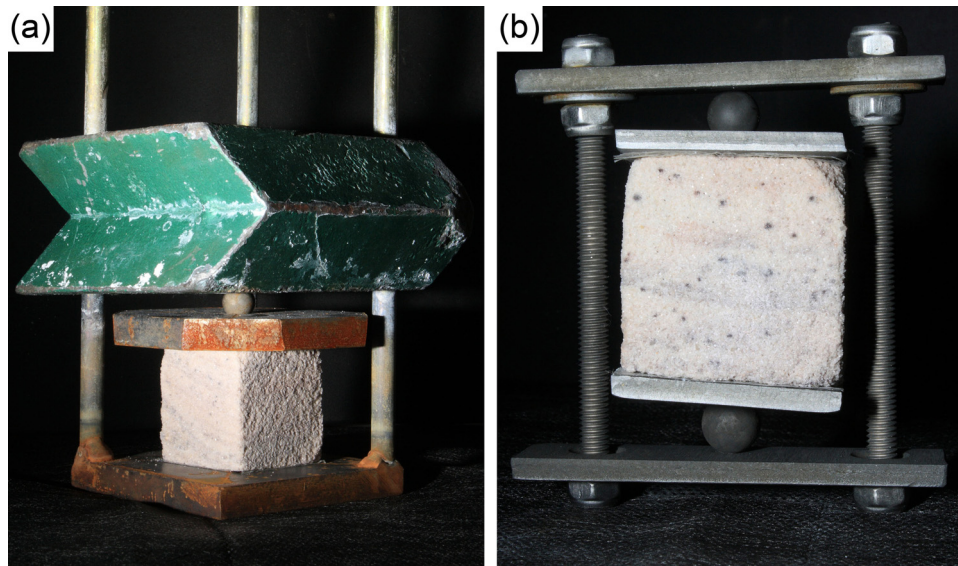


**Fig. 2.** Examples of stress-controlled natural (a–c) and artificial (d–h) forms in Petra: a: pillars in honeycombs; b: pillar; c: quickly disintegrating rock slab separated from the massive rock; d: tomb walls converted into pillars; e: inclined pillar; f: tomb weathered into rounded shapes; g and h: strongly weathered tomb walls changed into pillars.

small-scale models of Petra monuments were carved into the sandstone using a hand drill with a core bit and were smoothed with a spatula. Models replicated only the most basic features of Petra monuments, including rectangular chambers, openings, columns, vertical facades. Models were subjected to water erosion using a hose with a sprinkler fed by a pump (model 1) or by manual watering with a water can (model 2). Erosion progress was

photo-documented in steps defined either by important changes in model shape or by the amount of applied water.

Numerical modeling was used to predict stress distribution within the physical models of Petra monuments constructed of SLS at Střeleč Quarry. The numerical modeling was performed using the geotechnical software PLAXIS 3D. Two finite element models were set up, one for each of the physical models. Model dimensions



**Fig. 3.** Two different types of compression used for salt weathering experiments: a: cube loaded by lead weight (used for cubes PJ1 and PJ2); b: cube compressed by tightening the nuts on the steel casing constructed around the cube (used for cubes PJ3 and PJ4).

were exactly the same as dimensions of the physical models and model geometry closely resembled the geometry of the physical models (Figs. 4, 5a and 6a). Finite element meshes of models 1 and 2 consisted of 508,000 and 338,000 tetrahedral finite elements with second-order interpolation of displacements, respectively. Boundary conditions of the model were as follows: the displacement of the bottom boundary was fixed in both the horizontal and vertical directions, and the displacement of the vertical boundaries was fixed in the horizontal direction only.

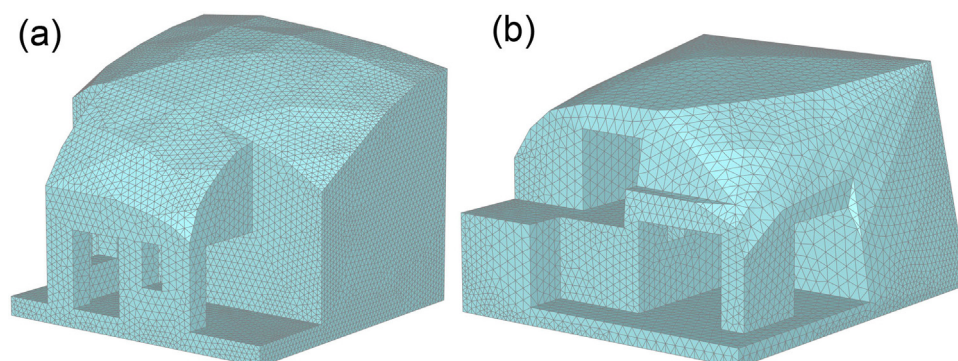
SLS was described using a Mohr-Coulomb constitutive model. Young's modulus of  $E = 606.3 \text{ MPa}$  was calibrated on the basis of measurements of shear wave propagation velocities. Poisson's ratio was estimated as  $\nu = 0.25$ . The friction angle of SLS was  $\varphi = 72^\circ$  [8]. Cohesion was calculated from the given friction angle and from uniaxial compression strength of  $3 \text{ MPa}$  as  $c = 238 \text{ kPa}$ . The angle of dilatancy was estimated as  $\psi = 24^\circ$ . The SLS total density was estimated as  $\rho = 2067 \text{ kg/m}^3$ . This unit weight was calculated from the measured porosity of locked sand of  $n = 0.22$  and from the specific gravity of quartz ( $G_s = 2.65 \text{ g/cm}^3$ ), assuming dry pore spaces.

Stress state within the physical model was generated using the gravity loading procedure available in software PLAXIS 3D. The initial stress was prescribed as zero along with zero gravity acceleration. During the stress generation stage, the gravity acceleration was gradually increased in a finite element simulation to the value of  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  under the condition of constant density.

## 4. Results and discussion

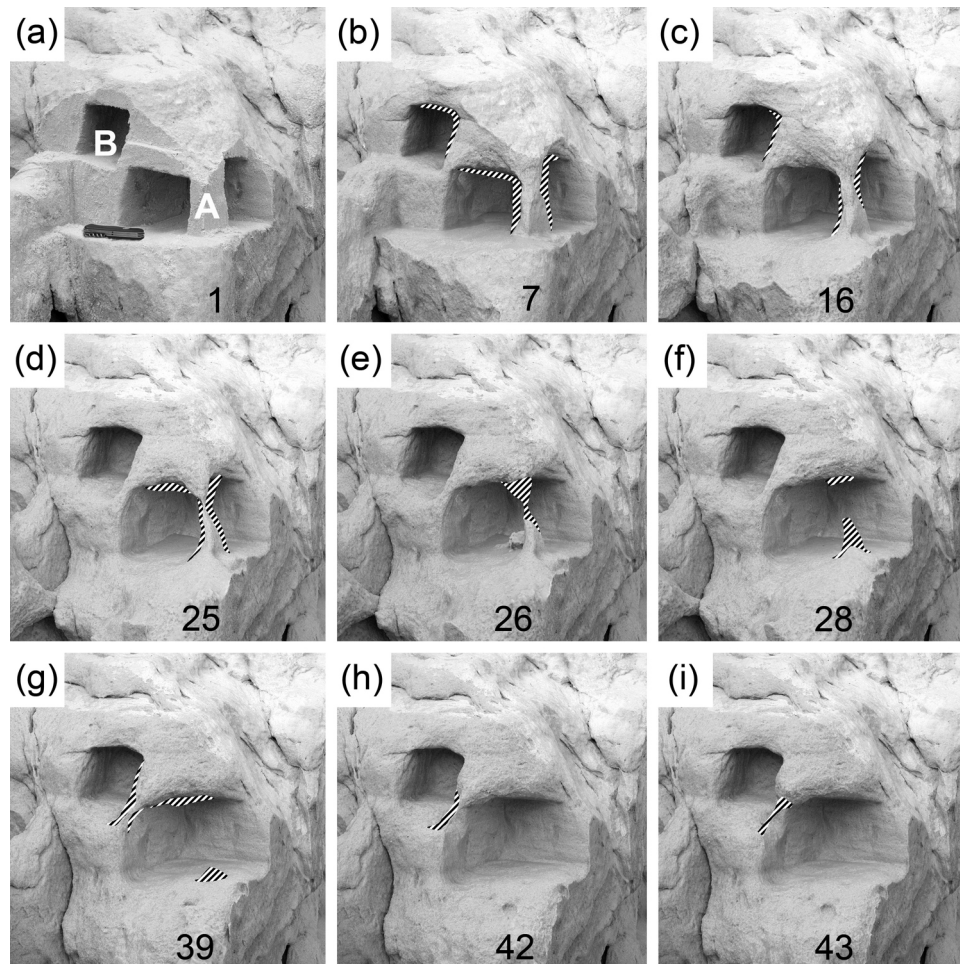
### 4.1. Stress-controlled landforms in Petra

Stress-controlled weathering/erosion landforms are ubiquitous in the Petra area – visible on both manmade and natural forms. Pillars and arches are typical for natural surfaces including tafoni and honeycombs (Fig. 2a, b). Sandstone blocks that are separated by fractures from adjacent massive sandstone quickly disintegrate unlike the massive sandstone in their immediate surroundings (Fig. 2c). The mechanism of stress-controlled weathering/erosion is also observable on artificial forms. Originally rectangular openings are remodeled into oval or irregular but rounded openings (Fig. 2d–f, for explanation see supplementary Fig. 15 in Bruthans et al. [8]). Sidewalls between two openings in tombs change into hour-glass pillars, which are parallel with principal stress direction. These pillars act as natural properly placed buttresses (Fig. 2e, g). Some tomb entrances have been remodeled into freestanding arches (Fig. 2h). Protrusions, like friezes and sculptures have been obliterated (cf. also Bruthans et al. [8], supplementary Fig. 19). Horizontal fractures and thin horizons of easily weathering material, which interrupt the continuity of the sandstone mass are responsible for strong decrease of stress magnitude above and below the subhorizontal discontinuity. As a consequence the sandstone will be quickly removed above and below discontinuity forming vaulted opening (similar to “architectural arcades”). Stress lines might be



**Fig. 4.** Geometry and finite element mesh of the two finite element models: a: model 1; b: model 2.





**Fig. 6.** Physical modeling of erosion progress of simplified architectural elements in Sřteleč locked sand (model 2 with rectangular openings and “chambers”). See also animation of model erosion in supplementary material. Hatched areas show the sandstone volume eroded from previous time period. Numbers show number of water can volumes used for erosion. Capital letters mark individual pillars (A and B).

origin were the bottom of the chamber and remnants of originally rectangular corners (Fig. 5i).

Model 2 consisted of two chambers in different levels connected by corners, three portals and one column, vertical facades, and a flat bottom in the forefront (Fig. 6a). Similar to model 1, the rectangular edges became rounded and rectangular cross-section of pillars became more circular quickly after onset of erosion (Fig. 6b). The pillar gradually thinned and finally eroded and the flat forefront was completely eroded away (Fig. 6e and f, [Suppl. video 2](#)). Another pillar was formed at place B, where SLS was bordered from all sides by free space due to interconnection of both chambers. Both chambers progressively merged together as erosion removed the material between the chambers (Fig. 6i). The evolution of pillar diameters is shown in Fig. 9. Initially the pillar diameter decreased quickly by ~20% as edges were lost but then the recession rate decreased. Finally, once overburden recessed until the pillar lost its loading, the pillar eroded away very quickly.

Shapes resulting from experimental erosion of SLS blocks are strikingly similar to shapes visible present-day in Petra monuments (Figs. 2 and 10). Based on the erosion progress of both models we conclude that the recession rate is far from constant both in space and time despite the fact that SLS had similar potential erodibility in each model. The recession rate was highest at those portions of model that were least loaded at a given time and on the edges, where stress cannot effectively stabilize the material (outer

corner angles  $\leq 90^\circ$ ). On the other hand, a lower recession rate was observed at loaded surfaces. An abrupt increase of recession rate was observed whenever buttress elements were lost (e.g., pillar or supporting wall). In such a case the material, which previously transferred the load through the pillar, was quickly eroded away (all material in ceiling and also at a base of a former pillar). Also, the recession rate was very high at the beginning of the experiments since artificial activity significantly disturbed the original stress field of the previously quasi-stable natural landscape. Local horizontal fractures disturbed the stress field, which led to increased erosion of material directly above and below the fractures.

#### 4.4. Numerical modeling

Distribution of major principal stress within the two finite element models is shown in Fig. 11a. The major principal stress is at a maximum at the inner corners of the 3D model, with intermediate values in the columns and walls of the modeled monument and minimum values just above the lintels of doors and windows and along the outer corners due to the arching effect. A similar picture is given by model cross-sections with principal stress magnitudes and directions (Fig. 11b). The stress agrees with the observed tendency of the monument shapes to become “rounded” (see Figs. 5 and 6): inner corners (angles of  $270^\circ$ ) are least susceptible to erosion due to stress concentration, whereas lintels are most susceptible to

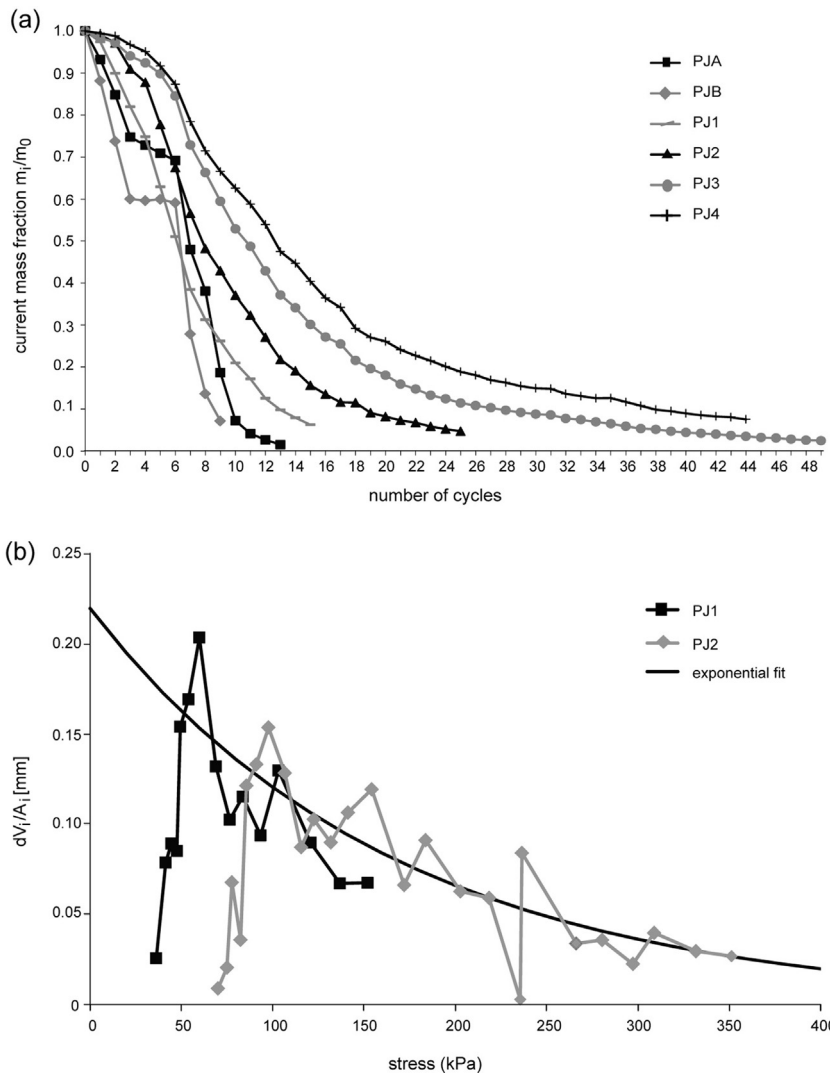


Fig. 7. Relationship between stress intensity and decay rate of Umm Ishrin sandstone cubes during salt weathering: a: total mass normalized by the initial mass; b: incremental volume change normalized by current surface area.

erosion. In the course of the erosion process, rounding of the geometry relieves stress concentration in the inner corners and stress reduction in the outer corners. This agrees with the experimental observation that the erosion continues evenly along the surface in

the latter erosion phases. However, columns and walls are always more resistant to erosion, as the major principal stress is larger within them than in the surrounding material.

The stress magnitude is quantified in Fig. 11c, showing areas in different color where the major principal stress is higher and lower than the approximate limiting value of 2 kPa. As indicated by Bruthans et al. [8], this value (quantified to lie within the broader

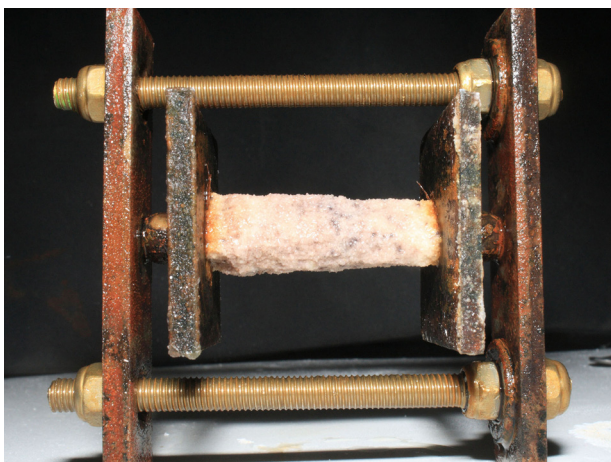


Fig. 8. Pillar originated by salt weathering of cube PJ3 after cycle number 33.

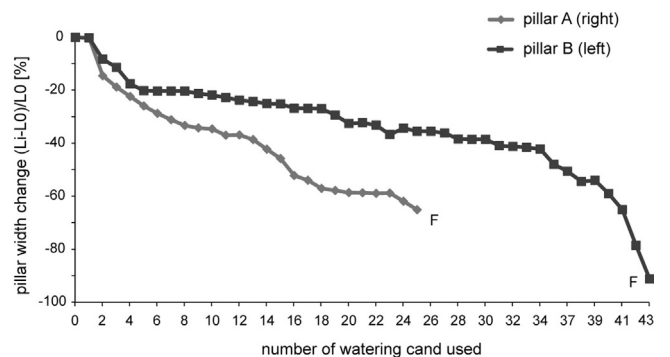
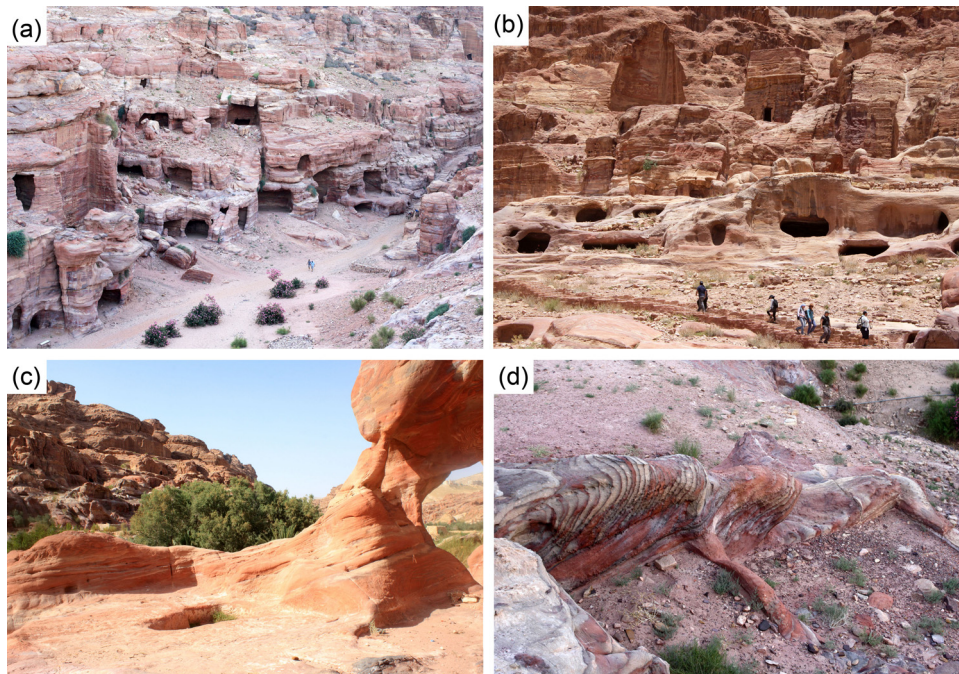
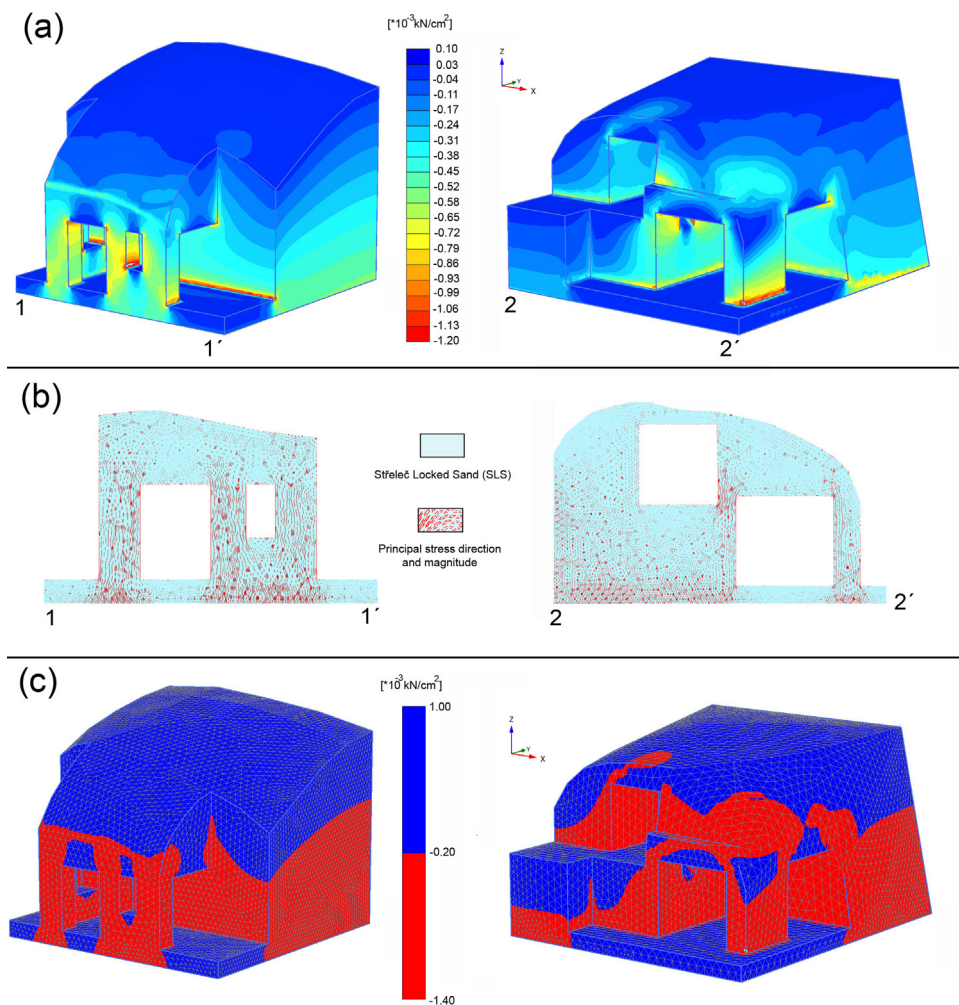


Fig. 9. Erosion rate of pillars in model 2 (Fig. 6). F~ pillar failure. L: diameter of the middle part of pillar; 0: initial; i: actual.





**Fig. 10.** Fast recession rate of tomb ceilings and forefronts: a, b: tombs with eroded front walls a) situated below Lions triclinium; b: situated near theatre; c, d: tombs with eroded ceiling and sidewalls near Temenos.



**Fig. 11.** Finite element modeling: a: distribution of major principal stress within the two finite element models; b: model cross-sections with principal stress magnitudes and directions; c: graphics showing areas in different color with major principal stress higher and lower than the limiting value of 2 kPa.

range of 1 kPa to 8 kPa) is limiting for the locked sand disintegration by surface slaking due to water inundation. Fig. 11c clearly shows that the initial erosion is to be expected in the door and window lintels, along the outer corners of the geometry and, in general, along the top, non-loaded surfaces of the model. This agrees with the experimental observations (see Figs. 5b and 6b, the first two photos just after the onset of erosion process).

#### 4.5. Synthesis of measured data and field observations

Detailed inspection of several tens of tombs in various locations in Petra showed that recession is concentrated in external tomb facades, tomb portals, and their immediate vicinity. On the contrary, the stone-dressing marks are often preserved inside the tomb chambers, which show no surface recession in last  $2000 \pm 200$  years. Interestingly, the amount of the salts is often highest in the tomb interiors and salts sometimes cover the stone-dressing marks by several mm thick crusts (e.g., at the Ad-Deir Monastery). XRD analyses show that the major salts in the tombs interiors are halite and gypsum, the same salts that are responsible for decay of facades [9,13]. This clearly demonstrates that exposure type is a more important factor than salt concentration for sandstone decay. The highest decay rates of sandstone were observed on vertical and overhanging outer tomb walls, where periodically flowing gravitational water carries salts and evaporation dominates over leaching. Water periodically dissolves salts, which otherwise act as cement, to release the decayed sandstone. Salts can re-precipitate after each heavy rain, which increases damage to the sandstone pore spaces. Salt dissolution and re-precipitation does not occur in the interior of the tombs because there is no temporary water saturation, and thus damage is considerably lower than on outer surfaces. An alternative explanation of prevailing damage on external surfaces might be insolation, which increases damage by thermal “salt explosion” of halite [30] or high supersaturation during halite precipitation due to rapid drying [31].

Very fast recession rate of tomb ceilings and forefronts was observed on some portions of sandstone monuments located at lower elevations in Petra (Fig. 10). A similar pattern of erosion was observed on sloping surfaces of SLS after pronounced erosion period (Suppl. Fig. 1). Erosion dominates on sloping surfaces exposed to the rain where erosion rates may exceed 1000 mm/kyr. Salts tend to be leached from sloping surfaces and thus salt weathering is unlikely to cause such a rapid decay. Slaking or swelling clays might be responsible for rapid decay, but detailed study is needed to test this hypotheses.

The observation that recession occurs only on some exposure types should be considered in any conceptual model of sandstone decay of Petra monuments. Decay will be fastest at places where salt or other weathering is intensive and stress magnitude is low. A lower decay rate will occur at places with similar intensity of weathering factors (e.g., salt concentration) but with higher stress magnitude. No recession will occur at places where salt weathering (or other weathering) does not occur.

## 5. Conclusion

The ubiquitous presence of stress-controlled landforms at the Petra World Heritage Site shows a substantial effect of stress on weathering and erosion of artificial monuments and natural surfaces. Salt weathering experiments clearly demonstrated the inverse relationship between stress magnitude and decay rate, wherein unconfined cubes disintegrated 4 times faster than cubes loaded by 250–680 kPa. Physical modeling with Střeleč locked sands (SLS) used to simulate the erosion of Petra monuments resulted in shapes strikingly similar to highly weathered tombs.

For the first time, the physical modeling enabled visualization of the erosion progress on monuments and suggested that the recession rate of Petra monuments is far from constant both in space and time. The recession rate is highest at portions of the monuments that are least loaded at any given time (e.g., protrusions or outer edges). An abrupt increase of recession rate occurs each time a buttress element is lost (e.g. pillars). Material that no longer transfers load is quickly eroded away. Numerical stress modeling agrees with the experimental observations.

Observations of tomb interiors and exterior revealed that the exposure type is another important factor in sandstone decay rate at Petra. High recession rates were observed on external surfaces shielded from direct rain but exposed to intense evaporation and temporary inflows of salt-carrying storm water. On the contrary, tomb interiors are often unaffected by decay despite abundant salt deposits, probably because of the absence of periodic saturation or lack of rapid drying by insolation. To properly delineate the endangered zone of monuments, the potential damage caused by weathering agents should be combined with stress modeling and verified by real damage mapping.

Our multi-approach study clearly documented that stress is an essential factor for controlling weathering rates of Petra monuments, with an inverse relationship between stress and decay rates. We concluded that potential effect of stress on weathering should be accounted for in any research dealing with the sandstone decay as even homogenous sandstone exposed to equal intensity of weathering (e.g. the same salt concentration) may decay at different rates solely because of differences in stress magnitude.

## Acknowledgements

This research was funded by the Czech Science Foundation (GA CR No. 13-28040S), the Grant Agency of Charles University (GAUK No. 386815) and supported by the research plan No. RVO 67985831 and RVO 67985891. G.T.C. was supported by a Mentoring Environment Grant from Brigham Young University to Dr. Cynthia Finlayson. We thank Dr. Finlayson and the BYU Department of Anthropology for making the fieldwork possible.

## Appendix A. Supplementary data

Supplementary data associated with this article can be found, in the online version, at <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2015.10.004>.

## References

- [1] B. Fitzner, K. Heinrichs, D. La Bouchardiere, Weathering damage on Pharaonic sandstone monuments in Luxor-Egypt, *Build. Environ.* 38 (2003) 1089–1103.
- [2] D. Mottershead, A. Gorbushina, G. Lucas, J. Wright, The influence of marine salts, aspect and microbes in the weathering of sandstone in two historic structures, *Build. Environ.* 38 (2003) 1193–1204.
- [3] T. Hosono, E. Uchida, Ch. Sudah, A. Ueno, T. Nakagawa, Salt weathering of sandstone at the Angkor monuments, Cambodia: identification of the origins of salts using sulfur and strontium isotopes, *J. Archaeol. Sci.* 33 (2006) 1541–1551.
- [4] H. Siedel, S. Pfefferkorn, E. von Plehwe-Leisen, H. Leisen, Sandstone weathering in tropical climate: results of low-destructive investigations at the temple of Angkor Wat, Cambodia, *Eng. Geol.* 115 (2010) 182–192.
- [5] E. Gerber, A.E. Scheidegger, Stress-induced weathering of rock masses, *Eclologiae Geologicae Helvetiae* 62 (1969) 401–415.
- [6] E. Gerber, A.E. Scheidegger, Erosional and stress-induced landforms features on steep slopes, *Zeitschrift fuer Geomorphologie, Supplement* 8 (1973) 38–49.
- [7] H.A. Viles, Scale issues in weathering studies, *Geomorphology* 41 (2001) 63–72.
- [8] J. Bruthans, J. Soukup, J. Vaculikova, M. Filippi, J. Schweigstillova, A.L. Mayo, D. Masin, G. Kletetschka, J. Rihosek, Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion, *Nat. Geosci.* 7 (2014) 597–601.
- [9] W. Wedekind, J. Ruedrich, Salt-weathering, conservation techniques and strategies to protect the rock cut facades in Petra/Jordan, in: R. Fort, M. Álvarez deBuergo, M. Gomez-Heras, C. Vazquez-Calvo (Eds.), *Heritage, weathering and conservation*, Taylor & Francis, London, 2013, pp. 261–268.

- [10] T.R. Paradise, Sandstone weathering thresholds in Petra, Jordan, *Phys. Geogr.* 16 (1995) 205–222.
- [11] T.R. Paradise, Sandstone weathering and aspect in Petra, Jordan, *Zeitschrift für Geomorphologie* 46 (2002) 1–17.
- [12] T.R. Paradise, Assessment of tafoni distribution and environmental factors on a sandstone djinn block above Petra, Jordan, *Appl. Geogr.* 45 (2013) 176–185.
- [13] K. Heinrichs, Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra, Jordan, *Environ. Geol.* 56 (2008) 653–675.
- [14] T.R. Paradise, Petra revised: an examination of sandstone weathering research in Petra, Jordan, *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 390 (2005) 39–49.
- [15] G. Srijker, G. Bertotti, S.M. Luthi, Multi-scale fracture network analysis from an outcrop analogue: a case study from the Cambro-Ordovician clastic succession in Petra, Jordan, *Mar. Petroleum Geol.* 39 (2012) 104–106.
- [16] O.A. Al-Khashman, Ionic composition of wet precipitation in the Petra region, Jordan, *Atmos. Res.* 78 (2005) 1–12.
- [17] O.A. Al-Khashman, Study of water quality of springs in Petra region, Jordan: a three-year follow-up, *Water Res. Manage.* 21 (2007) 1145–1163.
- [18] G. Delmonaco, C. Margottino, D. Spizzichino, Slope dynamic, monitoring and geological conservation of the Siq of Petra (Jordan), in: C. Viggiani (Ed.), *Geotechnical engineering for the preservation of monuments and historic sites*, CRC Press, 2013, pp. 325–334.
- [19] I. Reynolds, The History and Architecture of Petra, *JCCC Honors Journal* v3(i2) Article 3 (2012), Available at: [http://scholarspace.jccc.edu/honors\\_journal/vol3/iss2/3](http://scholarspace.jccc.edu/honors_journal/vol3/iss2/3).
- [20] A.S. Goudie, P. Migon, R.J. Allison, N. Rosser, Sandstone geomorphology of the Al-Quwayra area of South Jordan, *Zeitschrift für Geomorphologie* 46 (2002) 365–390.
- [21] D. Uličný, Depositional systems and sequence stratigraphy of coarse-grained deltas in a shallow-marine, strike-slip setting: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic, *Sedimentology* 48 (2001) 599–628.
- [22] J. Bruthans, D. Světlík, J. Soukup, J. Schweigstillová, J. Válek, M. Sedlackova, A.L. Mayo, Fast evolving conduits in clay-bonded sandstone: characterization, erosion processes and significance for origin of sandstone landforms, *Geomorphology* 177–178 (2012) 178–193.
- [23] M.B. Dusseault, N.R. Morgenstern, Locked sands, *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.* 12 (1979) 117–131.
- [24] A. Cresswell, W. Powrie, Triaxial tests on an unbonded locked sand, *Geotechnique* 54 (2004) 107–115.
- [25] T.S. Abdelaziz, C.D. Martin, R.J. Chalaturnyk, Characterization of locked sand from Northeastern Alberta, *Geotech. Test. J.* 31 (2008) 480–489.
- [26] A.W. Cresswell, Block sampling and test sample preparation of locked sands, *Geotechnique* 51 (2001) 567–570.
- [27] N.P. Richards, M.E. Barton, The Folkestone Bed sands: microfabric and strength, *Q. J. Eng. Geol.* 32 (1999) 21–44.
- [28] K. Arulanandan, R.T. Heinzen, in: IAHS-AISH, UNESCO (Eds.), *Erosion and solid matter transport in inland waters*, 122, 1977, pp. 75–81 (Adlard & Son Ltd, Dorking, 1977).
- [29] EN 12370 Natural stone test methods – Determination of resistance to salt crystallization. European standard EN12370:1999, European Committee for Standardization, 1999.
- [30] G. Kirchner, *Phisikalische Verwitterung in Trockengebieten unter Betonung der Salzverwitterung am Beispiel des Basin-and-Range-Gebiets (Südwestliche USA and Nördliches Mexiko)*, Mainzer Geographische Studien, Geographisches Institut der Johannes Gutenberg-Universität 41 (1995), 267 pages.
- [31] T. Lombardo, E. Doehne, S. Simon, The response of NaCl and Umm Ishrin sandstone to humidity cycling: mechanisms of salt weathering, in: *The 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Stockholm, 27 June–2 July 2004, 2004.

Contents lists available at [ScienceDirect](https://www.sciencedirect.com)

# Earth-Science Reviews

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/earscirev](http://www.elsevier.com/locate/earscirev)

## Arcades: Products of stress-controlled and discontinuity-related weathering

 Michal Filippi<sup>a,\*</sup>, Jiří Bruthans<sup>b</sup>, Jaroslav Řihošek<sup>b</sup>, Martin Slavík<sup>b</sup>, Jiří Adamovič<sup>a</sup>, David Mašín<sup>b</sup>
<sup>a</sup> Institute of Geology of the Czech Academy of Sciences, Rozvojová 269, 165 00 Prague 6, Czech Republic

<sup>b</sup> Faculty of Science, Charles University, Albertov 6, 128 43 Prague 2, Czech Republic

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Arcades  
Cavernous weathering  
Discontinuity  
Pillar  
Stress  
Sandstone  
Granite rock stress

### ABSTRACT

Weathering patterns on sandstone cliff faces and sloping surfaces were studied from the viewpoint of gravity-induced stress combined with the presence of planar discontinuities in the rock. Critical evaluation of hundreds of photos taken in various regions around the world, numerical modelling using finite element method (including automatic stress-controlled element removal technique of erosion modelling), and physical in situ modelling of friable sandstone revealed the formation of a specific sub-group of weathering forms related to planar discontinuities. Due to their striking similarity with elements known from architecture, these pits are introduced as “arcades” or arcade-like forms. These pits and cavities vary in size but they are similar in shape, coalesced into “trains” along the discontinuities, and separated from each other by hourglass-shaped pillars. In their origin and geometry, these forms differ from widely known cavernous weathering forms such as honeycombs and tafoni. We have shown that arcade shape and size are controlled by the redistribution of gravity-induced stress along planar discontinuities and the resulting stress shadows. The stress shadow zones along the discontinuities are characterized by material loss owing to various weathering and erosional mechanisms. Although overlooked as yet, stress-controlled weathering along discontinuities has a strong effect on rock surface morphology, and arcades can be taken as its principal example.

## 1. Introduction

### 1.1. Cavernous weathering forms and other cavities on cliff faces – a brief review

Cavernous weathering is understood as unifying term for weathering/decay processes which produce hollows and recesses on the rock surface, especially on cliff faces and sloping surfaces (cf. [Mustoe, 1982](#); [Turkington and Phillips, 2004](#); [Viles, 2005](#)). Cavernous weathering features have been noted since the mid 19th century ([Bischof, 1844](#); [De Prado, 1864](#); [Hettner, 1887](#); [Kvelberg and Popoff, 1938](#); [Klaer, 1956](#); [Wilhelmy, 1964](#)). Cavernous weathering is typical for sandstone, granite, but also for other rocks like conglomerates or tuffs, and occurs throughout the world ([Paradise, 2013](#)). At present, two cavernous weathering forms – honeycombs and tafoni – are commonly distinguished in the literature (e.g., [Mustoe, 1982](#); [Sunamura, 1996](#); [McBride and Picard, 2004](#); [Migoń, 2006](#); [Urban and Górník, 2017](#)). The term **honeycombs** (also *alveoli*, *lacework*, *stonelace*, *fretting*) is mostly used for a cavernous rock surface featuring a dense cell-like pattern with hollows of rather small sizes (commonly reaching max. 10 cm in diameter) separated from their neighbours by thin walls/“lips” ([McGreevy, 1982](#); [Twidale, 1982](#); [Viles, 2001](#)). Honeycomb pits display

a variety of shapes ranging from perfectly oval to rather sharply bordered, more or less distinctly polygonal. **Tafoni** (singular *tafoni*) are larger hemispherical, ellipsoidal to lobate cavities (niches) of various sizes, usually between a few tens of centimetres and several metres. If in groups, they are separated from one another by positive relief called walls or visors (e.g., [Mustoe, 1982](#)).

The origin and diversity of cavernous weathering forms are still an unsolved puzzle in some aspects ([Paradise, 2013](#); [Mol, 2014](#); [Inkpen and Hall, 2016](#)). However, salt precipitation controlled by capillary water flow and evaporation (“hydraulic hypothesis”) is commonly considered to be the most important process ([Williams and Robinson, 1981](#); [Mustoe, 1982](#); [Conca and Astor, 1987](#); [Rodríguez-Navarro et al., 2000](#); [Goudie et al., 2002](#); [Smith et al., 2005](#); [Ruedrich and Siegesmund, 2006](#); [Steiger et al., 2011](#)). Nevertheless, some authors formulated ideas on endogenous origin of cavernous weathering ([Vidal-Román, 2008](#)) or cavity initiation in subsurface ([Roqué et al., 2013](#); [Klimchouk, 2017](#)). The development of honeycombs and tafoni was mathematically modelled by [Huinink et al. \(2004\)](#) whose theory was recently supported by experiments and field measurements ([Schnepfleitner et al., 2016](#); [Bruthans et al., 2018](#)). It was shown that if moisture inflow from the rock interior is high with respect to potential evaporation, evaporation and salt crystallization dominates on

\* Corresponding author.

E-mail address: [filippi@gli.cas.cz](mailto:filippi@gli.cas.cz) (M. Filippi).

protrusions and rocks surface is smoothed. In contrast, if moisture inflow from rock interior is low, rock surface becomes dry and moisture continues to evaporate only in incipient pits, enlarging them into cavities arranged into a honeycomb pattern. Goudie et al. (2002), however, documented that rainwater is important where it washes the surfaces of tafone visors (moreover, evaporation is fast on tafone visors due to sun irradiation). In such cases, rainwater preferentially dissolves any easily soluble salts, increasing the durability of the visors. In contrast, salts in the tafone cavities are not dissolved by rainwater and, moreover, evaporation is usually slow in cavity interiors protected from sun. As a result, salt weathering is more efficient in the cavities. Besides salt weathering, chemical dissolution, frost weathering, thermal/moisture changes and case hardening are the other processes reported to contribute to the origin of honeycombs and tafoni (Conca and Rossman, 1985; Mottershead and Pye, 1994; André and Hall, 2005; Paradise, 2013; Huang and Wang, 2017).

Besides honeycombs and tafoni, other types of hollows of different origin can be distinguished on the surface of sandstone and some other granular rocks. Leaving aside cavities caused by the action of living organisms (Hasiotis, 2004) and gnammas – basins on horizontal surfaces (Paradise, 2013), other specific forms should be mentioned. The formation of spherical cavities on vertical gas-escape paths in sandstones of the Góry Stołowe, central Europe, was suggested by Dumanowski (1961) and Wojewoda (2012). Symmetrical cavities from several European sandstone regions have been reviewed by Adamovič et al. (2015) and recognized as resulting from the dissolution of carbonate cement within the limits of former concretions. Bryant et al. (2016) reported erosional pockets produced by preferential erosion along a 2 cm-thick zone of eluviation following a horizontal fluid-escape pathway in the Navajo Sandstone, Arizona. All the above mentioned cavities partly resemble cavernous weathering forms, notably tafoni, but are not discussed in this study as having a specific origin.

### 1.2. Factors controlling the distribution and geometries of honeycombs and tafoni

If a rock mass is structurally and lithologically homogeneous, both honeycombs and tafoni tend to form more or less irregular pattern and are mostly circular, oval to lobate on the surface of the cliff face as well as in sections perpendicular to it (Mustoe, 1982, 2010; Goudie, 2013; Figs. 1 and 2). In vaulted portions of the rock mass, the honeycombs may be considerably elongated in the direction of principal stress (Mikuláš, 2001). In general, however, the distribution of cavities is “irregular” (cf. McBride and Picard, 2000). Doe (2015) pointed out a similarity between a honeycomb-covered surface and a surface divided by Thiessen polygons in a 2D planar projection.

Sandstone is, however, never truly homogeneous. The distribution of ferruginous or silica cement is typically uneven. Even more importantly, the rock mass is segmented by sedimentary or tectonic features, herein referred to as “planar discontinuities”. Typical examples of such discontinuities include unconformities, bedding planes and clinofolds, cross-bedding foresets, joints and faults. Planar discontinuities also develop by weathering along mud or carbonate-rich interbeds. As for the role of planar discontinuities during weathering, two general situations can be outlined.

i) If the rock along the discontinuities is more resistant to weathering than the thicker strata between them (due to, e.g., cementation, specific grain size, faster drying or lower moisture content), it tends to form slightly protruding ledges, and the cavernous weathering forms (if present) are limited to areas between the ledges. In such case, the pits are arranged in rows parallel to, but not crossing, the discontinuities (e.g., Kulič, 1983; Mikuláš, 2007; Adamovič et al., 2010; Mustoe, 2010; Doe, 2011). Particular pits are often truncated by the ledges. Alternatively, they slightly interfere with them making their courses wavy (Fig. 3; see also figure 4d in Urban and Górník, 2017).

Planar discontinuities could also act as limits for enlargement of

cavernous weathering forms as was observed by McBride and Picard (2000) who documented stopping of tafoni growth at joints.

In the above mentioned cases, planar discontinuities control the distribution and geometries of the pits to a certain degree, however, they are not directly responsible for their origin.

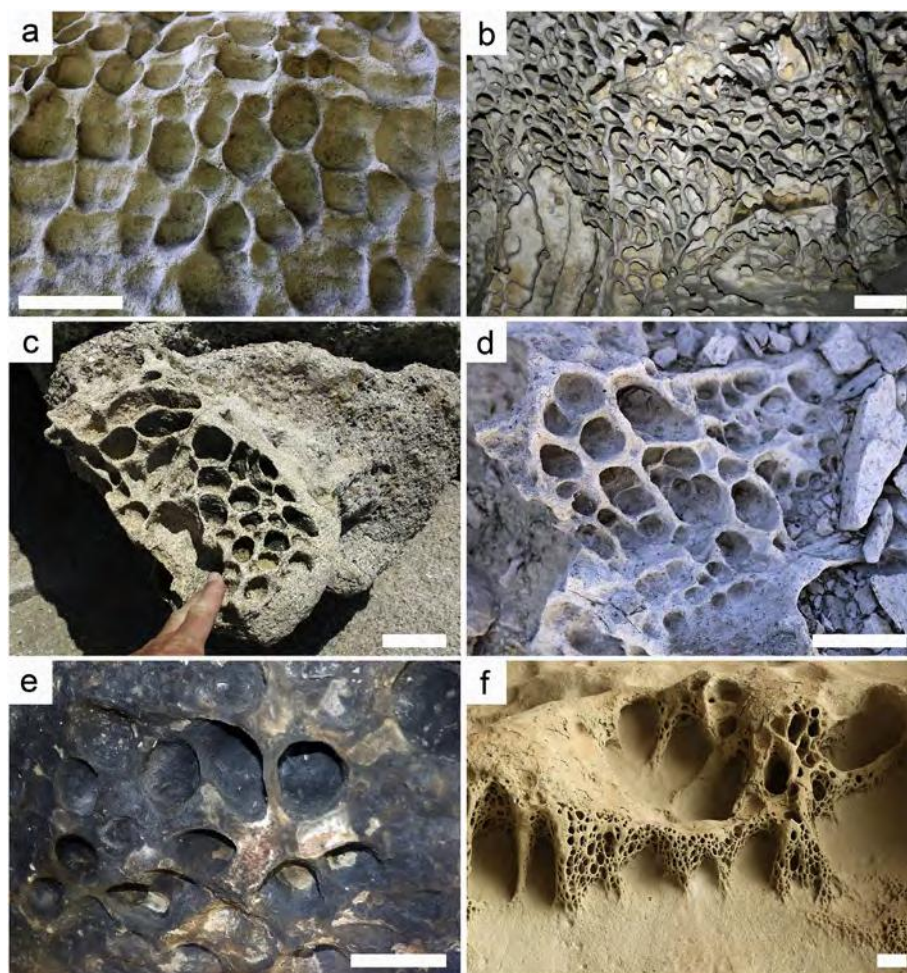
ii) Much more often, planar discontinuities are highlighted by zones of enhanced rock disintegration and manifest themselves as notches. This has been explained by their function of transport pathways for water flowing from the cliff interior towards the cliff face (Sunamura, 1996; Young et al., 2009; Mol and Viles, 2010; Worthington et al., 2016). According to Bruthans et al. (2014), rock weakening along planar discontinuities is a result of a considerable reduction of gravity-induced rock stress (referred to as stress in the text below) along the discontinuity. Stress has been shown to be an important factor for the stability and shaping of sandstone landforms (Bruthans et al., 2014; Ostanin et al., 2017) and for the durability of artificial sandstone monuments (Rihosek et al., 2016). Stress also plays an important role in stabilization of fresh sandstone surfaces before they are indurated by biologically-initiated rock crust, which most probably precedes the development of case hardening (Slavík et al., 2017). Nevertheless, only a few authors have previously assumed gravity and rock-orientated stress to be a controlling factor for shaping of small weathering forms (e.g., Mikuláš, 2001; McBride and Picard, 2004).

### 1.3. Existence of a discontinuity-related weathering form?

Weathering forms tightly linked with planar discontinuities can be observed all around the World. They vary in size but usually have similar shapes different from those of honeycombs and tafoni. Surprisingly, no scientific study to our knowledge has been conducted to seriously document the relationship between cavernous weathering forms and planar discontinuities. Some of the wide range of weathering forms related to discontinuities have been only briefly mentioned in a few previous papers. Photographs of such forms were presented, e.g., by Häberle (1911), Wilhelmy (1958) and Rast (1959). They were variously called “parallel or rhythmisch gerichtete Bröckellöcher” (i.e., parallel or rhythmic-ordered pellet-holes), “Sandurhenhorizont” (i.e., a horizon of hourglass-shaped pillars), “Auswitterungskerven” (i.e., weathering into toothed ledges) or “Säulengänge mit sanduhrförmigen Pfeilern” (i.e., arcades with hourglass-shaped pillars). Most of the previous authors, however, ranked the discontinuity-related forms within honeycombs or tafoni.

Oberlander (1977), who studied cliffs in massive sandstones in Utah, described “horizontal lines of discontinuous weathering pits” and termed them “seam lines”. He explained their origin by poor cementation. Wyckoff (1999) presented a nice example of cavernous forms along discontinuities (upper left figure on page 58) and explained them, providing no evidence, by groundwater flow along bedding planes which dissolves natural cement. Within the description of honeycombs, Mikuláš (2001) mentioned “chains of pits” along a fracture. Similarly, Robinson (2007) observed that seepage of water frequently causes decay and erosion of the sandstone at places where bedding planes intersect the cliff face, leading to the formation of cavities. These cavities may coalesce to produce a continuous cleft with pillars (figure 9 in Robinson, 2007). Also Siedel (2010) and Doe (2011) observed that honeycombs develop along the bedding planes with transitions to weathering out of bedding structures.

However, no explanations were given on how water dissolves “cement” only at places where the bedding planes intersect the cliff face and form rather shallow and regularly distributed pits bounded by pillars instead of larger and deeper channels or even networks draining the sandstone as it is common in soluble rocks (caves). Such weathering forms are common in quartz sandstones free of carbonate cement or in granite and some other granular rocks (see below) where carbonate cement cannot play a crucial role. Recently, Urban and Górník (2017) in Figure 2c, presented a typical example of discontinuity-related



**Fig. 1.** Honeycombs from various rocks and climatic zones: a) rather shallow honeycombs in friable sandstone, Apolena Rock City, CZ; b) relatively deep honeycombs in sandstone, Drábovna, Bohemian Paradise, CZ; c) honeycombs on a horizontal surface of granite, Punta di Campomoro, Corse, France; d) honeycombs on a horizontal surface of rhyolite tuff, Topaz Mountain, Thomas Range, Utah, USA; e) honeycombs on quartzite, Magnet Cave, South Africa; f) honeycombed surface on pillars/visors of small tafoni, fine-grained sandstone, Golden Gate National Park, South Africa. Scale bars 10 cm.

weathering forms but did not discuss their origin and only sorted them as one of the weathering forms derived from ledges with wedge-shaped furrows separated by hourglass forms. Mustoe (2010) suggested a possible difference between honeycombs and “other cavities” realizing that lithologic features may control the distribution pattern of cavities on cliff faces.

Only recently, the work of Bruthans et al. (2014) clearly revealed the substantial effect of discontinuities on stress redistribution and on the origin of arch-/arcade-like forms on cliff faces (see other citations of this work below). Among other previous papers, the study of Alexandrowicz (1970) is – to our knowledge – the only one dealing more extensively with this phenomenon. In her Polish-written paper, Alexandrowicz described “struktury arkadowe” (arcade-like structures) “oddzielone od siebie kolumnkami” (separated from each other by small columns). After Wilhelmy (1958), this was the second use of the term “arcades” in the geomorphological literature. Alexandrowicz also presented several photos of these forms showing various sizes of pits and mentioned the relation of these forms to bedding planes, where water seeping from sandstone subsurface is more voluminous compared to the rest of the cliff face. Alexandrowicz (1970) also cited other Polish authors who dealt with these forms and separated them (under various names) from honeycombs (Klimaszewski, 1932; Czepe, 1952).

In line with some German and Polish authors we consider these forms to be well discriminated from honeycombs, tafoni or any other forms and adopt the term arcades or arcade-like forms for them (see

Fig. 4).

#### 1.4. Purpose of the study

Based on the arguments above we propose the existence of a specific stress-controlled weathering form associated with planar discontinuities. In its morphology, it resembles “arcades” as an element in human architecture. The purpose of this study is to introduce arcades as a widespread weathering form on sandstone and some other rocks, specifically i) to briefly review the current state of knowledge of cavernous weathering forms to substantiate the erection of arcades, ii) to describe arcades from various lithologies and climatic settings in nature and in masonry, iii) to explain the origin of arcades via numerical modelling, and iv) to generate arcades via physical modelling on natural sandstone.

We do not follow the suggestion of Groom et al. (2015) to use tafoni as a universal term for all cavernous weathering forms, and we keep the established (although relatively vague) division into honeycombs and tafoni. As will be shown in the text below, a comparison of these forms helps us to better show the specificity of the arcades.



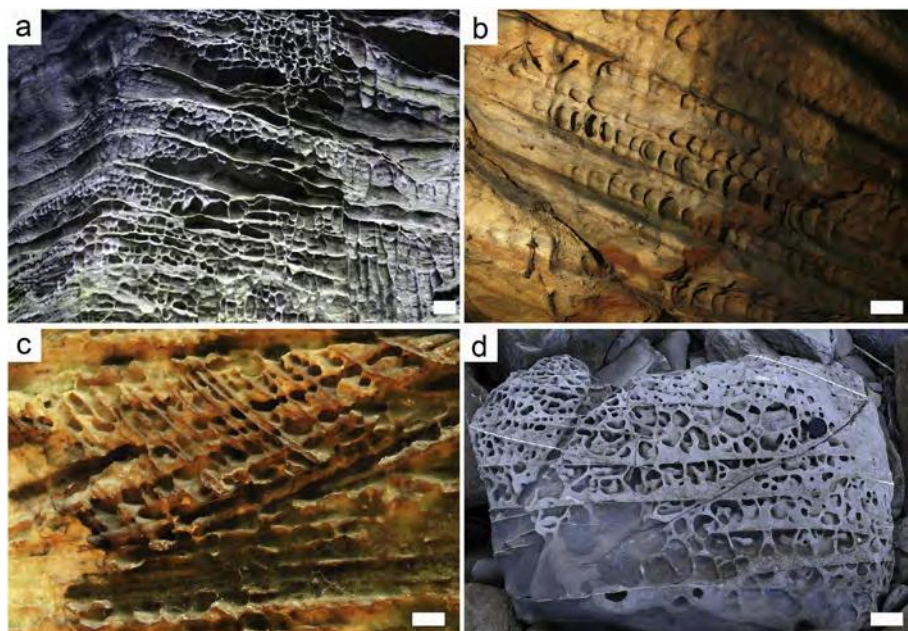
**Fig. 2.** Tafoni from various rocks and climatic zones: a) and b) typical tafoni consisting of salt-free case-hardened visors and “freshly-exposed” interiors affected by salt precipitation on subarkoses from Dvořákova Stezka near Kralupy, CZ (a) and on sandstone, Colorado River-Narrow Canyon, Utah, USA (b); c) tafoni with prominent visors on sandstone, Petra area, Jordan; d) typical tafoni morphology on a sandstone cliff, Wadi Rum, Jordan; e) the distribution of tafoni on rhyolite ash-flow tuff is probably governed by its internal structure, however, no apparent discontinuities are present to induce evolution of arcade-type cavities (see other figures), Crystal Peak, Utah, USA; f) large tafoni limited by boulder edges, Punta di Campomoro, Corse, France. Scale bars 1 m.

**2. Methods**

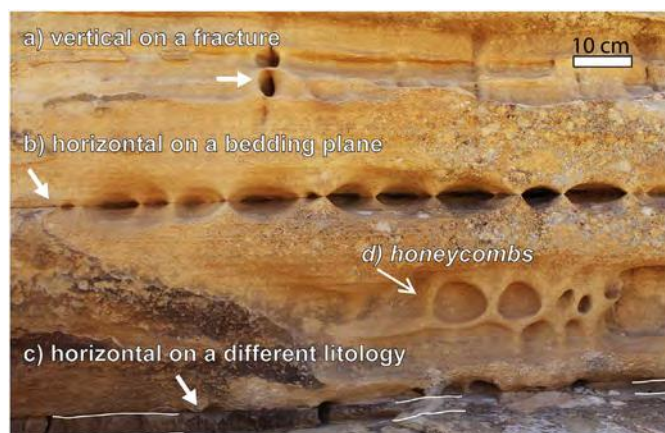
**2.1. Field observation**

Evaluation of extensive field photographic documentation of cavernous weathering forms was taken as a relevant approach within a

geomorphological study (Bryant et al., 2016). Documentation of such forms was gathered in sandstone areas located in various geological and climatic settings across the World. More than 20 areas in Europe, North America, South Africa and Asia were visited and documented (Table 1); photographs from other parts of the World were also taken into consideration. A special attention was given to friable sandstone (or, locked



**Fig. 3.** Honeycombed surfaces where discontinuities give rise to positive relief (ledges) as they are indurated/cemented. Note that the cavities have irregular outlines not symmetrical about the discontinuity. The discontinuities with protruding morphologies are represented by: a) subhorizontal bedding planes, sandstone, Kokořín and Doksy area, CZ; b) clinoforms slightly cemented by iron oxyhydroxides, sandstone, Drábské Světničky, CZ; c) clinoforms and cross-bedding foresets cemented by iron oxyhydroxides, sandstone, Drábské Světničky, CZ; d) tectonic fractures with quartz veins, sandstone, Populonia by Piombino, Italy. Scale bars 10 cm.



**Fig. 4.** The two clearly different weathering forms on a sandstone cliff face. Arcades are related to discontinuities of various types: a vertical tensional fracture (a), a horizontal tectonized bedding plane (b) and a horizontal iron-rich mudstone bed (c, highlighted by white lines). “Classical” honeycombs are not related to any discontinuities (d). “Umm Sayhoun” Village, Wadi Musa, Petra, Jordan.

sands; Richards and Barton, 1999) naturally exposed in the Apolena Rock City and extracted in the neighbouring Střeleč Quarry (Bohemian Paradise area 75 km NE of Prague, Czech Republic). The whole area is rich in outcrops of very pure, weakly cemented marine quartz sandstone belonging to the Hrubá Skála Member of the Teplice Formation of Cretaceous age. Sandstone is composed dominantly of fine- to medium-

size angular quartz grains (95–99%). Fine fraction content (particles smaller than 25  $\mu\text{m}$ ) is 1.4% and is composed of well-ordered kaolinite (75%), quartz (24%) and illite (1%) with no carbonate (Bruthans et al., 2012). Sandstone is characterized by extreme contrast of tensile and compressive strengths due to grain interlocking. Uniaxial compressive strength is 2.7–3.2 MPa. Its tensile strength is 2–4 orders of magnitude lower than its compressive strength (Bruthans et al., 2014).

More detailed characteristics of the rock were given by Bruthans et al. (2012, 2014), Rihosek et al. (2016) and Slavík et al. (2017). The wide exposure of friable sandstone in the Střeleč Quarry makes this area a unique natural laboratory for geomorphological studies. Besides the sandstone outcrops in situ, ancient masonry walls built from sandstone ashlar were also found relevant for this study.

## 2.2. Sampling and solid phase identification

Rock samples were collected in quarries and in areas outside nature reserves. Cores 30–80 mm in diameter were drilled along planar discontinuities in the Střeleč Quarry faces and in outcrops in the Kokořín and Doksy area, Bohemian Cretaceous Basin (Czech Republic). As the cores often split into two pieces along the discontinuity during their removal from the cliff face, fixing of the cores was made as follows. A drill bit 50 mm in diameter was first used to drill a hole about 50 mm deep (core not yet separated). The drill hole with the core in situ was then impregnated by epoxy along the cylindrical boundary, fixing the two parts together. After setting the epoxy, the core with the impregnated zone was redrilled by a drill bit 80 mm in diameter, and the impregnated core was removed from the cliff face by a chisel.

**Table 1**

Areas/localities of detailed observation and photographic documentation visited for the purpose of this paper.

Rock	Locality, area	Geographical location	Country
Friable sandstone	Střeleč Quarry, Bohemian Paradise	northern Bohemia	Czech Republic (CZ) <sup>a</sup>
Friable sandstone	Apolena Rock City (Střeleč Quarry area)	northern Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Mladějov (Střeleč Quarry area)	northern Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Drábovna, Bohemian Paradise	northern Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Vlčí důl, Příhrazy Rock City, Bohemian Paradise	northern Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Drábské Světničky, Bohemian Paradise	northern Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Zbirohy Castle, Bohemian Paradise	northern Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Nedvězí, Kokořín and Doksy area	central Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Okna, Kokořín and Doksy area	central Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Příhrazy Rock City, Bohemian Paradise	northern Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Malobratřice, Bohemian Paradise	northern Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Adršpašsko-teplické skály Cliffs	northeastern Bohemia	Czech Republic
Sandstone	Broumovské stěny Cliffs	northeastern Bohemia	Czech Republic
Subarkose	Dvořákova Stezka, Kralupy area	central Bohemia	Czech Republic
Friable sandstone	Timna Mt.	southern Israel	Israel
Sandstone	Chiddingly Wood, Sandstone outcrops of the High Weald	East Sussex	United Kingdom (UK)
Sandstone	Harrisons Rocks	East Sussex	United Kingdom
Chalk	Durdle Door	Dorset	United Kingdom
Sandstone	Kurort Oybin	Saxony	Germany
Sandstone	Kelchstein	Saxony	Germany
Sandstone	Góry Stołowe National Park	Sudetes	Poland
sandstone	Echo Canyon, Zion National Park	southwestern Utah	United States (USA) <sup>a</sup>
Sandstone	Arches National Park	eastern Utah	United States
Sandstone	Glen Canyon	southern Utah	United States
Sandstone	Lake Powell National Recreation Area	southern Utah	United States
Sandstone	Colorado River-Narrow Canyon – Powel Lake on crossing with Utah State Route 95	southern Utah	United States
Sandstone	Umm Sayhoun, Wadi Musa	Petra	Jordan
Sandstone	Burda Bridge area	Wadi Rum	Jordan
Sandstone	Populonia, Piombino	western Italy	Italy
Sandstone	Golden Gate National Park	Kwazulu-Natal	South Africa
Quartzite	Berlin Cave, Nelspruit area	Mpumalanga	South Africa
Quartzite	Magnet Cave, Nelspruit area	Mpumalanga	South Africa
Granite	Punta di Campomoro	Corse	France
Rhyolite tuff	Topaz Mountain, Thomas Mountain Range	western Utah	United States
Rhyolite ash-flow tuff	Crystal Peak	western Utah	United States
Granite	Smolný vrch, Jeseníky Mts.	southern Silesia	Czech Republic
Granite	Míchova skála Rock, Českomoravská vysočina Highland	southwestern Moravia	Czech Republic

<sup>a</sup> Abbreviation used for figure captions.



Thin and polished sections were prepared and studied by the OLYMPUS BX51 polarizing microscope. Sample characterization and micro-structural characteristics were performed using the QUANTA 450 (FEI) scanning electron microscope (SEM) equipped with an energy dispersive spectrometer (EDS) system (EDAX, Apollo X) and a photomultiplier detector (PMD) for backscatter electron images (BSE). The samples were cut in sections perpendicular to the surface, impregnated with epoxy, polished and coated with carbon.

Phase identification was made by conventional X-ray powder diffraction analyses (XRD) using the Bruker D8 Discover diffractometer under the following conditions:  $\text{CuK}\alpha_1$  radiation ( $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$ ), data collected in the  $2\theta$  range of  $5\text{--}80^\circ$  with a step of  $0.017^\circ$  and a counting time of 0.8 s at each step. Phase identification was performed with Diffrac Evaluation software (Bruker AXS GmbH, Karlsruhe, Germany; 2016).

## 2.3. Stress and erosion numerical modelling

### 2.3.1. Premises and modelled shapes

Stress and erosion numerical modelling was used to explain the development of arcades and to display the effect of discontinuities on stress distribution in the rock. In constructing and interpreting the models, we utilized the following primary idea of the stress-controlled erosion theory: Stress stabilizes the material irrespective of the weathering/erosion agent (such as rainbeat, frost weathering, salt weathering, etc.). Energy of the erosion agent controls the erosion rate, but not the mechanism itself: a higher stress means a higher resistance irrespective of the process of material removal. For this reason, the models are qualitatively valid for any erosion agent and if the dependency of the rate of erosion on stress is specified correctly via model parameters, then the models are also accurate quantitatively.

We constructed two types of numerical models: “static” models, which merely visualized stress distribution for qualitative identification of areas which are more prone to erosion, and “dynamic” models, where the erosion was actually modelled by removing soil elements from the geometry. In the dynamic models, “critical stress” needs to be specified as a parameter controlling sandstone disintegration. This critical stress depends on the particular erosion agent. In the present work, we selected critical stress value identified by Bruthans et al. (2014) using experiments with the friable Střeleč sandstone submerged in water. Note that this value differs from the critical stress value imposed by artificial rain used in physical modelling in Section 2.4, which has a higher disintegration energy than mere inundation.

Two groups of static models were created: i) rock massif with discontinuities at initial stage of the development of arcades, and ii) rock massif with mature 3D arcades developed along the discontinuities.

The initial stage was modelled using a horizontal hemielliptical indentation representing a planar discontinuity in sandstone redistributing otherwise uniform stress. This follows the results of Bruthans et al. (2014) which showed that cavities (herein referred to as arcade pits) develop at places with low or negative stress (tension) while columns between the pits develop at places with elevated stress (compression). The indentation ratio (pit width/pit depth) was set at 2.

The shapes of arcades were created based on field observation and photographs, in one case also on a 3D photogrammetry model composed of approximately 15 photographs of real arcades (Supplementary Fig. 1). The photographs were taken from different aspects and the 3D model was generated by the Agisoft PhotoScan software. General 3D shapes were constructed from the photos using professional open-source 3D computer graphics Blender software (Hess, 2010). The front face of each model represents the cliff face while other sides of the models represent a transition to the ambient rock massif. In case of well-developed shapes, each model consists of 5 identical arcade pits aligned horizontally to better match real arcades, in which stress effects of individual arcade pits combine. This setting provides a more realistic stress calculation in a massif with a series of arcade pits. Several basic

shapes of arcade pits were modelled such as regular/lenticular, half-lenticular, rhombic and other. The maximum width of the initial indentations and arcade pits was 4 cm.

### 2.3.2. Stress distribution modelling (PLAXIS software)

Numerical modelling of stress distribution (“static” models) was performed using the PLAXIS 3D finite-element software for geotechnical analysis (Brinkgreve et al., 2016). Linear elasticity material model was employed for typical sandstone with the following parameters: dry density  $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , Young modulus  $E = 20 \text{ MPa}$ , and Poisson ratio  $\nu = 0.2$ . Boundary conditions were set as follows: the base was fixed in all directions  $x$ - $y$ - $z$ , right and left sides were fixed along horizontal axis  $x$ , the back side was fixed along horizontal axes  $x$ - $y$ . Boundary conditions for the top side and front side (cliff face) were not constrained. Two variants with different model heights were used in order to provide for a sufficient vertical dimension of the models and to simulate the effect of different thicknesses of the sandstone bed. The two model heights were: i) the width of initial pit indentations multiplied by 2, ii) the width of initial pit indentations multiplied by 6. In both cases, sandstone mass was loaded on its top by stress of 110 kPa, representing 5 m of additional overburden. Model meshes were calculated to comprise approximately 100,000 tetrahedral elements. Effective stress distribution was calculated in one phase by gravity loading of staged construction. Stress distribution was visualized in horizontal and vertical sections of effective stress field perpendicular to the cliff face in both models.

Triangulated cuboids representing portions of the sandstone body, whose front vertical side equalled the cliff face, were used as input shapes of the models. The size of elongated cuboids was  $25 \times 10 \times 7.3 \text{ cm}$  and  $25 \times 10 \times 25 \text{ cm}$  ( $x \times y \times z$ ).

### 2.3.3. Arcade evolution modelling (Tochnog software)

Spontaneous evolution of arcades during weathering (“dynamic” models) was modelled using the Tochnog Professional geotechnical software (a Finite Element program; Roddeman, 2017). The code of the program was supplemented by a custom-made script affecting the modelled shape to simulate the arcade evolution. In each step, a superficial layer of material was automatically removed if the maximum principal stress was lower than the critical value. This critical value was approximated based on experiments by Bruthans et al. (2014) as 2 kPa (compression). Bruthans et al. (2014) have shown that the critical value is also affected by the size of the structure. We interpret this dependency as being caused by grain-scale effects. That is, the size of small natural forms is not several orders of magnitude larger than the size of individual grains. At these scales, grain-scale effects may play a role, affecting the accuracy of the continuum approach. For example, in the experiments we observed creation of “ribs” parallel to the maximum principal stress direction, whose width was similar to the maximum grain size. These ribs may strengthen the sandstone and thus lead to an increase in the critical stress. This effect was, however, not considered in the simulations. The initial stage of arcade development included a horizontal discontinuity of rectangular (semi-elliptical) shape in a rock massif consisting of uniformly distributed cubic elements with an edge of 2 mm. Model dimensions were: 80 mm in length ( $x$ ), 40 mm in width ( $y$ ), and 60 mm in height ( $z$ ); the discontinuity was 40 mm long ( $x$ ), 20 mm deep ( $y$ ) and 2 mm thick ( $z$ ). The rock boundary conditions were set as above. Linear elasticity material model (parameters: dry density  $2.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , Young modulus  $E = 20 \text{ MPa}$ , and Poisson ratio  $\nu = 0.2$ ) and Mohr-Coulomb plasticity model (parameters: friction angle = 0.5 rad, cohesion = 1 MPa and dilatancy angle = 0.2 rad) was used. The model was loaded by gravity and additional vertical stress of 110 kPa at the top surface (ca. 5 m of additional overburden).

## 2.4. Physical modelling

It is complicated or even impossible to replicate cavernous

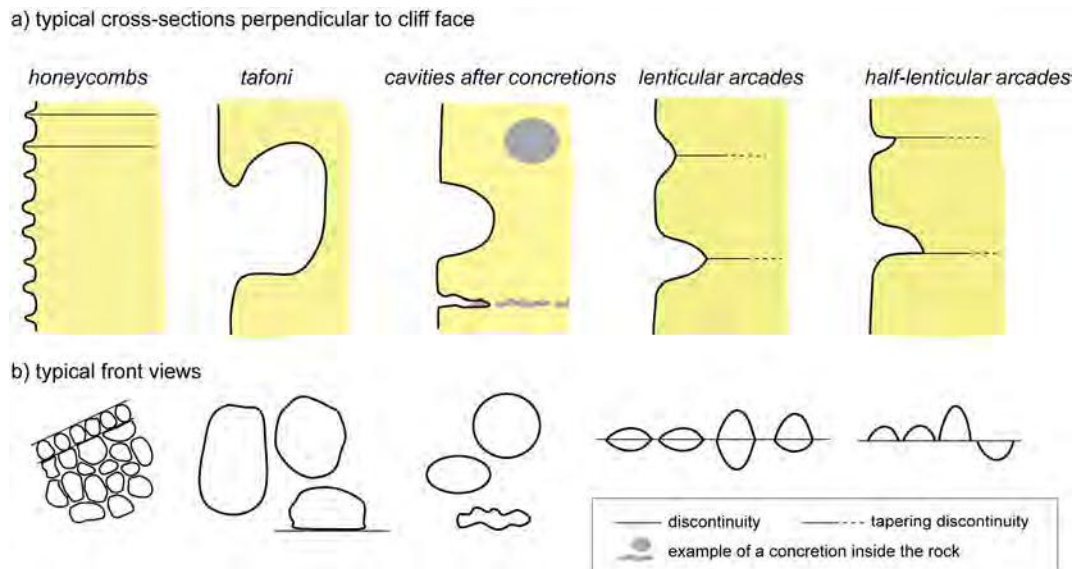


Fig. 5. Typical geometries of common weathering cavities on cliff faces. The geometries are generalized, and only the most distinctive features are presented for each of the phenomena. Possible relationships to discontinuities are shown where typical.

weathering on a natural sandstone face. Besides other reasons, the rate of any reasonable weathering process on a natural cliff face is reduced by the presence of a biologically-initiated rock crust or by case hardening of the rock surface. We therefore used friable sandstone (also, locked sand), which was found to be a suitable material for physical modelling (Bruthans et al., 2014; Rihosek et al., 2016). In situ physical experiments were performed on sandstone exposures in the Střeleč Quarry, Czech Republic. For this study, it is important to note that friable sandstone has specific properties enabling physical experiments and, at the same time, it produces typical weathering forms on natural outcrops in the vicinity of the quarry. Its favourable properties include relatively high compressive strength and the very low tensile strength (see Table 1 in Rihosek et al., 2016). Friable sandstone can be swiftly eroded by running water or raindrop impacts. In the quarry, it is being eroded by processes like slacking, raindrop impacts and sheet flow from low-stress zones and zones under tension (Bruthans et al., 2014, Suppl. Inf.). Friable sandstone in situ contains discontinuities such as sub-horizontal bedding planes, gently dipping bedding planes (clinoforms), joints, etc. Quarrying does not change the properties of friable sandstone in terms of the created weathering forms. This can be proved by the identity of the forms in the quarry with those on nearby natural outcrops as well as by similar values of tensile strength measured in the quarry and on natural outcrops (Bruthans et al., 2012, 2014). Damaged material was removed by prior rain and/or by sawing the outermost material in each experiment. Several types of physical modelling experiments were performed in the quarry. In all cases water was used as an erosion agent. It is important to bear in mind that it is the stress intensity which controls whether the erosion agent is able to remove grains from the sandstone face or not (Bruthans et al., 2014; Rihosek et al., 2016).

In **Experiment A**, sub-vertical faces limited by tectonic fractures exposed along underground conduits were used (C-surfaces in Slavík et al., 2017; for details on conduits see Bruthans et al., 2012). Biologically-initiated rock crust which conserved the fracture surface was removed to expose fresh sandstone. These surfaces were smoothed by a hand saw to eliminate the presence of protrusions or pits. Then, the sandstone face was exposed to a thin sheet of flowing water using a portable pump and a hose with a flow rate of ca. 1 l/s. To simulate sheet flow, water was left to flow freely over the edge of the face. Water represented a fast erosion agent removing portions of the exposed face with lower stress or those in tension.

**Experiment B** made use of freshly exposed sandstone surfaces, where artificial discontinuities were created by a hammerdrill with a drill bit 30 cm long and 10 mm in diameter. Artificial discontinuities were 10 mm high and 0 to 100 mm deep to simulate natural discontinuities which partly transmit stress. Drilled discontinuities were carefully filled by sand. Erosion by heavy rain was simulated by manual watering with a water can. After emptying of each water can, a photo was taken by a tripod-mounted camera. This ensured the same amount of potential erosion between each pair of successive photos/videos.

**Experiment C** made use of freshly exposed sandstone surfaces, where only one artificial discontinuity was created by a handsaw. Artificial discontinuity was up to 20 mm high and 50 mm deep to simulate continual natural discontinuity. Erosion by heavy rain was again simulated by manual watering under the same condition as in the experiment B.

**Experiment D** was performed to test the effect of pore waters seeping from sandstone faces. A small artificial basin was excavated on the upper edge of the friable sandstone blocky segment and slowly filled with water. Seepage-induced changes in the relief of the vertical face below the basin were observed.

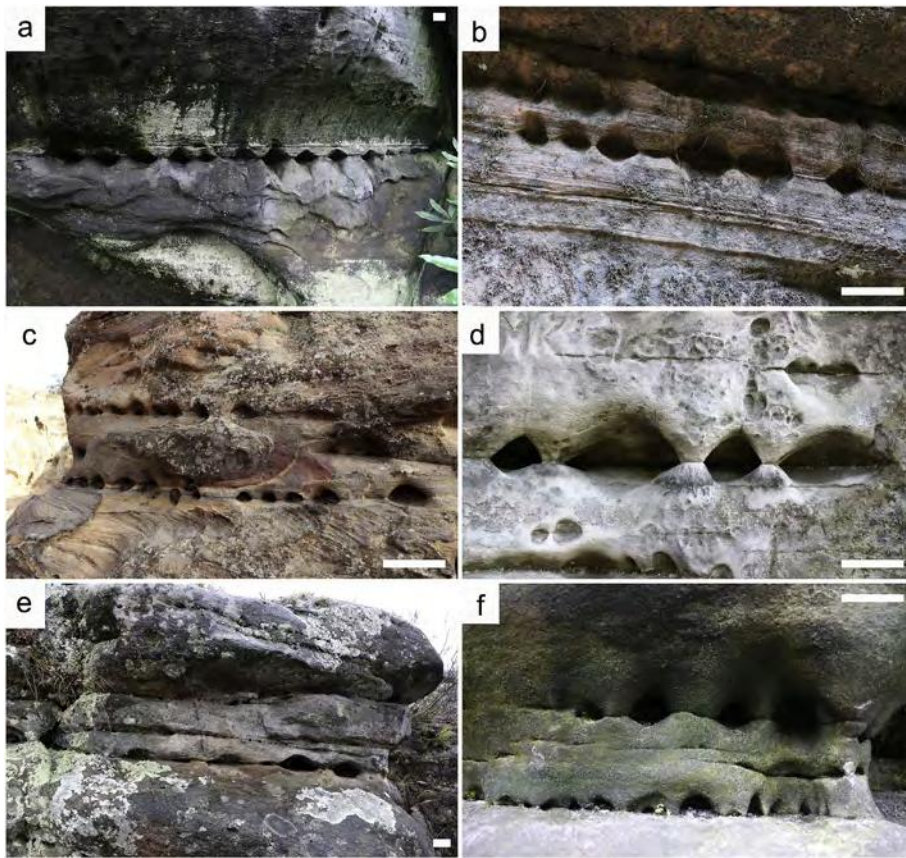
**Experiment E** was actually a set of observations focused on places where the quarry faces were slowly flooded by an artificial lake with a fluctuating water level. Photos of the faces were taken to compare the flooded and not flooded parts of the faces.

### 3. Results

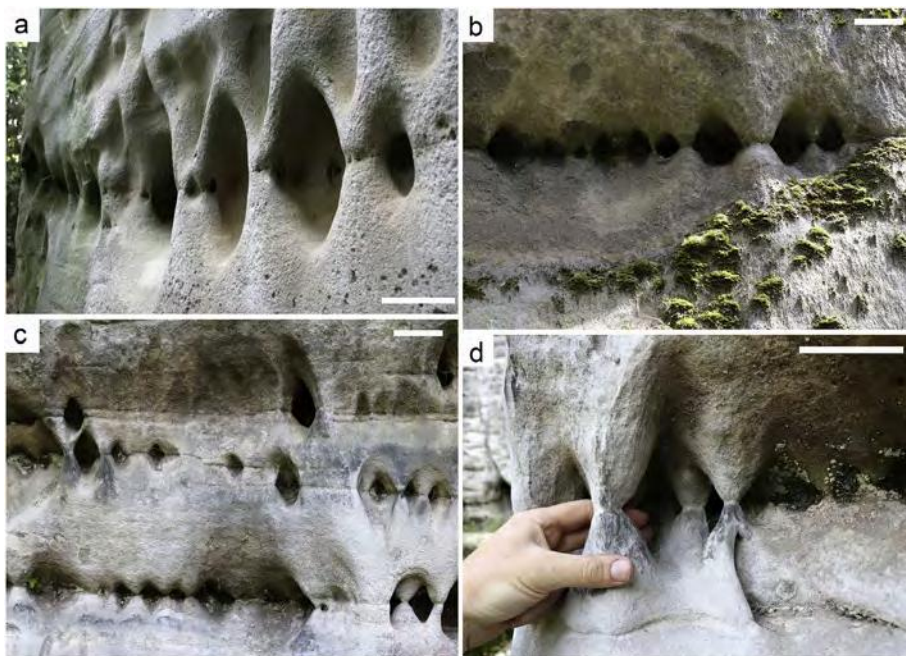
#### 3.1. Arcades: description and differences from honeycombs and tafoni

Arcades are characterized by their tight association with planar discontinuities, arrangement into lines (see below), and their typical shapes in front view and in vertical sections. These features discriminate them from honeycombs, tafoni or any other cavities of various geneses (cf., Figs. 1, 2, and 5). Typical is also the absence of polygonal lips or visors characteristic for honeycombs and tafoni. Individual arcade pits, if densely spaced, are separated by pillars of hourglass shape. Backwalls of the arcades are also characteristic, tapering into the rock massif, as opposed to honeycomb and tafone backwalls, which are rather flat or concave (Fig. 5).

Solitary arcade pits are rare: they are typically clustered into linear-arranged “trains” consisting of several pits with more or less



**Fig. 6.** Well-developed, more or less regular lenticular arcades in sandstones in various settings: a) a sole arcade “train”, Chydingly Wood, UK; b) two distinctive discontinuities in different stages of relief formation: the upper one forms a ledge after the arcade pillars have already been eroded; the lower one still preserves arcade pits, Echo Canyon, Zion National Park, Utah, USA; c) two distinctive discontinuities with regular arcades, Petra area, Jordan; d) lenticular to rhombic arcades with inclined vertical symmetry planes, Apolena Rock City, CZ; e) arcades in quartzites, Berlin Cave, Nelspruit, South Africa; f) a combination of lenticular (upper line) and half-lenticular (lower line) arcades, Harrisons Rocks, UK. Scale bars 10 cm.

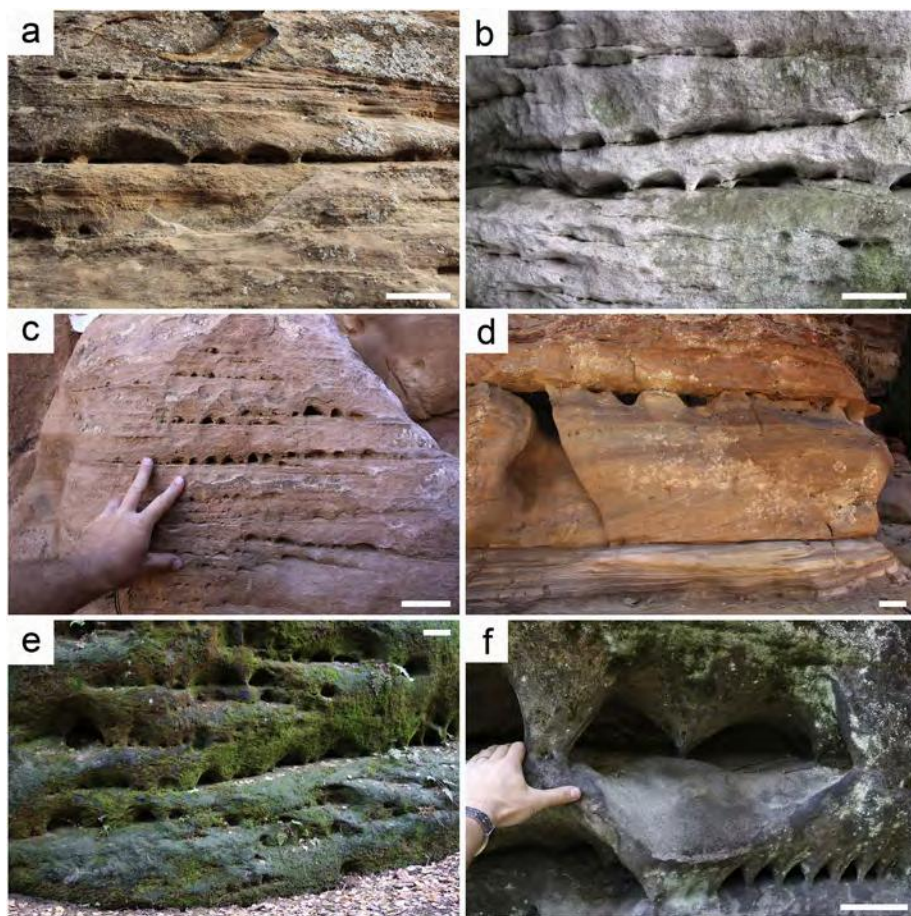


**Fig. 7.** Rhombic arcades in weakly lithified sandstones, sometimes with well-developed pillars: a) lateral view of large rhombic arcades with small pits on pillars and backwalls, Drábské Světničky, CZ; b) downward rounded and upward rhombic arcades, Apolena Rock City, CZ; c) two-sided rhombic arcades; note the prominent pillar at bottom right and coalescing arcades – origin of second-order arcades (for explanation see the text), Apolena Rock City, CZ; d) 3D rhombic arcades with predominant pillars, Apolena Rock City, CZ. Scale bars 10 cm.

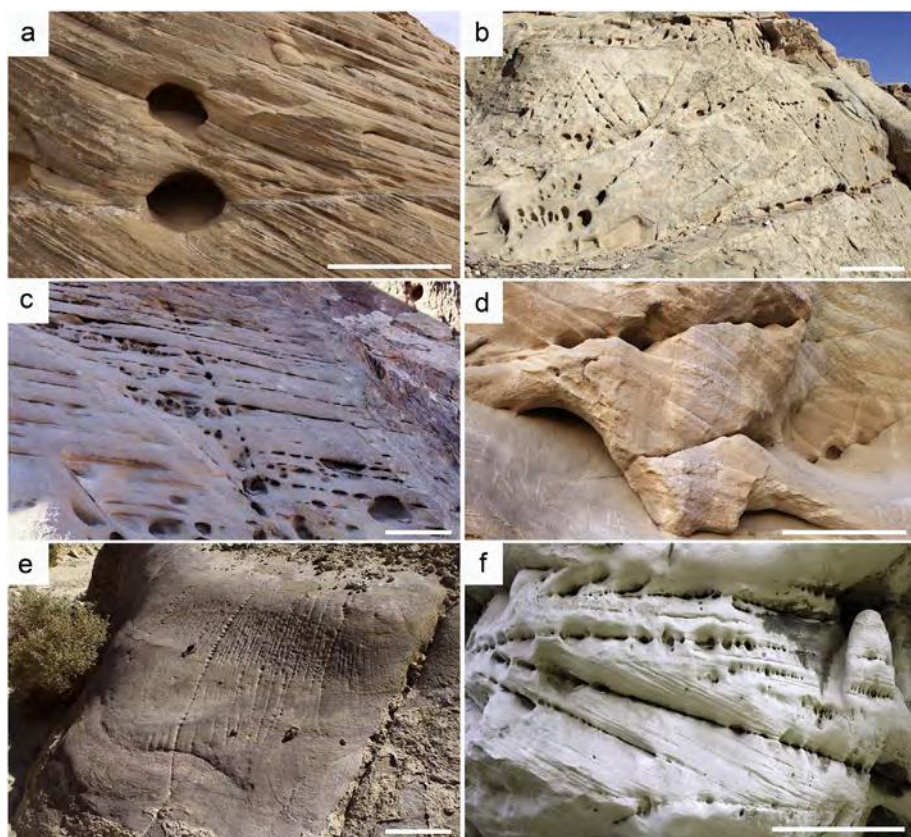
symmetrically developed halves at each side of the discontinuity (Fig. 6). The pits in the “trains” are approximately of equal size but in some cases they are of different sizes. Geometries of the arcade pits, i.e., their outlines on cliff faces, range from low lenticular, ellipsoidal to high oval or rhombic (Figs. 6d, f, and 7). Their outlines are symmetrical with the discontinuity being the plane of symmetry (Fig. 6a, b, c, d). Asymmetrical, half-lenticular forms resembling blind arches are, however, equally common (Figs. 6 and 8).

The frequency and the distribution of arcades on cliff faces vary considerably, depending on the presence of appropriate discontinuities in cliff faces. The arcades are developed on horizontal, inclined but also vertical discontinuities (Fig. 9). Where discontinuities are densely spaced or mutually intersect, the pits may coalesce into larger and more complex cavities. Complex geometries are described in Sections 4.2.4 and 4.2.5.

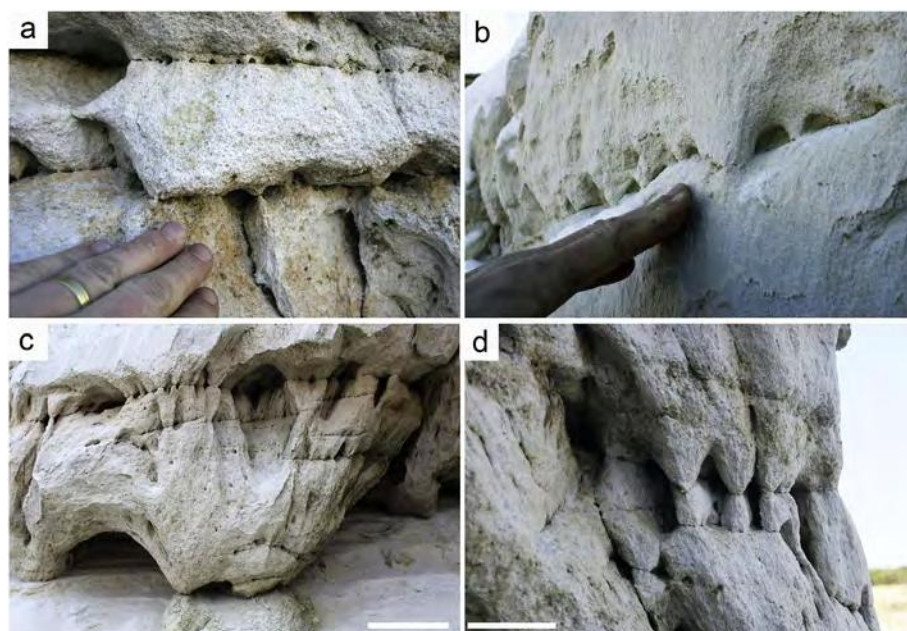
Most of the above mentioned types (possibly stages) of arcades



**Fig. 8.** Half-lenticular arcades in sandstones in various settings: a) upward-vaulted pits, Colorado River-Narrow Canyon, Utah, USA; b) upward-vaulted pits, Góry Stołowe, Poland; c) upward-vaulted pits, Petra, Jordan; d) downward-vaulted oriented pits, Petra area, Jordan; e) upward-vaulted pits overgrown by lichens, Kelchstein, Germany; f) upward-vaulted pits, note the formation of arcade cavity of the “second order”, Apolena Rock City, CZ. Scale bars 10 cm.



**Fig. 9.** Arcades related to discontinuities of various origins and dip angles: a) a pair of arcade-derived cavities with slightly different inclination developed on discontinuities meeting at an angle of approximately 40°; note also the train of small arcades in top right corner of the photo following a discontinuity of the same orientation as the upper cavity, Colorado River-Narrow Canyon, USA; b) inclined trains of arcade pits on fractures in a sandstone cliff face, Petra area, Jordan; c) arcades developed on horizontal bedding planes transected by trains of arcades on vertical fractures, Petra area, Jordan; d) arcades developed in a 3D space – parallel and perpendicular to the cliff face, friable sandstone, Tima Mt., Israel; e) arcades on parallel vertical joints situated on a gently inclined surface, friable sandstone, Tima Mt., Israel; f) arcades on two discontinuities (horizontal bedding and clinofolds) of different orientations; note also the weathering-disconnected pillar, Apolena Rock City, CZ. Scale bars 50 cm.



**Fig. 10.** Various arcades developed on faces of friable sandstone within a few days (a, b) or weeks (c, d) of flooding, Střeleč Quarry, CZ: a) lenticular arcades of different sizes; b) half-lenticular arcades, c) (half-)lenticular to rhombic arcades of variable size and elongation, d) distinctly rhombic arcades. Scale bars 10 cm.

observed in nature were documented to originate on artificial faces of the Střeleč Quarry (see the text below and Fig. 10).

### 3.2. Arcades in historical monuments

The formation of honeycombs and tafoni on blocks of ancient and medieval masonry walls has been widely documented (Mottershead, 1997; Laue et al., 2005; Ludovico-Marques and Chastre, 2012; Dorn et al., 2013). These forms develop on block surfaces and generally avoid chinks in walls. In contrast, arcades are observed (yet as a relatively rare feature) on chinks between the blocks of dry masonry walls or on walls where binding cement weathered into loose, finely granular material (Fig. 11). Masonry walls pose a different environment for cavernous weathering than natural sandstone outcrops. First, their blocks often have random orientation, which makes the lithology discontinuous. Stress distribution in the walls may be equally different from that in a continuous rock body. It can be assumed that ancient builders used relatively tightly fitting blocks to protect the stone against weathering. Secondly, the limited storage capacity of the walls greatly reduces the volume of internal rock moisture, making the water inflow towards the surface rather limited. On the other hand, the external water supply from precipitation is considerable in some cases.

In walls where original binding material is reduced or totally missing, the arcades are more regular (lenticular), i.e., similar to those on natural sandstone faces (Fig. 11a). In contrast, if the binding material is several centimetres thick, the arcades are irregular pits preferably formed in the binding material and partly extending to the blocks (Fig. 11b, c). In humid climate, upper (more exposed to atmospheric influence) parts of the walls usually show stronger effects of arcade-like weathering than the lower, heavily loaded parts. Blocks in the upper parts may get reshaped into small arch-like forms (Fig. 11d).

### 3.3. Microscopy of arcade-related discontinuities

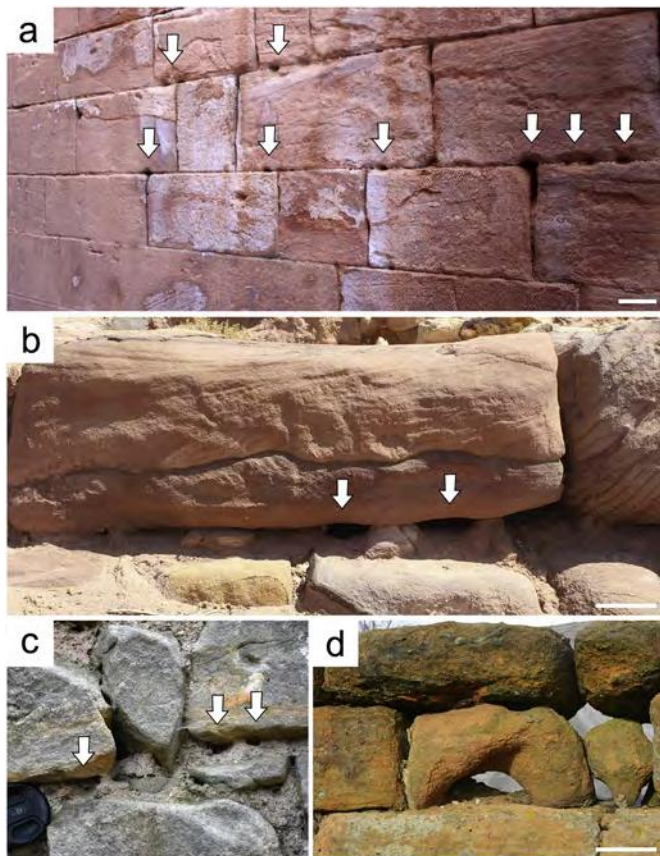
Thin discontinuities (max. a few mm wide) in sandstone with small lenticular to rhombic arcades were sampled in the Střeleč Quarry, and on a natural outcrop at the Okna site (both in the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic, see Table 1). The samples were studied via optical and SEM microscopy on epoxy-stabilized cores.

The observed discontinuities can be characterized as a gently dipping clinoform planes at Střeleč, and as a subhorizontal bedding plane at Okna. A slight tectonization of the planes cannot be excluded. The discontinuities are traceable at least several centimetres into the rock (depth limit of sampled cores) but do not seem to be fully continuous (Figs. 12 and 13). Towards the surface, the discontinuities are usually widened by erosion and/or highlighted by biota (green or brown colour). As revealed by the XRD and SEM studies, both sides of the discontinuities do not differ from the ambient sandstone in their mineral composition. Microscopic observation suggests that the discontinuities never fully separate the sandstone body but are instead bridged by densely packed sand grains every several millimetres. These grains are partly clearly in situ and partly probably represent secondary fill. This ensures a partial stress transfer across the discontinuities. Within all studied cores, no secondary extra mineral cementation was observed along the discontinuities. This clearly suggests that a variation in mineral composition is not a necessary condition for the development of lenticular arcades. However, as was clearly observed on in situ examples of half-lenticular arcades, the cementation by iron oxyhydroxides prevents erosion of the cemented side of the discontinuity (see Section 3.4).

### 3.4. Stress numerical modelling

The “static” numerical model constructed for the initial shape suggests the existence of zones with considerably reduced stress above and below the hemi-elliptical incision/discontinuity, which does not transfer stress (Fig. 14a). Low-stress zones are herein referred to as stress shadows. The model shows that increased stress concentrates to the outer boundary of the incision. Directions of principal stress have the shape of a double-sided arch converging to the outer boundaries of the incision and “bridge” the shadow zones above and below (Fig. 14b). Material from the shadow zones is more prone to erosion compared to zones of normal or increased stress (Bruthans et al., 2014; Rihosek et al., 2016; Bruthans et al., 2017). Combining the modelled shapes of stress shadows and the principal stress directions, formation of a lenticular to oval arcade pit can be predicted after the weakened material is removed by erosion (Fig. 14c).

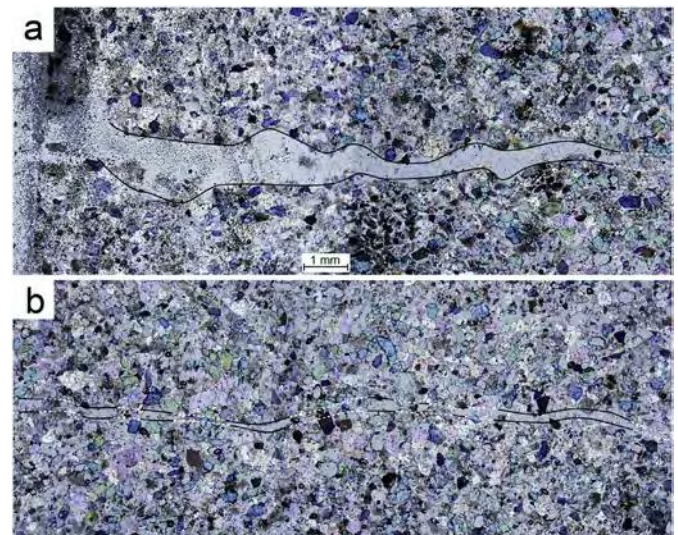
3D shapes of fully developed arcades were reproduced considering



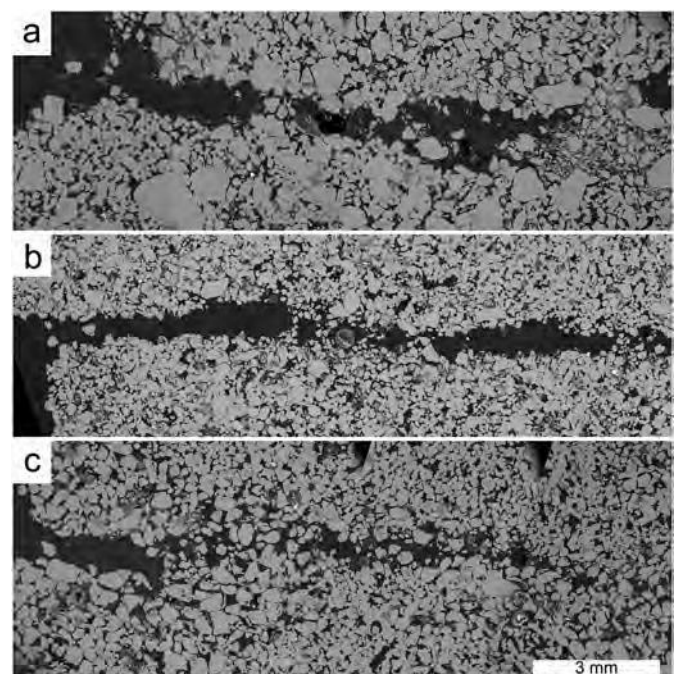
**Fig. 11.** Arcades (indicated by arrows) developed in masonry walls located in different climatic settings: a) and b) represent dry arid environment and c) and d) represent humid environment; a) a wall with no binding cement where lenticular arcade pits are developed directly between sandstone ashlar, Byzantine Church Area, Petra, Jordan; b) a wall with relatively thick cement layers and half-lenticular arcade pits developed in weathered loose cement, a nameless wall approximately 300 m north of Byzantine Church, Petra, Jordan; c) another wall with half-lenticular arcade pits developed in loose cement, Zbirohy Castle, Turnov, CZ; d) upper part of a wall with no binding cement and well-developed half-lenticular arcades/arches in sandstone ashlar; note that the uppermost line is built from ashlar of ferruginous sandstone (“old building wisdom”), Nedvězí, CZ. Scale bars 10 cm.

the observed arcade geometries. A fully developed arcade pit is hemi-ellipsoidal, with an approximate depth of 2 cm, a width of 4 cm and a height of 3 or 10 cm in its front. Models of fully developed (lenticular) arcades display features similar to those of the initial forms. However, the stress shadow zones are considerably reduced in size compared to the initial shape model, and the directions of principal stress are parallel to the vaulted surface of the arcade pit (Fig. 15a, b). This suggests stress-induced stabilization of material on the inner surfaces of the pits along their circumference, especially on margins. Principal stress directions support the development of vaulted pits separated by hour-glass-shaped pillars (Fig. 15b).

Models of two other most common arcade geometries found in nature were created. A model simulating half-lenticular arcades with vaulted upper parts and flat bottoms showed that the upper part displays a small stress shadow and arch-like principal stress directions (Fig. 15c, d). The stress shadow in the basal part, however, is considerably larger than in the upper arcuate part. Also, missing markers of principal stress directions around the flat bottoms suggest the absence of stabilizing stress there. This implies that these forms are not stable with respect to stress-controlled weathering, although they are common in nature (Fig. 8). Hence, another factor supporting their stability must be looked for. Based on field observations, half-lenticular arcades often occur on prominent



**Fig. 12.** A composite photomicrograph showing a section in friable sandstone perpendicular to a discontinuity, sample collected in the Střeleč Quarry, CZ (2 years old face), crossed polars: a) a place where the discontinuity opens to the cliff face; b) a continuation of the discontinuity towards the rock interior (to the right). The black line represents the extent of vacant space and the white dotted line represents the approximate locations of bridges formed by densely packed sand grains.



**Fig. 13.** Composite BSE images showing sections perpendicular to the discontinuities in different sandstones. The cliff face is to the left: a) bedding plane rather coarse-grained sandstone, Okna site, Kokořín and Doksy area; CZ; b) and c) clinoform planes, fine-grained friable sandstone, 2 years old quarry face, Střeleč Quarry, CZ. All photos by J. Schweigstillová.

discontinuities, mostly joint planes indurated by tectonic shear, iron oxy-hydroxides or case hardening (Figs. 6f, 8a, b, d, e). Another option is a stabilization of one side of the discontinuity by a lateral stress component; this was observed in those parts of the Střeleč Quarry where neither case hardening nor indurated horizons were detected.

In all models, the stress distribution suggests that the highest potential for erosion is located in vertical axes of the pits. Based on this

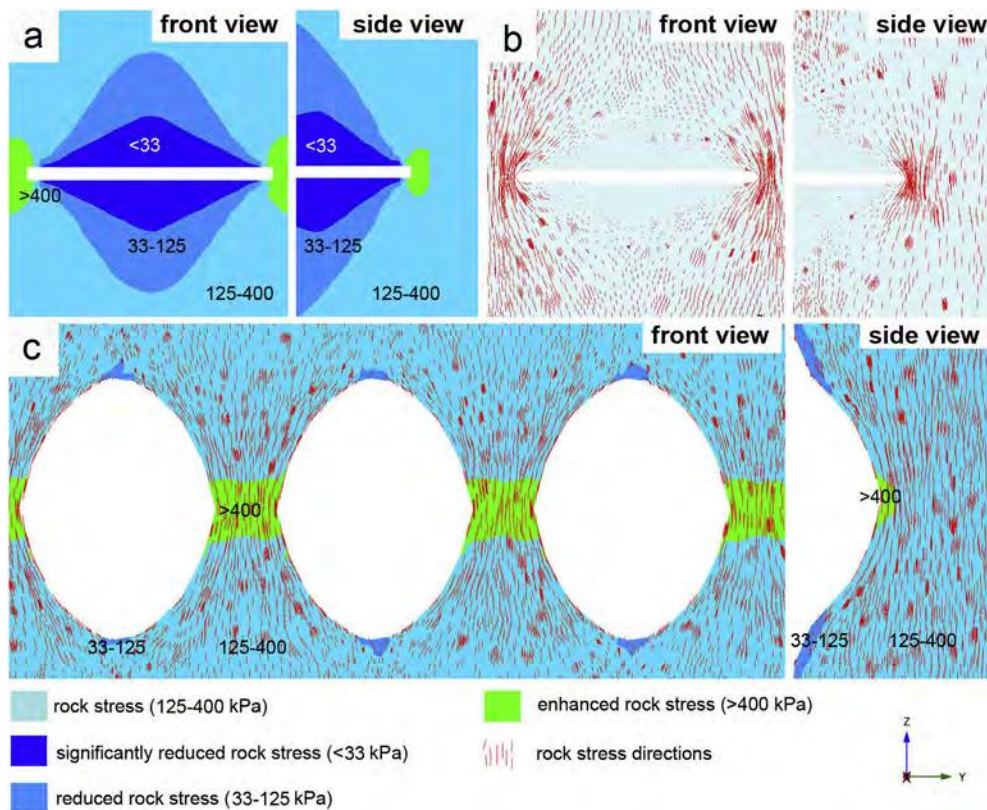


Fig. 14. Results of numerical modelling using PLAXIS software, showing the calculated stress distribution/intensity and directions: a) stress distribution around the initial discontinuity points to the presence of a stress shadow (dark blue), which indicates further evolution into a lenticular shape; b) principal stress directions around the initial discontinuity; c) stress distribution and principal stress directions around fully developed rhombic pits; note that there are no stress shadows any more. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

finding, low lenticular arcade pits should be expected to develop into rhombic ones (oval and vertically elongated) in weak rocks or at places subjected to long-lasting erosion before stability is achieved. Such situation is supported also by the model with elongated arcades in figure 14c. In this model, the stress shadow is already very small, located on top of the pit. The markers of principal stress directions envelope the whole pit, running parallel to its surface. All this implies that oval (rhombic) arcade pits should be considered the most stable ones.

Rock stress is the key factor controlling material removal from specific portions of the rock. As a result, pits of arcade-like geometries are formed in sandstone, stabilizing the cliff faces along planar discontinuities. According to the modelling, the hourglass-shaped pillars between the individual pits should be the most stable parts of the cliff face along the discontinuity. Various geometries of arcade pits, and especially the existence of half-lenticular arcade pits, point to a strong lithological influence on final shaping of the arcades. Results of numerical modelling showed that stress redistribution caused by the presence of a planar discontinuity is the crucial factor controlling the arcade geometries.

Erosional development of a “single” arcade has further been modelled (“dynamic” model) using finite element software Tochnog Professional by means of automatic stress-controlled element removal technique of erosion modelling. Figure 16 and video in Supplementary Video 1 show the initial state with a rock block partially interrupted by an incision. Stress shadow around the incision implies low maximum principal stress. At these conditions, the automatic element removal algorithm removes surface elements, which progressively leads to further stress redistribution and concentration around the incision edge. Material erosion progresses until arching effect around the evolving cavity increases the tangential stress sufficiently to suppress further erosion.

### 3.5. Physical modelling

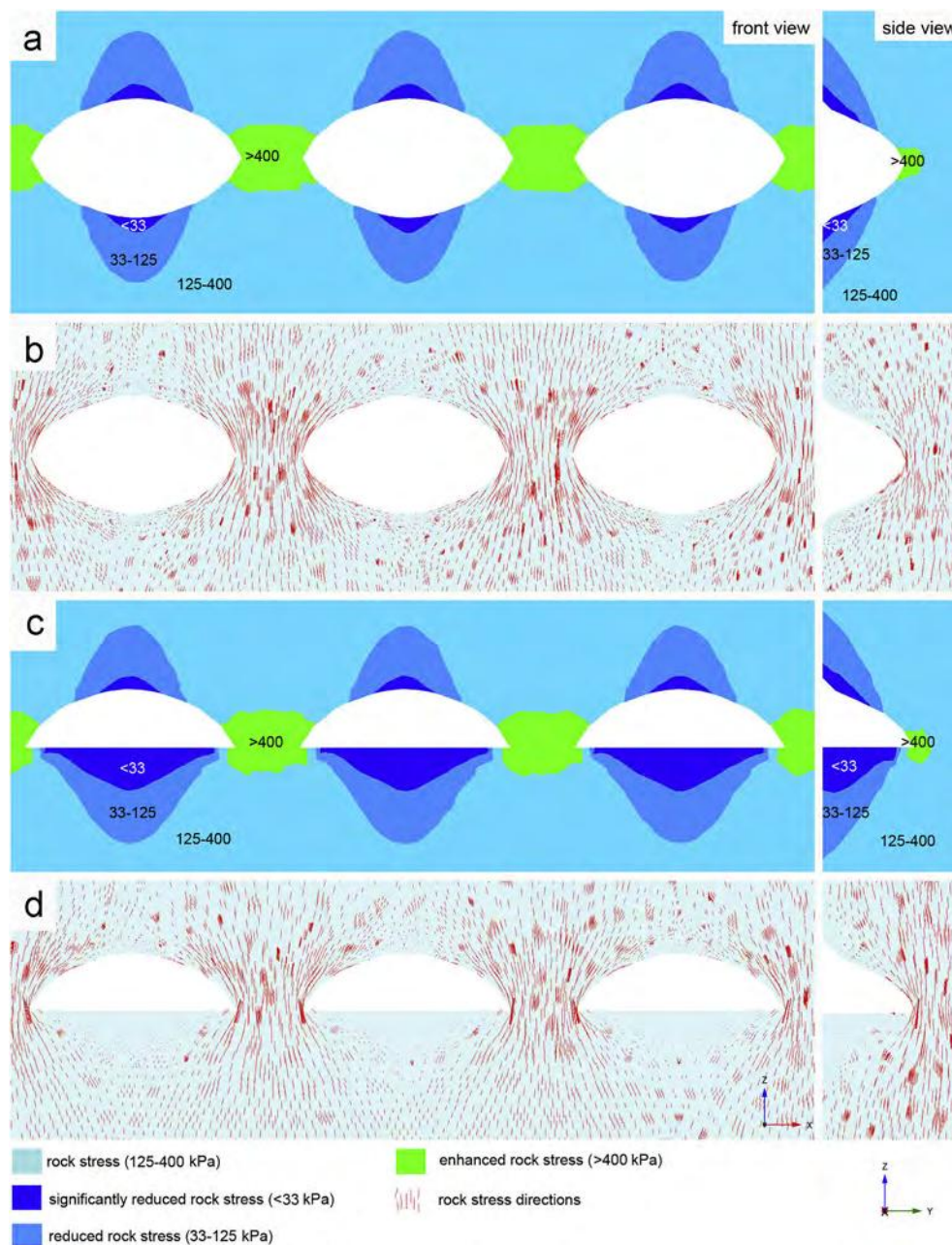
Physical experiments with friable sandstone in the Střeleč Quarry

were performed with the purpose to identify factors crucial for arcade formation and to reproduce different stages of arcade development from the initial stage to a mature stage. Several sites in the Střeleč Quarry and in the surrounding sandstone outcrops suggested that erosion by water is capable to carve arcade pits. Several places in the quarry were selected for the simulation of various water-related erosion factors (Experiments A–E) to reproduce the arcades.

**Experiment A** was performed to show that even minor discontinuities (redistributing stress) are sufficient for arcade formation. Water gently splashed down on freshly cut and smoothed quarry face created tens of half-lenticular arcade pits along the discontinuities within a few minutes (Fig. 17). Despite the steady watering, the growth of the arcades stopped after a few minutes, and surface morphology remained unchanged further on. As has been proved by previous extensive experiments (Bruthans et al., 2014), erosion ceases after the removal of stress shadow zones. This demonstrates that the arcades can form very fast and then remain stable for long periods of time. The resulting forms and their distribution are very similar to those found on natural cliff faces (Figs. 6f, and 8a, b, c).

**Experiments B and C** were performed to show remodelling of narrow artificial discontinuities (incisions) into arcades. After the application of several tens of litres of water, both interrupted and uninterrupted incisions turned into arcade-like forms with supporting pillars (Figs. 18 and 19, and Supplementary Video 2). Again, the erosion and the development of arcades were rapid at first and diminished over time even though some of the nearby portions of the outcrop or supporting pillar were eroded rapidly.

**Experiment D** was performed to test if water seeping through pores from the rock interior may produce arcade-like forms. Water was seeping from an artificial pond on top of the outcrop, providing intense flow of pore water inside the sandstone. As pore water arrived to the seepage face, the subsurface zone of sandstone became liquefied along originally poorly visible discontinuities. Sand grains started to be removed as slurry mass, and six more or less visible arcade-like pits were formed spontaneously, following the lowermost discontinuity (Fig. 20).



**Fig. 15.** Results of the numerical modelling using PLAXIS software, showing the distribution/intensity and directions: a) stress distribution around lenticular pits; stress shadows (dark blue) indicate further evolution into rhombic shapes; b) principal stress directions around the lenticular pits; c) stress distribution around the half-lenticular pits, stress shadows below the flat bottoms of the pits point to another stabilizing factor justifying this geometry; d) principal stress directions around the half-lenticular pits. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

**Experiment (observation) E** was designed to prove that even slow flooding of vertical faces by stagnant water leads to spontaneous arcade formation. Numerous arcades were observed to form on discontinuities of various origins and dip angles within minutes to tens of minutes after the flooding. Examples of such arcades are presented in Figs. 10 and 21. During a slow flooding, the mechanical force of water is negligible; therefore, other mechanisms of rock disintegration must be assumed in the formation of arcades on sandstone outcrops (see Section 4.2.1). The observed arcades and the erosion-accentuated arcade-bearing discontinuities occur exclusively on the previously flooded parts of the face (Fig. 21).

All these experiments resulted in the creation of an arcade-like pattern, but no forms resembling honeycombs or tafoni were observed. Moreover, honeycombs or tafoni have been never observed on faces of

the Střeleč Quarry while arcades were observed repeatedly at many different places in the quarry.

Combined evidence from physical experiments and numerical modelling clearly shows that various aquatic erosion processes remove material from stress shadow zones, producing the same forms – arcades. Geometry of the resulting form is thus dictated by the stress field, not by the specific erosion process. The presence of a discontinuity and the resulting stress shadow is a necessary precondition for arcades to form.



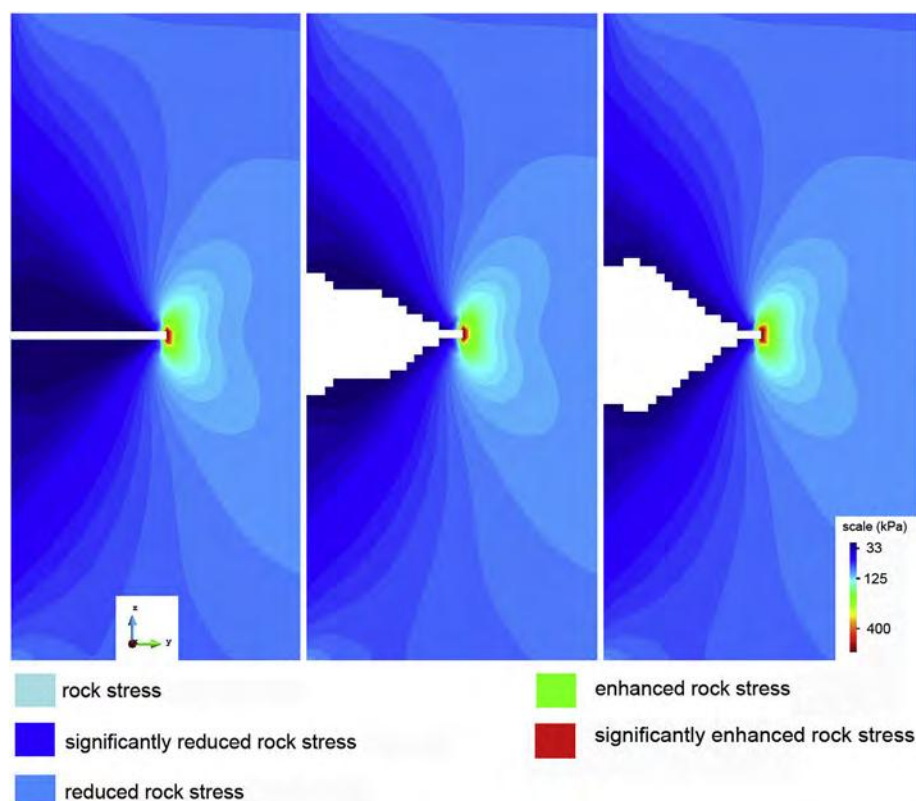


Fig. 16. Results of numerical modelling of stress-controlled erosion using the Tochnog software, showing probable evolution of an arcade pit. Of the ten simulated steps, the figure shows steps 1, 6 and 10 (from left to right). See also Supplementary material.

## 4. Discussion

### 4.1. Occurrence of arcades: comparison with honeycombs and tafoni

#### 4.1.1. Factor of lithology

Honeycombs and tafoni typically occur in structurally rather homogeneous, porous, mostly granular rocks (Paradise, 2013). Honeycombs are most typical for fine- to coarse-grained rocks, while tafoni are common in fine- to medium-grained sandstones and in granites of various grain size (e.g., Goudie, 2013). Arcades are found in sandstones, both friable and consolidated, or even in quartzites. They are much less common in other sedimentary rocks, and rather sparse in igneous or metamorphic ones. This is most probably due to generally different properties of these rocks, leading to different types of weathering, namely the presence of a sharp front between firm granite and loose residuum. Weathered but interlocked granite, able to withstand compression but weak in tension, is the material which can host the weathering forms. It, however, seems to be rather rare in outcrops. If arcades are found in non-bedded rocks like granites, they are associated with joints, other discontinuities and boundaries between boulders (Fig. 22). Favourable lithology is therefore an important factor for arcades to occur, however, the presence of a planar discontinuity is an indispensable condition. Pure and weakly cemented quartzose sandstones with a relatively high uniaxial compressive strength but a low tensile strength on the surface seem to be the most suitable rocks for the development of arcades. This can be documented by the ubiquitous occurrence of arcades in friable sandstones of the Apolena Rock City.

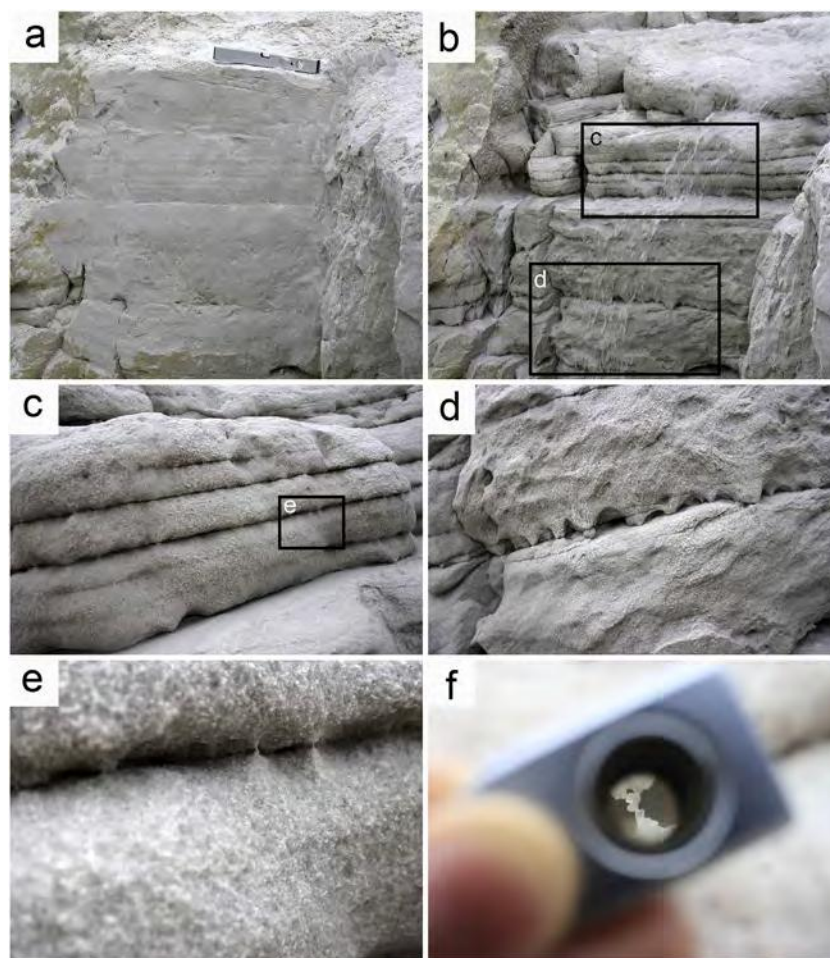
The density of planar discontinuities in sandstone is the most important factor determining the number and the size of arcades on cliff faces. Arcades are rather rare in sandstones with only few discontinuities and, vice versa, they are very numerous in segments with many discontinuities. Blocks densely segmented by discontinuities have a higher proportion of stress-shadow zones.

As suggested by the herein presented field observations, symmetrical (lenticular) arcades develop in rather homogeneous sandstones with uniform lithology or stress-redistributing features. In contrast, half-lenticular or otherwise irregular arcades develop at places where a lithological discontinuity combines with another contributing factor or where one side of the discontinuity is protected by lateral stress. A common example of the former is the induration of one side of the discontinuity, e.g., by the introduction of ferruginous cement. Ferruginization following subhorizontal or subvertical discontinuities in sandstone is a common phenomenon in the Bohemian Cretaceous Basin (Adamovič, 2016).

Alternatively, the discontinuity represents a marked boundary of lithologies with contrasting resistance to erosion. Half-lenticular arcades also develop where one of the blocks along the discontinuity has a considerably higher moisture content, which makes it less resistant to weathering compared to the other block.

#### 4.1.2. Factor of climate and aspect

Cavernous weathering forms occur worldwide across climatic zones. However, tafoni are rather characteristic for temperate coastal and other salt-rich environments and also for (semi-)arid and cold areas like deserts (Mottershead and Pye, 1994; Turkington and Phillips, 2004). They occur on vertical or inclined cliffs mostly free of vegetation, i.e., exposed to the sun and rain. Honeycombs are also common in temperate coastal and cold areas, but notably less common in (semi-)arid areas (Mottershead and Pye, 1994; Young et al., 2009). If present in arid areas, honeycombs occupy places protected from sun, like deep canyons, overhangs, interiors of large cavities (e.g., tafoni) or narrow crevasses behind blocks separated from the rock massif. Unlike tafoni, honeycombs are common in humid inland areas. At most of the sites, they occur on subvertical or even overhanging cliff faces sheltered from direct rain and sun most of the time (Adamovič et al., 2006, 2011; Young et al., 2009; Vařilová et al., 2011; Urban and Górník, 2017).



**Fig. 17.** Results of Experiment A: a) initial stage – a smoothed quarry face, a 40 cm spirit level for scale; b) rinsing by water and remodelling of the face after approximately 10 min; c) a close-up view of the morphologically accentuated discontinuities; d) half-lenticular arcades resembling those found at other places of the quarry and in nearby natural outcrops; e) a close-up view of the discontinuity with miniature pillars formed by a few grains; f) a view through the magnifying glass showing the contacts between grains in a scale of tenths of a millimetre.

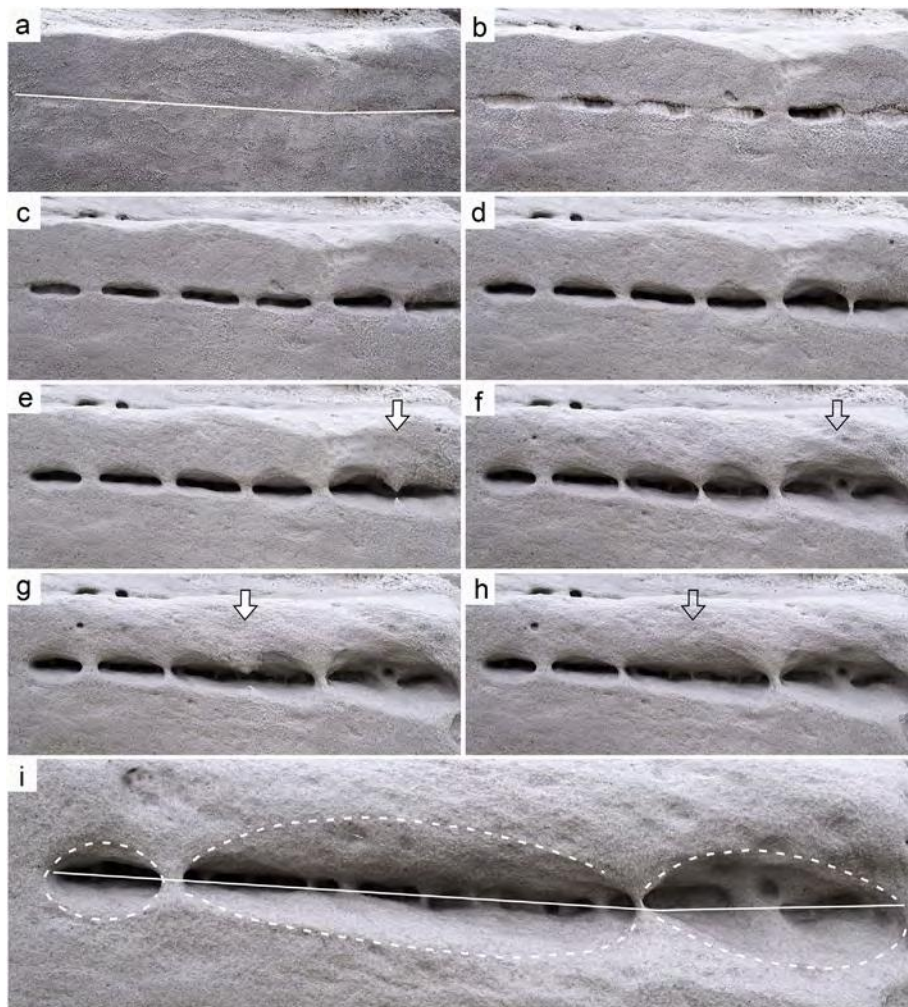
Cílek and Langrová (1994) noted that in forested areas of central Europe, honeycombs are developed within the height reach of trees but almost missing higher up on the cliff faces. In coastal environments with very high salt contents or at other specific sites (e.g., Petra in Jordan, rhyolite tuff of the Topaz Mountain in the Thomas Range, Utah, USA, western coast of Corse, France) where most precipitation is delivered within a specific part of the year, honeycombs also occur on inclined or even horizontal insolated surfaces (Fig. 1c, d and Rihosek et al., 2016). In general, the existence of the above inconspicuous differences between the occurrences of honeycombs and tafoni (Paradise, 2013) indicates that these two forms need slightly different regimes of hydraulic field (Bruthans et al., 2018).

Arcades, however, develop under diverse conditions in a wide range of environments including places where neither honeycombs nor tafoni are present. Arcades occupy (sub)vertical or inclined cliff faces across climatic zones exposed to variable humidity conditions – hidden in deep overhangs or, contrastingly, exposed to the insolation and/or rain. Unlike honeycombs and tafoni, arcades are observed also on gently sloping surfaces of top parts of sandstone cliffs and towers exposed to all-day insolation (Figs. 6a, d, e, and 8a, c). Unlike honeycombs and tafoni, they develop in deep and dark gullies or even in caves with relative humidity permanently close to 100% (Figs. 6b, f, and 23). These locations clearly point to different mechanisms of their origin and subsequent development compared to honeycombs and tafoni.

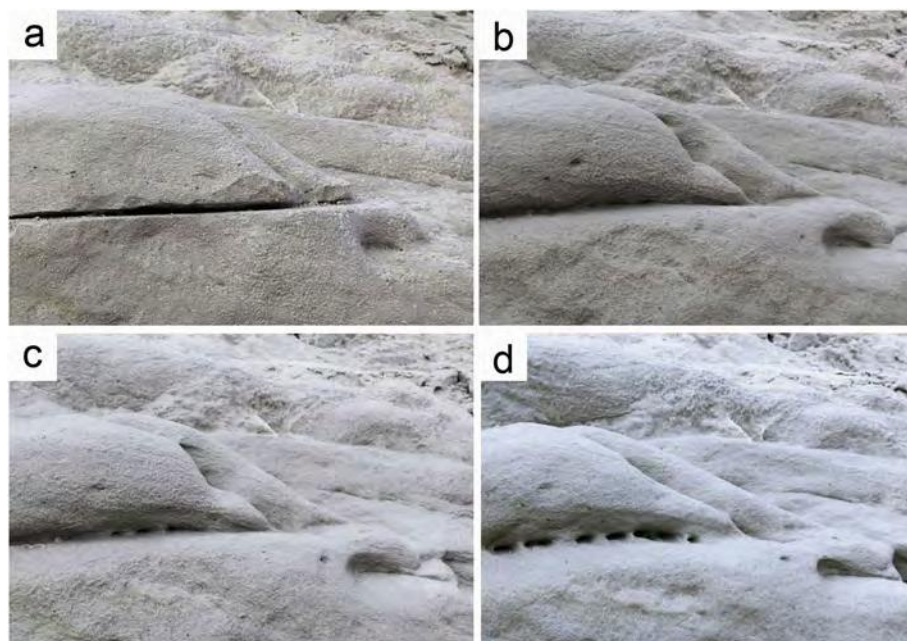
## 4.2. Origin and subsequent development of arcades

### 4.2.1. Conceptual model of arcade origin

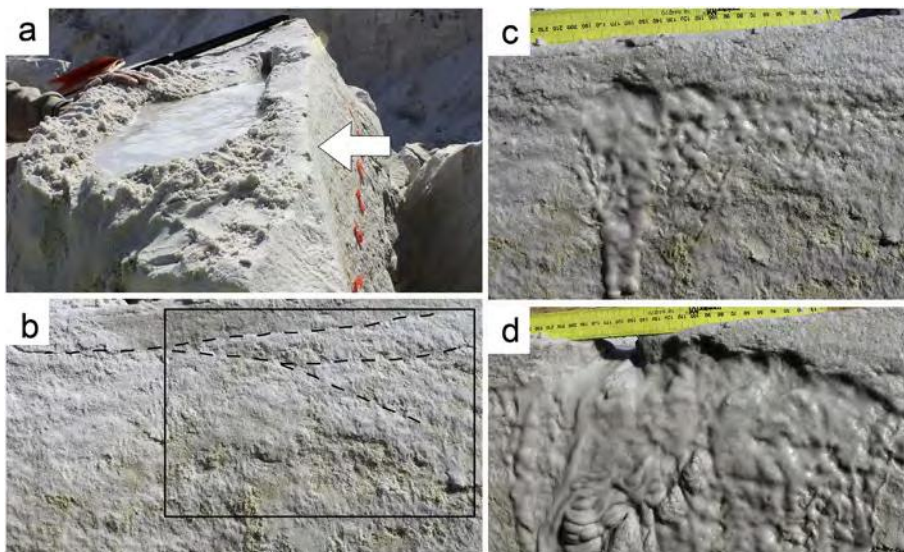
With respect to the principle of stress-controlled weathering formulated by Bruthans et al. (2014) and applied by Rihosek et al. (2016), we interpret our findings in the model below. The process of arcade development starts with a discontinued rock. Due to the inherent irregularities of the discontinuity surface, stress is not evenly distributed along the discontinuity but fluctuates in a statistically random pattern, with heavily loaded areas lying next to weakly loaded areas. Weakly loaded areas are subject to faster erosion rate. Erosion removes material from weakly loaded areas, producing pits. As a result, stress becomes concentrated to the increasingly stable and increasingly loaded areas. A system of “sub-arcades” is formed, following the initial irregularities of the discontinuity surface (see Figs. 14 and 15). This process repeats, progressing towards more advanced developmental stages. Erosion always concentrates to the least loaded of all current sub-arcades, which merge to form larger bridge-like structures (Supplementary Video 2). At some point, the arcades become large enough and the pillars/walls between them become sufficiently loaded to suppress further erosion. To be more specific, the susceptibility to erosion becomes so low that any further erosion becomes suppressed by the emerging surface layer of the biologically-initiated rock crust (Slavík et al., 2017). We thus suspect that not only the arcade shape, but also the size of individual arcades in an arcade “train” are governed by stress-controlled erosion characteristics of the given sandstone material.



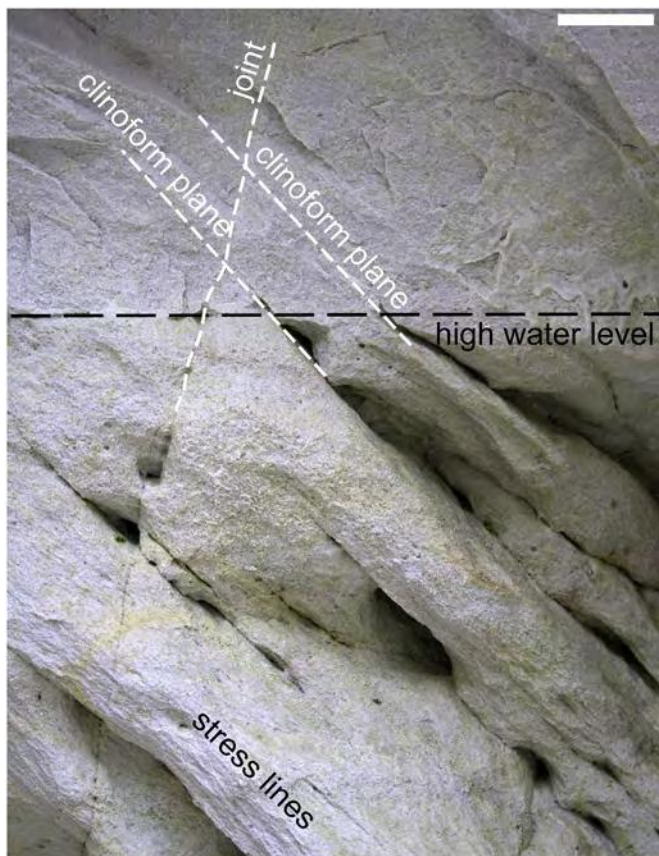
**Fig. 18.** Results of Experiment B: a) initial stage – an artificial intermittent discontinuity filled with sand; b) smoothing of the surface and rounding of the slits after manual watering by first two cans; c) emptying of the slits and incipient rounding of pillars and pit ceilings after prolonged watering; d) left pillar tightening and incipient rounding of pit ceilings; e), f) left pillar destruction followed by accelerated erosion of the pit ceiling resulting in the formation of an arch bridging the temporarily unstable geometry, i.e., the formation of a “second-order” arcade (see the text for explanation); g), h) further erosion causes a destruction of the central pillar, which is again followed by an accelerated erosion of the pit ceiling and formation of a new arch bridging the unstable portion of the sandstone; i) a final stage of the experiment (after watering by 65 cans); note that most pillars from the cliff face are gone, and the face is supported by three larger arcades. However, a ledge will most probably form after they become eroded. Note also the several small pillars/arcades supporting the interior of the original slit. For animation of arcades and columns evolution see [Supplementary Video 1](#).



**Fig. 19.** Results of Experiment C: a) initial stage – an artificial continuous discontinuity approximately 60 cm long; b) smoothing of the surface after manual watering by four cans; c) spontaneous origin of first arcade pits after watering by eight cans; d) arcade pits with pillars after watering by 16 cans.



**Fig. 20.** Settings, initial stage and results of Experiment D: a) water reservoir and the studied face (indicated by an arrow); b) a close-up view of the studied face before water has seeped through; minor joints are marked by dashed lines and the area documented in the following figure is marked by a black rectangle; c) penetrating water starts to remove liquefied sand and first two pits start to form; d) advanced pit formation along a previously invisible discontinuity (the lowermost one in the figure b); six more or less visible arcade-like pits were formed spontaneously.



**Fig. 21.** Result of Experiment E showing accentuated discontinuities and arcade pits on a quarry face previously flooded by water. Note that the two features are absent above the former water level. Stress lines seem to parallel the moderately dipping bedding clinoform planes. Scale bar 10 cm.

This model shows a fundamental difference between the arcades and the honeycombs/tafoni (cf. figure 12 in Bruthans et al., 2018). The formation of arcades is controlled by the stress field, while the formation of honeycombs/tafoni is controlled by the hydraulic field. The two types of weathering forms are thus genetically different and should not be treated as a single category. In both cases, however, the conceptual model shows the same pattern: physical fields “organize” the origin, evolution and the geometries of the pits/cavities, while the weathering/

erosion agents are mere tools disintegrating the rock and carving the pits/cavities (see Fig. 24). A similar organizing principle should be most probably valid also for other weathering forms (see Section 4.2.6).

#### 4.2.2. Weathering/erosion agents

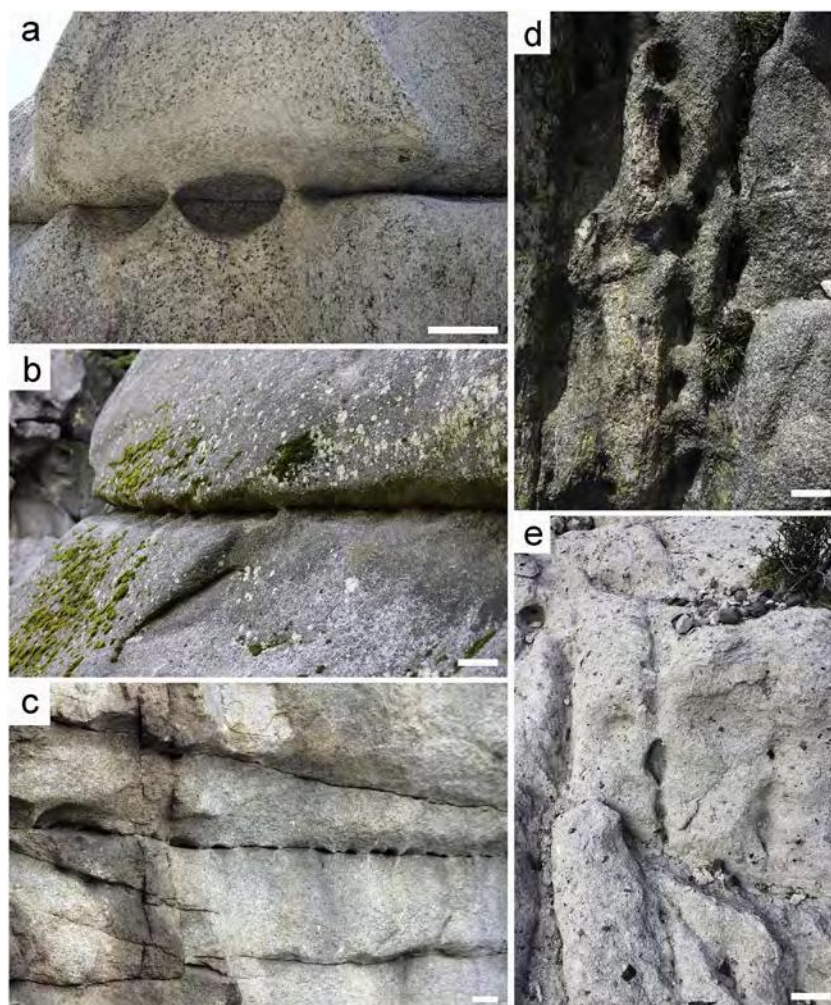
Observations of cliff faces at various sites in various parts of the year as well as the results of physical experiments performed under controlled conditions helped to identify several weathering/erosion agents removing material from stress shadow zones, thus forming the arcades. Water was involved in all these processes.

For locked sand and friable sandstone, erosion by water is sufficient to generate small-scale landforms on cliff faces (Bruthans et al., 2014). The mechanisms responsible include **rain drop impact**, **flowing water** (overland flow, channelized flow) or even **immersion in stagnant water** in which friable sandstone disintegrates by **slaking**. Slaking is the action of capillary water as it enters the pores previously occupied by air. The entrapped air exerts pressure to pore sides, which is sufficient to break loose material (Arulanandan and Heinzen, 1977). All these processes were found to be responsible for the development of arcades in the Streleč Quarry.

As planar discontinuities are one of the most important pathways for pore waters, weathering related to water seeping or sapping along these discontinuities must play an important role (Laitly and Malin, 1985; Howard and Kochel, 1988).

For more resistant (compacted, cemented) sandstones, water alone is not capable of creating the arcades. **Frost weathering** is likely a very important disintegration process participating in the origin of arcades in temperate and cold climatic regions. Ice crystallization in wetted pore spaces around the discontinuities disintegrates the rock significantly (Walder and Hallet, 1986). Frost weathering is likely an important process of arcade development in dark and cold cleft canyons, for example in the Adržpach area (Czech Republic), where salts are absent and arcades lie beyond the reach of stream erosion. In the Adržpach cleft canyon, rapid frost weathering of up to 240 g/year/m<sup>2</sup> of rock surface has been documented by Bruthans et al. (2017) by repeated collecting of fallen material on plastic foil after winter periods.

Although **salt precipitation** is a common and often indispensable process leading to sandstone disintegration and origin of honeycombs and tafoni (e.g., Adamovič et al., 2011; Steiger et al., 2011; Bruthans et al., 2018), it seems to play a less important, or at least a dispensable, role in the arcade formation. This is because the salts are often dissolved by water around the discontinuities. Unlike in honeycombs and tafoni, they were commonly observed to precipitate on cliff faces around the arcades and not directly in the pits themselves. This feature



**Fig. 22.** Arcades in different rocks: a) perfectly developed smoothed arcade pits along a horizontal fracture on a sea coast, in coarse-grained granite, Corse, France; b) arcades formerly separated by pillars developed along a fracture and later coalesced to form a ledge, in granite, Smolný vrch, Jeseníky Mts., CZ; c) small arcades along a fracture, granite, Míchova skála Rock, CZ, photo by V. Čílek; d) arcades along a vertical fracture in granite, Corse, France; e) arcades along two indistinctly visible lines (fractures), rhyolite tuff, Thomas Mountain Range, Utah, USA. Scale bars 10 cm.

had been observed also by authors who mentioned the significance of salt washing from certain portions of cliff faces for the distribution of cavernous weathering (Smith and McAlister, 1986; Goudie et al., 2002). Salt weathering, however, may play a considerable role in arcade development on seashores and in arid desert environments. It surely contributes to rock disintegration in late stages of arcade development (see Section 4.2.3).

**Biological contribution** to sandstone weathering is a commonly discussed topic. Biota has been proved to accelerate weathering in particular cases (Paradise, 1997; Robinson and Williams, 2000). In contrast, it can demonstrably protect a young sandstone surface from weathering as well (Gómez-Alarcón et al., 1995; Viles and Goudie, 2004; Slavík et al., 2017). Although the effect of organisms has not been tackled by this study, they probably play a role in arcade formation as green or brown organic matter was observed on several collected samples to penetrate inside the rock along the discontinuities.

Previous authors explained the origin of some cavities by **cement dissolution** caused by increased water flow from rock interior towards the surface (Kulič, 1983; Sunamura, 1996; Mol and Viles, 2010; Worthington et al., 2016). As we show in this paper, it is just one of the possible and mutually replaceable weathering/erosion processes leading to arcade formation.

#### 4.2.3. Significance of planar discontinuities

It is apparent that discontinuities strongly influence rock weathering in three ways: i) by modifying the stress field, which controls the erosion to take place on selected portions of the rock surface (Bruthans et al., 2014); ii) by collecting water which washes the salts and possible matrix, thereby enhancing weathering related to high moisture content (Oberlander, 1977; Howard and Kochel, 1988), and iii) by representing zones of weakness with low tensile and shear strength (Barton, 2013).

Early attempts to obtain drill cores with intact discontinuity planes failed as the cores were easy to split into two parts along the discontinuities. This clearly demonstrates that the sandstone along the discontinuities has a negligible tensile and shear strength compared to ambient sandstone. While the sandstone massif is interlocked with a considerable shear strength, a discontinuity presents a thin zone of extreme weakness along which sand grains can be easily removed. The increased water content along the discontinuity enables biocolonization by various types of organisms, which can theoretically either increase or reduce the weathering rate (Arino et al., 1995). Further investigation is needed to detect the potential role of organisms in arcade formation. Numerous contacts of grains across the discontinuities permit the stress to be transmitted from one side of the discontinuity to the other. A partial contact enables a certain stress stabilization, which is, however, much less effective than in the interior of the continuous sandstone massif. This results in fast erosion but, at the same time, stabilizes the

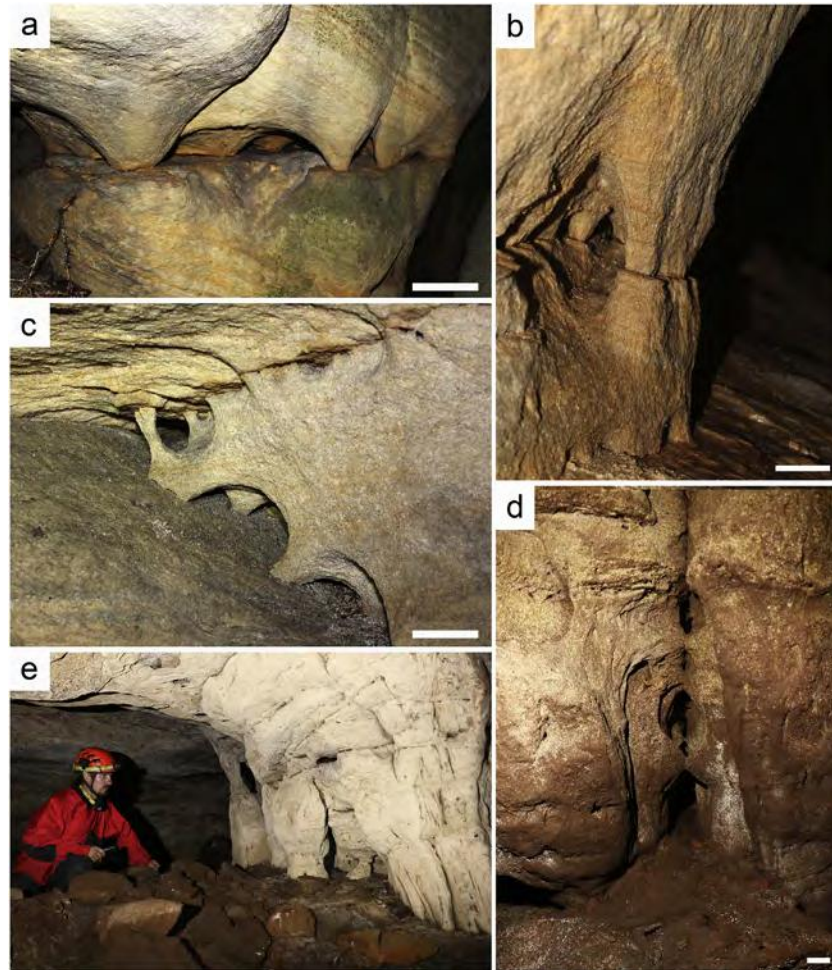


Fig. 23. Arcades and pillars from underground environment: a) lenticular arcades along a bedding plane cemented by iron oxyhydroxides, Teplice-Adršpach Rock City, CZ; b) rhombic arcades with pillars, Teplice-Adršpach Rock City, CZ; c) half-lenticular arcades with pillars developed along tectonic fractures of various orientations, Teplice-Adršpach Rock City, CZ; d) arcades along a vertical fracture in weathered quartzite, Berlin Cave, Nelspruit, South Africa; e) pillars in weathered quartzite, Berlin Cave, Nelspruit, South Africa. Scale bars 10 cm.

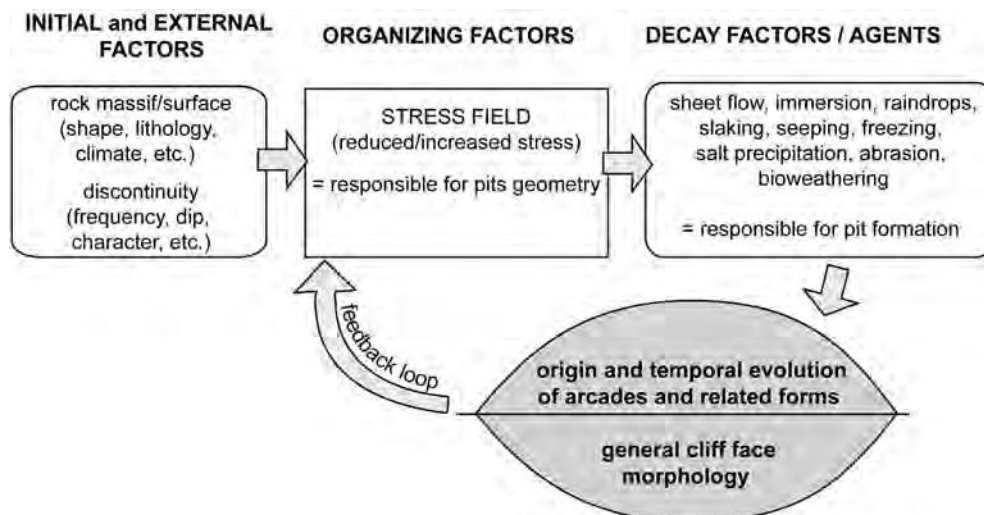


Fig. 24. A conceptual model of interactions between initial and organizing factors and decay factors/agents responsible for arcade formation.

“pillars” through which the stress is transmitted.

As many weathering processes are connected with stress in a pore space (Goudie, 2013), the degree of preservation of grain contacts across the discontinuities is very important for the development of

arcade pits. If a specific discontinuity fully transmits stress due to perfect grain contacts, the material will resist (Bruthans and Řihošek, 2017). If not, the material will disintegrate and pits will develop. Geometries of the arcade pits are very probably influenced by the

character of the discontinuity, involving such factors as sandstone loosening, the degree of the original preservation of contacts, the presence of secondary mineral fills and especially the possible induration.

#### 4.2.4. Temporal evolution of arcades

Honeycombs and tafoni are suspected to continuously develop in time, yet at a decreasing rate (Sunamura, 1996; Norwick and Dexter, 2002). They are believed to develop in a cycle from small depressions to mature complex 3D networks of pits (Mikuláš, 2010; Paradise, 2013). This is considered to be a recurrent self-organizing process including a partial or full self-destruction and subsequent renewal (cf. McBride and Picard, 2004; Turkington and Phillips, 2004; Viles, 2005).

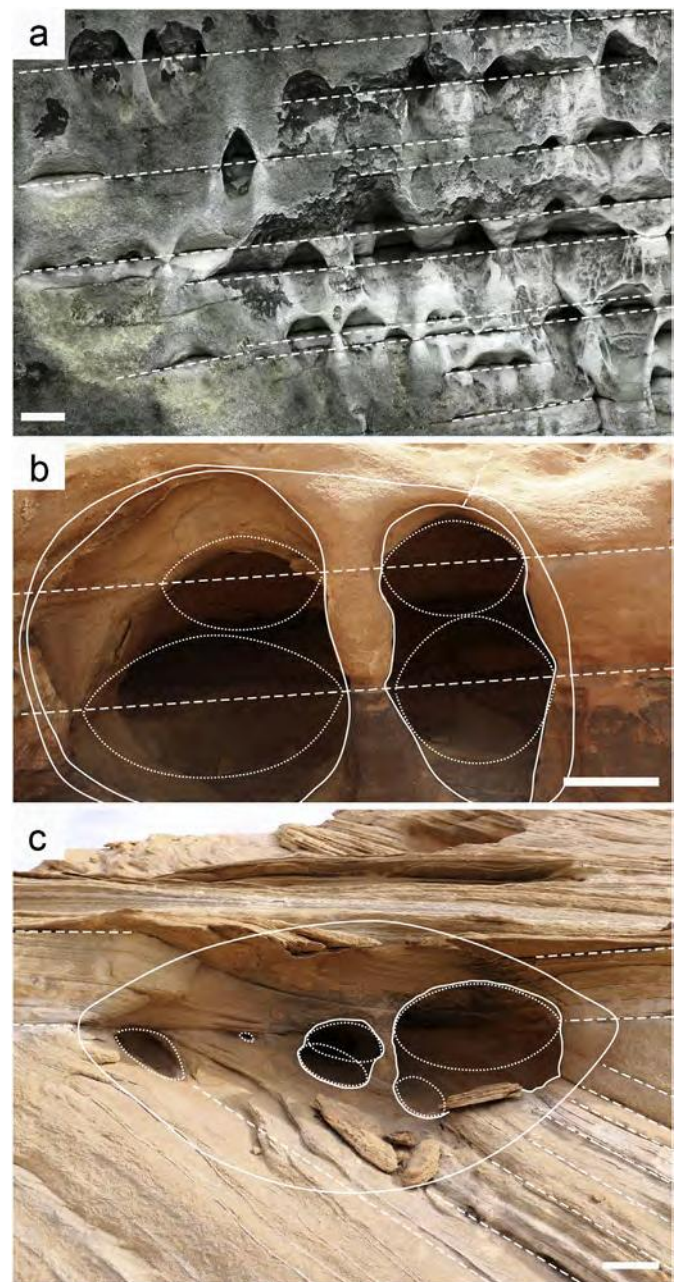
Physical experiments on freshly exposed friable sandstone indicated that arcades have a different evolution.

They become fully developed in the early stage of their formation and once they reach a “metastable” geometry, their further development slows down considerably. As suggested by numerical modelling, the growth of arcade pits ceases as soon as the material from stress shadow zones is removed (Figs. 14, 15, and 16). Observations of natural arcades suggest that once they are created, the outer surface of the pits becomes stable for a long period (see arguments for stabilizing of the sandstone surface in Conca and Rossman, 1982; McBride and Picard, 2004; Mol and Viles, 2012; Slavík et al., 2017). A similar evolution has been also supposed for some rock overhangs (Čílek and Žák, 2007; Bruthans et al., 2017). This idea is supported by several independent features, like common small- to medium-sized openings of arcades, consolidated inner surfaces of the pits, common absence of disintegration products in the pits, and their overgrowing by lichens, mosses and plants (Fig. 6a–e; Fig. 8a, e, f). The numerical models predict the same evolution showing that back parts of the arcade pits and the pillars are considerably more resistant to weathering than the surrounding rock. Geometries of specific arcade pits seem to be conserved even at sites repeatedly flooded by water and subsequently exposed to frost action.

Further growth of arcades after their stabilization is probably governed by several interacting processes driven by various factors. Since slow erosion along the discontinuity steadily shifts the stress into the rock massif and changes the geometry of the stress shadows, the arcade pits can be equally expected to change. At the same time, as the arcades become larger, the surrounding rock surface (portions sandwiched between pairs of discontinuities with arcade “trains”) becomes increasingly protruding, eventually losing its protection by elevated stress (see Supplementary figure 18 in Bruthans et al., 2014). As a result, sandstone in the protruding parts disintegrates and the whole surface becomes remodelled.

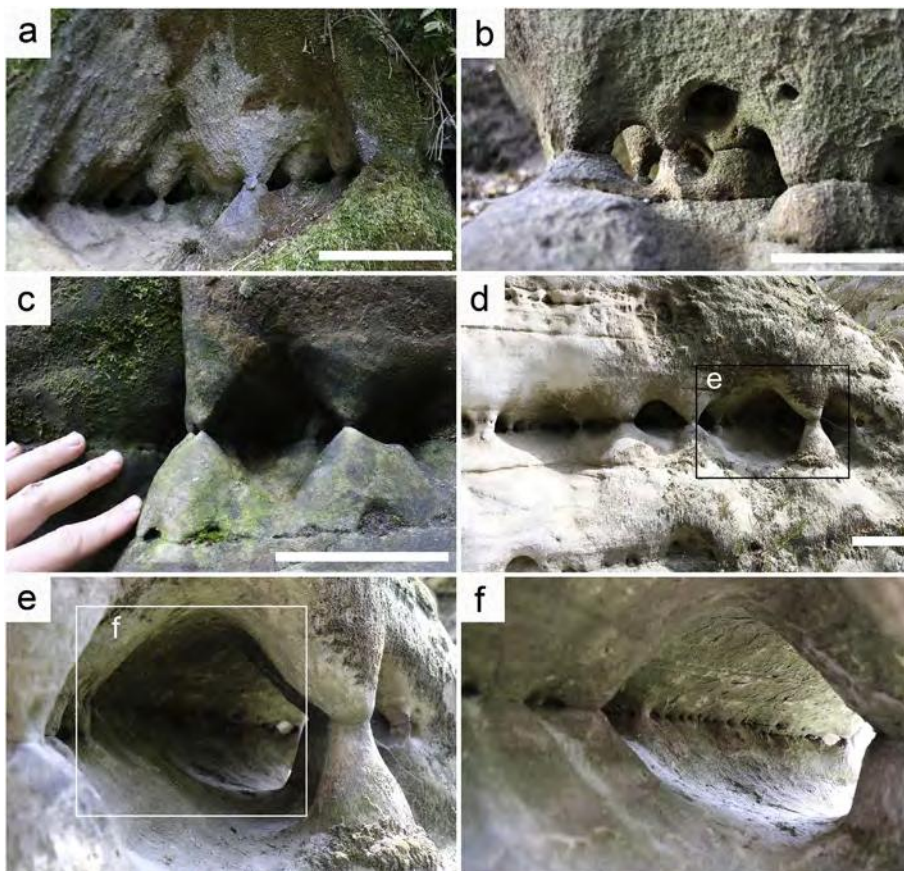
Changes in the distribution or intensity of stress shadows may result in remodelling, growth or coalescence of the arcade pits and in the formation of new, larger cavities. Larger and more stable cavities are formed, bridging the primary (cumulated) stress shadows (Figs. 8f, 25 and 26a, e, f). In addition, smaller/younger arcades were observed to develop on their backwalls or on pillars in their interiors (Figs. 7a, and 26c, f). Less frequently, the neighbouring cavities coalesce behind the cliff face, even though the original arcade pits and pillars remain preserved on the cliff face. A long, horizontal tunnel-shaped cavity parallel to the cliff face develops behind the arcade pits. It is oval in cross section, resembling a colonnade (Fig. 26e, f, and 28). In other words, overlapping of stress shadows along discontinuities followed by a coalescence of arcade pits into larger cavities may initiate the formation of various complex weathering forms in natural outcrops.

As suggested by the results of physical modelling, the remodelling process is a gradual one. Once some of the stabilizing elements (e.g., a supporting pillar) become eroded, however, a sudden stress field rearrangement launches a phase of rapid erosion until a new metastable geometry is reached (see also the video in Rihosek et al., 2016 and Supplementary Video 2). Accelerated erosion of arcades is clearly visible in the nature: the subjected parts of the cliff face experience sudden destruction and removal of the case-hardened surface and local



**Fig. 25.** Examples of likely reshaping of arcade pits and their coalescence into larger cavities. Dashed lines represent significant discontinuities, dotted lines represent possible previous forms (i.e., former extent of particular stress shadows): a) inconspicuous enlargement and coalescence of small arcades on a cliff face of friable sandstone; white areas on the cliff face represent a currently exposed “fresh” surface with destructed case-hardened portions and fast erosion, dark areas represent old and still stabilized surface, Apolena Rock City, CZ; b) a cavity of complex origin, most probably developed due to coalescence of several smaller cavities (dotted lines) related to discontinuities (dashed lines); its possible evolution into a large tafone can be expected in the future (a full line), Burda Bridge area, Wadi Rum, Jordan; c) a view of a group of cavities probably formed by coalescence of smaller ones (some are indicated by dotted lines); their possible evolution into a large tafone can be expected in the future (a full line), Colorado River-Narrow Canyon, Utah, USA. The former presence of several cavities in figs. b) and c) is indicated, among others, by the seemingly illogical undulations on the pillars. Scale bars 10 cm.

weakening of the sandstone, both followed by a rapid erosion of the unstable parts of the rock. Such settings are characterized by the presence of seemingly illogical-shaped cavities and loose sand (Figs. 7c, 9f,



**Fig. 26.** Various mature complex 3D arcade-derived forms: a) a large arcade cavity of the “second order” containing smaller arcade pits and hourglass-shaped pillars, Malobratfice, CZ; b) a group of arcades developed at several levels along neighbouring discontinuities, Mladějov, Střeleč Quarry area, CZ; c) rhombic arcades with pillars, Harrisons Rocks, UK; d) interconnected cavities with numerous pillars, Apolena Rock City, CZ; e) a horizontal tunnel-shaped cavity parallel to the cliff face developed behind the arcade pits; f) a view inside the tunnel showing small arcades developed on the backwall. Scale bars 10 cm.

25a, and 26).

A prolonged erosion in a “train” of arcade pits of equal age and size is clearly associated with the destruction of supporting pillars. In most lithologies, this process leads to the formation of more or less regular notches and ledges (Figs. 18 and 22b, and see Section 4.2.6).

Long-term evolution of the geometries of arcade pits/cavities can be only speculated at present. As suggested by the numerical model, stress shadows of already developed pits tend to be vertically elongated or rhombic in outline. Such arcades are frequently observed on natural outcrops. It can be therefore assumed that easier and thus faster erosion occurs here, not limited to the close neighbourhood of the discontinuity but extending to the whole zone of reduced stress. This situation seems to be conditioned by a weak consolidation of the rock and by the availability of the erosion agent across the whole rock surface (Figs. 7, 10d, and 25a). At other sites, however, outlines of the arcade pits are constrained to the nearest proximity of the discontinuity. This situation occurs in more resistant rocks where the erosion agent is limited to the close neighbourhood of the discontinuity (e.g., Fig. 6e). It is also observed at places with slow rates of erosion (of any reason), providing sufficient time for the arcade pits to conserve by case hardening. However, the issues of arcade shaping and development are very difficult to discuss at the current state of knowledge. This requires a targeted numerical modelling with specifically developed software followed by a verification within a focused field study.

#### 4.2.5. Transitions from arcades to honeycombs and tafoni

As much as there exist “transitional” forms between honeycombs and tafoni, transitions between arcades and honeycombs/tafoni can be also found. As documented in the field and observed in microscopic scale, planar discontinuities may gradually die out. At the tip of the discontinuity, a control by the stress field is lost and can be replaced by a control by the hydraulic field (Bruthans et al., 2018). Honeycombs and tafoni then may alternate with arcades along intermittent

discontinuities (Fig. 27a, b). At the tip of the discontinuity, the pits change to rounded/oval or even lobate in their outlines: no acute angles typical for the contact of the vault with the discontinuity plane are developed (Fig. 28c–f).

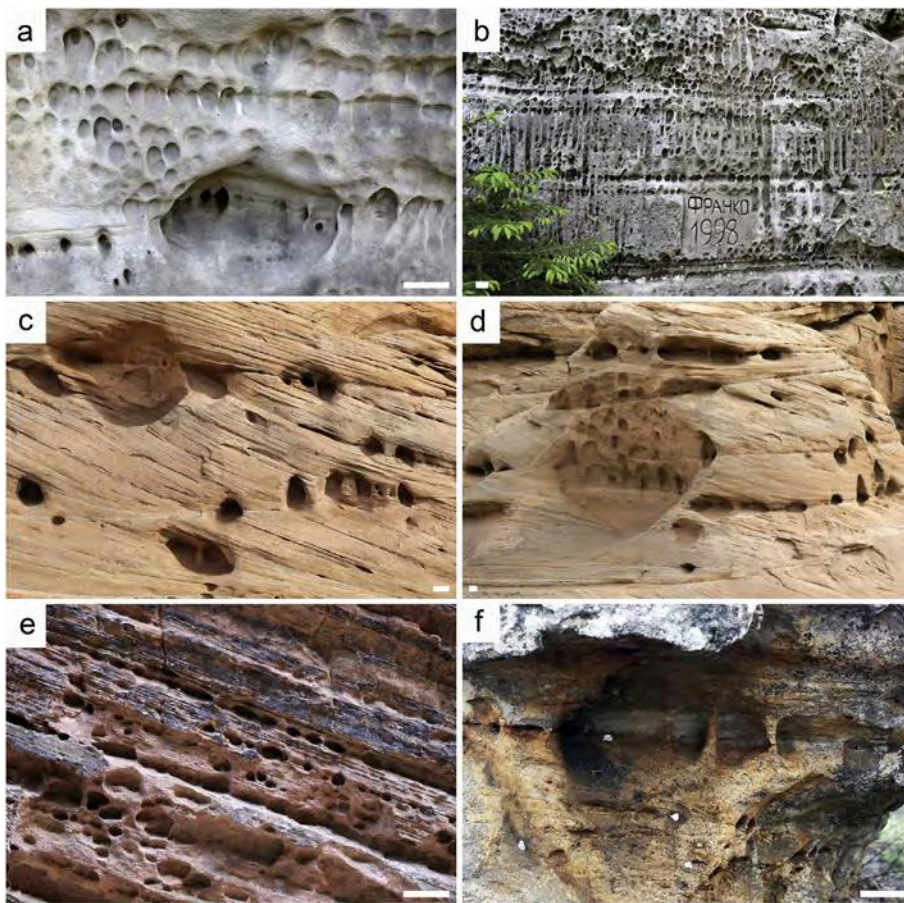
#### 4.2.6. Broader consequences

The recognition of arcades as a specific weathering form of worldwide distribution corresponds with the results of Bruthans et al. (2014) who predicted that many small-scale weathering forms in interlocked-fabric materials (sandstone, weathered granite, etc.) are affected or even initiated by the negative feedback between stress and weathering/erosion. The association of arcades with planar discontinuities perfectly supports the assumption that the discontinuities modify stress tensors inside the rock to produce 3D vaulted stress arrays.

Besides the arcades, other typical landforms previously considered independent categories should be understood as integral parts of a single guiding process that can be called stress-controlled and discontinuity-related weathering. Blind arches, rock windows, vaulted overhangs, ledged surfaces and hourglass-shaped pillars are direct results of this process, and boundaries between these forms are more or less artificial.

For example, the rock pillars have been considered products of various processes, like selective salt weathering accompanied by silica precipitation on the pillar surface (Adamovič et al., 2010), formation of adjacent cavities due to carbonate-cement dissolution (Adamovič et al., 2015), or by cementation by silica-bearing solutions via “finger-flow” pathways (Aubrecht et al., 2017). Based on the results of Bruthans et al. (2014) and the results presented in this paper, the origin of pillars (at least most of them) is based on stress-controlled, discontinuity-related weathering: they are a direct consequence of the development of arcade cavities by removal of material from stress-shadow zones along primary, often invisible discontinuities (Fig. 29). This fits well the results of mathematical calculations of Ostanin et al. (2017) who concluded





**Fig. 27.** Transitions between arcades and “classical” cavernous weathering forms: a) honeycombs in the top part are developed along a discontinuity, thus primarily formed as arcades (note that the pits are not developed between the discontinuities as those in figure Fig. 3), Apolena Rock City, CZ; b) a honeycombed cliff face with both regularly and irregularly sorted honeycombs; several “trains” of pits originally formed as arcades are well visible, and vertical gravitational rillenkarren are also present, Apolena Rock City, CZ; c) several larger tafoni-related cavities originally formed as arcade pits along discontinuities of different orientations; note the typical pillars in larger cavities, Colorado River-Narrow Canyon, USA; d) tafoni developed from arcades along discontinuities of different orientations, Colorado River-Narrow Canyon, USA; e) arcades passing to honeycombs in the bottom part, Zion National Park, USA; f) tafoni developed from arcades in quartzite, Berlin Cave area, Nelspruit, South Africa. Scale bars 10 cm.

that erosion of sandstone and similar rocks is a local minimization of elastic strain energy.

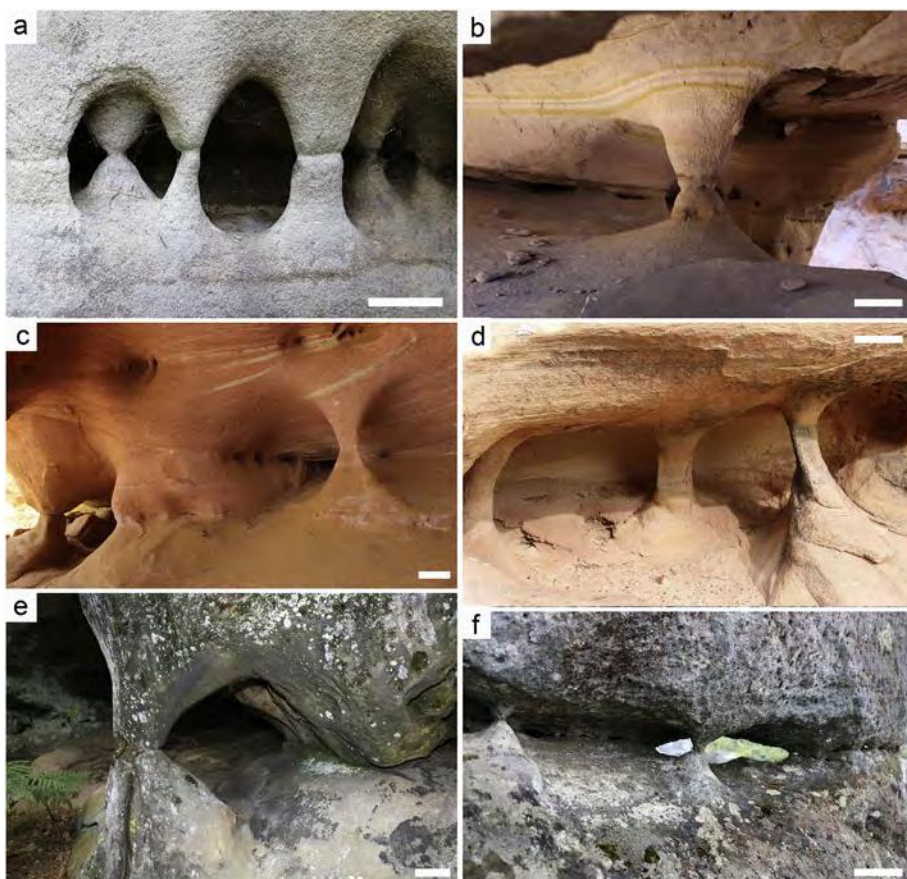
Perfectly developed pillars associated with strata-bound joints have been reported from Venezuelan caves in quartzose sandstone (Sauro, 2014; figure 15d in Wray and Sauro, 2017, figure 9 in Aubrecht et al., 2017), although explained by two contradictory theories (see Aubrecht et al., 2017 and relevant references therein). A full explanation of the origin of Venezuelan pillars is a matter of a thorough debate and is not the purpose of this study. However, the evident similarity of some arcade-like cavities and pillars documented in the caves of Cueva de los Pémones, Cueva Charles Brewer and Cueva Eladio (figures 10a–d, h in Aubrecht et al., 2017) with the herein presented examples (Figs. 23 and 28) possibly point to the same origin of these forms.

Various dimensions and developmental stages of stress-controlled, discontinuity-related forms and their occasional transitions to honeycombs or tafoni possibly explain why the arcades and related forms have as yet escaped broader attention. It is not surprising that arcades and pillars millimetres to a few centimetres in size have been largely overlooked or ignored. Forms of this size or slightly bigger have been – despite their specific shapes – usually attributed to honeycombs or small tafoni. As has been already noted by several authors, effective horizontal partings (i.e., planar discontinuities) in otherwise uniform sandstone play a critical role in cliff face segmentation, thus affecting the erosion rate (Holland, 1977; Oberlander, 1977; Howard and Kochel, 1988; Young et al., 2009). Considering the experiments of Bruthans et al. (2014) and arguments presented in this paper, larger cavities several metres or tens of metres in size should be also considered products of stress-controlled, discontinuity-related weathering. Similarly as in the “small” arcades, the same controlling factors are involved in the formation of these “large” landforms. In addition, gravity-induced fractures and rockfall contribute considerably (Fig. 29).

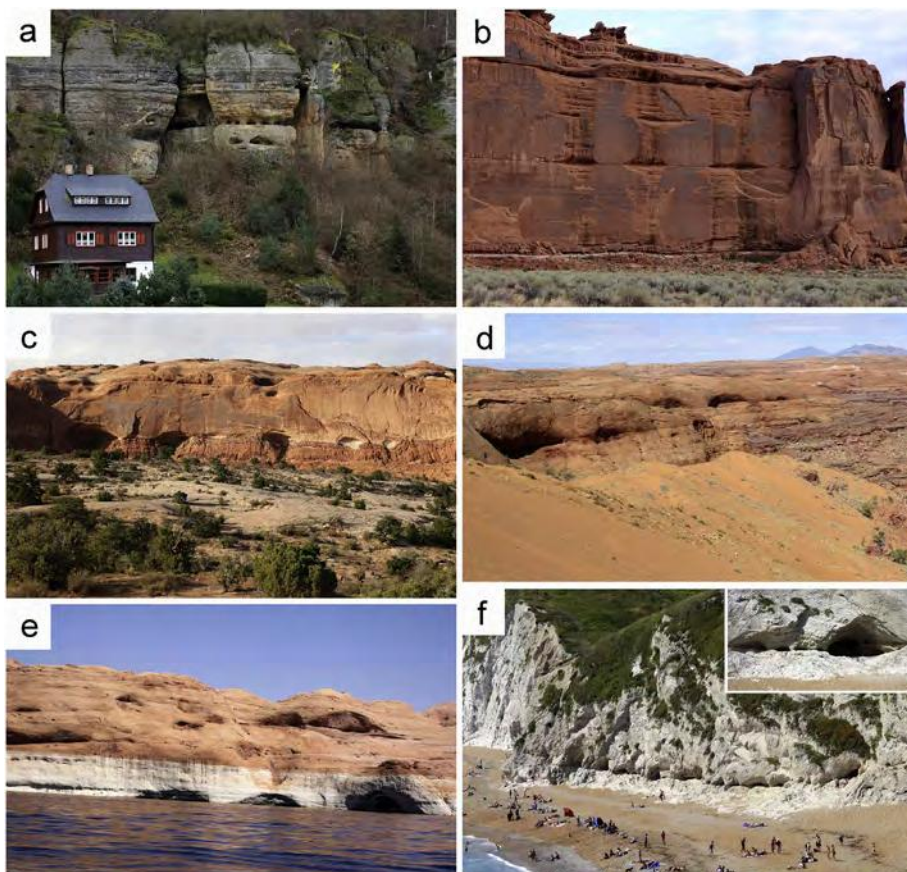
An example of related large-scale forms are some bedding caves, which display broadly vaulted roofs, possibly formed by the coalescence or enlargement of small- to medium-scale arcade-like forms. These have been reported from many sites in the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic (Vitek, 1981; Adamovič et al., 2010), from Mt. Danxiashan area, China (Peng et al., 2015) and other places.

Although the geometries of the arcades seem to be strictly predetermined, their size and distribution on cliff faces slightly vary. These parameters depend on the spacing and frequency of planar discontinuities, on the contribution of particular weathering/erosion agents and other variables. The resulting “arcade pattern”, however, determines the overall surface morphology of the outcrops (Fig. 30). As a result, several different morphologies are observed on the cliff faces: i) smooth surfaces with rather scarce arcade pits/cavities, ii) surfaces with multiple subhorizontal ledges with densely spaced, rather small arcade pits, and iii) complex 3D surfaces consisting of coalesced arcade pits/cavities of various sizes and ages.

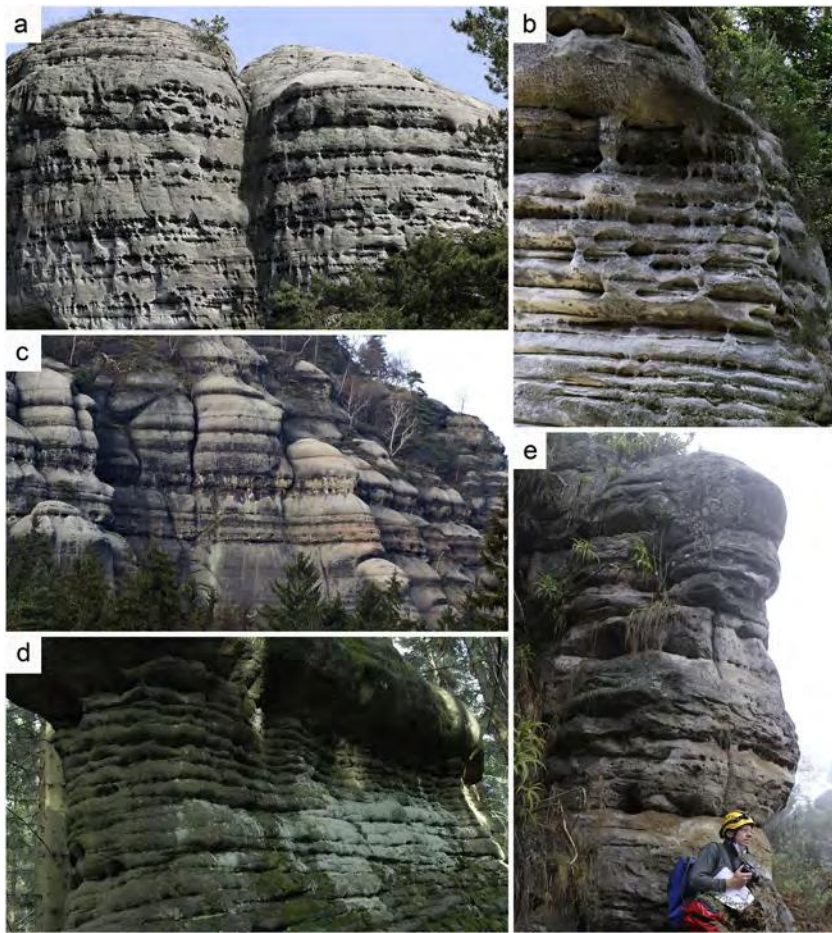
Most probably, the arcade-derived cavities play a role in the formation of protoconduits and later also cave passages in sandstones and quartzites (cf. figures 13, 15c, 25c, d in Wray and Sauro, 2017). There are several examples where arcade cavities are interconnected to form an initial underground network (Figs. 23b, d, 28a, b, c, e, and 29a). Joint-controlled sandstone maze caves, containing quartz sandstone pillars supporting a relict roof have been mentioned to develop under “peculiar geomorphologic settings” in Nawarla Gabarnmang in Arnhem Land, Australia (Grimes et al., 2009; Delannoy et al., 2013). South Africa also hosts a number of caves in quartzites, developed along lithological discontinuities (Martini, 2000; this paper). Vaulted forms cannot be documented in large spaces of these caves since they are strongly affected by collapsing but commonly occur in smaller channels and passages (Fig. 23d, e). Examples of arcade-related overhangs or



**Fig. 28.** Hourglass-shaped pillars in various sandstones originated due to arcade evolution: a) pillars in friable sandstones with a clearly visible discontinuity, Apolena Rock City, CZ; b) a pillar inside a larger cavity with a visible discontinuity and small young arcades in the middle and in the backwall of this cavity, Petra area, Jordan; c) a perfectly smoothed pillar with no visible discontinuity and small young arcades in the backwall of the cavity, Burda Bridge area, Wadi Rum, Jordan; d) pillars preserved inside a larger tafone which was most probably initiated as an arcade; note that the discontinuity is not visible any more, Colorado River-Narrow Canyon, Utah, USA; e) a large pillar supporting an arcade cavity, Příhrazy Rock City, CZ; f) pillars remaining after coalesced arcade pits in quartzite, transition to a ledge, Berlin Cave area, Nelspruit, South Africa. Scale bars 10 cm.



**Fig. 29.** Medium- and large-sized weathering forms related to stress-controlled weathering: a) half-lenticular arcade-like cavities situated on a major bedding plane, most probably formed by a combination of water seepage, freezing and salt precipitation (weakly lithified sandstones), Kokořín and Doksy area, CZ; b) alcove-like notches approximately 10 m wide, situated on a bedding plane where the weathered material was removed by sheet flow, Arches National Park, Utah, USA; c) typical alcoves situated on a lithological boundary and formed by water seepage, salt crystallization and rockfall; d) typical alcoves in a relatively uniform sandstone of the same origin as d), Glen Canyon, Utah, USA; e) typical alcoves up to 50 m wide in a 200 m high cliff face, Lake Powell shores, Utah, USA; f) arcade- / alcove-like cavities formed by sea action, chalk cliffs near Durdle Door, Dorset, England.



**Fig. 30.** Influence of arcades on rock surface morphology: a) a dense pattern consisting of numerous medium-sized arcades of mostly lenticular to rhombic shapes, friable sandstones of the Apolena Rock City, CZ; b) a close-up view of a mature arcade pattern; note the dominance of ledged morphology and the common coalescence of pits at places where the pillars became destructed, Apolena Rock City, CZ; c) a sparse pattern of rather larger arcades present only on prominent discontinuities passing to a ledged morphology, Kurort Oybin, Germany; d) a dense pattern consisting of numerous small arcades forming ledged morphology, Broumovské stěny Cliffs, CZ; e) an irregular pattern consisting of arcades of variable sizes, quartzite, Berlin Cave area, Nelspruit, South Africa.

even caves have been reported from lacustrine or marine coastal environments around the World (Fig. 29e, f). One of the best examples comes from Proterozoic sandstones of Apostle Islands, Lake Superior, Wisconsin (Supplementary figure 25a in Wray and Sauro, 2017 and elsewhere on the internet), where large cavities are accessible by a boat, and smaller arcades are common on cave and pillar walls.

## 5. Conclusion

Cavernous weathering forms on sandstone and other granular rocks were carefully reviewed and evaluated. A specific weathering form was recognized and referred to as “arcades”, or “arcade pits” and “arcade cavities” depending on their size. Arcades differ from “cavernous weathering forms *sensu stricto*” like honeycombs and tafoni in their clear association with planar discontinuities, distribution on the cliff face, geometry, and – most notably – their origin. Arcades are a product of redistribution of gravity-induced stress along planar discontinuities. These are characterized by negligible tensile and shear strength, and stress concentrates to arcade-like areas “bridging” the zones of mechanical weakness, thus forming stress shadows. In the portions of the cliff face defined by these stress shadows, rock disintegration and material loss proceed rapidly regardless of the specific erosion agents in charge. As a result, more or less regular pits and cavities of arcade-like shapes are formed. The tight relationship of arcades with planar discontinuities is reflected by their symmetry along these planes and in their typical linear arrangement. In addition, the processes responsible for the origin of arcades are tightly connected to the origin of hourglass-shaped rock pillars, rock ledges and some overhangs.

Stress-controlled and discontinuity-related weathering is responsible for the origin of a wide range of forms. In fact, this kind of

weathering controls the overall appearance of the cliff faces in many types of sandstone and in some other rocks. This should be taken into account if solving the morphology of a porous granular rock surface but also in speleogenesis.

To fully understand the nuances of arcade geometries, distribution and evolution, and especially the significance for the other weathering forms known from granular rocks, the various natural sites must be studied in detail, and, most of all, a more sophisticated numerical modelling must be applied. However, the presented results call for a careful re-evaluation of criteria used in the classification of cavernous weathering forms. The results clearly demonstrate that no direct link can be a priori drawn between the geometries or sizes of these forms and the weathering/erosion processes responsible for their origin. To the contrary, their geometry, evolution and lifespan are largely governed by physical fields in the rock regardless of the erosion agent in charge. Sorting of the weathering forms by their size, geometry or effects of local conditions (biota, salt contents, climate, etc.) appears to be secondary in this perspective.

Finally, this contribution is one of the first which employs numerical modelling of erosion to replicate the evolution rock landforms based on gravity-induced stress.

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.012>.

## Acknowledgement

The research was financed by the Czech Science Foundation (No. 16-19459S) and conducted within institutional support RVO 67985831 of the Institute of Geology of the Czech Academy of Sciences and by Center for Geosphere Dynamics (UNCE/SCI/006). The authors thank to

Jana Schweigstillová for cooperation within a microscopic study, Piotr Migoń for providing Polish geomorphological literature, Stephan Grab, Filip Duszyński, Michael Laumanns, Jan Mertlík, and Martin Sluka for their help with the preparation of some field trips, and Jan Soukup, Daniel Světlík and Jana Vaculíková for their help in the field experiments. We thank also Václav Cílek, Marek Audy, Filip Tomek and Zuzana Vařilová for providing photographs and valuable discussions. We wish to express our sincere thanks to Sklopísek Štefleč, a.s., namely to Lukáš Horák and managing director Petr Hübner for providing access to the quarry. The authors greatly appreciate constructive criticisms and suggestions of anonymous reviewers and handling editor Joan Florshiem, which helped to improve the manuscript.

## References

- Adamovič, J., 2016. The Kokořín area: sandstone landforms controlled by hydrothermal ferruginization. In: Hradecký, J. (Ed.), Pánek, T. Landscapes and landforms of the Czech Republic, Springer, pp. 153–164.
- Adamovič, J., Mikuláš, M., Cílek, V., 2006. Sandstone districts of the Bohemian Paradise: emergence of a romantic landscape. *Geolines* 21, 1–100 (Praha).
- Adamovič, J., Mikuláš, R., Cílek, V., 2010. Atlas pískovcových skalních měst České a Slovenské republiky: Geologie a geomorfologie. Academia, Praha (460 pp. (in Czech)).
- 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 (161), 29–45.
- Adamovič, J., Mikuláš, R., Navrátil, T., 2015. Spherical and ellipsoidal cavities in European sandstones: a product of sinking carbonate dissolution front. *Z. Geomorphol.* 59 (Suppl. 1), 123–149.
- Alexandrowicz, Z., 1970. Skałki piaskowcowe w okolicy Ciężkowic nad Białą. *Ochr. Przyr.* 35, 281–335 (In Polish).
- André, M.F., Hall, K., 2005. Honeycomb development on Alexander Island, glacial history of George VI. Sound and palaeoclimatic implications (Two Step Cliffs/Mars Oasis, W. Antarctica). *Geomorphology* 65, 117–138.
- Arino, 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.
- Arulananand, K., Heinzen, R.T., 1977. Factors influencing erosion in dispersive clays and methods of identification. In: *Proceedings of Erosion and Solid Matter Transport in Inland Waters*, 122, IAHS-AISH, Paris, pp. 75–81.
- Aubrecht, R., Láncoz, T., Schlögl, J., Audy, M., 2017. Small-scale modelling of cementation by descending silica-bearing fluids: explanation of the origin of arenitic caves in South American tepuis. *Geomorphology* 298, 107–117.
- Barton, N., 2013. Shear strength criteria for rock, rock joints, rock fill and rock masses: problems and some solutions. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 5, 249–261.
- Bischof, G., 1844. Das Felsen-Labyrinth zu Adersbach in Böhmen. *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie, Geologie und Petrefakten-Kunde* 482–486.
- Brinkgreve, R.B.J., Kumarswamy, S., Swolfs, W.M., 2016. *Plaxis 2014, Manual PLAXIS*, The Netherlands.
- Bruthans, J., Řihošek, J., 2017. Load stabilized sands in the Czech Republic and their peculiar geomechanical properties. *Geosc. Res. Reports* 50, 247–253 (in Czech).
- Bruthans, J., Světlík, D., Soukup, J., Schweigstillová, J., Válek, J., Sedlackova, 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.
- Bruthans, J., Soukup, J., Vaculíková, J., Filippi, M., Schweigstillová, J., Mayo, A.L., Mašín, D., Kletetschka, G., Řihošek, J., 2014. Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion. *Nat. Geosci.* 7, 597–601.
- Bruthans, J., Filippi, M., Schweigstillová, J., Řihošek, J., 2017. Quantitative study of a rapidly weathering sandstone overhang. *Earth Surf. Process. Landf.* 42 (5), 711–723.
- Bruthans, J., Filippi, M., Slavík, M., Svobodová, E., 2018. Origin of honeycombs: testing the hydraulic and case hardening hypotheses. *Geomorphology* 303, 68–83.
- Bryant, G., Cushman, R., Nick, K., Miall, A., 2016. Paleohydrologic controls on soft-sediment deformation in the Navajo Sandstone. *Sediment. Geol.* 344, 205–221.
- Cílek, V., Langrová, A., 1994. Skalní kůry a solné zvětrávání v CHKO Labské pískovce. *Ochr. Přír.* 49, 227–231 (in Czech).
- Cílek, V., Žák, K., 2007. Late Glacial and Holocene sedimentation under sandstone rock shelters on Northern Bohemia (Czech Republic). In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jakson, A., Williams, R. (Eds.), *Sandstone Landscapes*. Academia, Prague, pp. 133–138.
- Conca, J.L., Astor, A.M., 1987. Capillary moisture flow and the origin of cavernous weathering in dolerites of Bull Pass, Antarctica. *Geology* 15, 151–154.
- Conca, J.L., Rossman, G.R., 1982. Case hardening of sandstone. *Geology* 10, 520–523.
- Conca, J.L., Rossman, G.R., 1985. Core softening in cavernously weathered tonalite. *J. Geol.* 93, 59–73.
- Czeppe, Z., 1952. Z morfologii Gór Stołowych. *Ochr. Przyr.* 20, 236–252.
- De Prado, C., 1864. *Description física y geológica de la Provincia de Madrid*. Publicaciones especiales Colegio de Ingenieros de Caminos Canales y puertos, Madrid (353 pp).
- Delannoy, J.J., David, B., Geneste, J.M., Katherine, M., Barker, B., Wheat, R.L., Gunn, R.G., 2013. The social construction of caves and rockshelters: Chauvet Cave (France) and Nawarla Gabarnmang (Australia). *Antiquity* 87 (335), 12–29.
- Doe, N.A., 2011. The geometry of honeycomb weathering of sandstone. *Shale* 26, 31–60.
- Doe, N.A., 2015. Colonial corallites and honeycomb holes in sandstone. *SILT 15*, available online at: [www.nickdoe.ca/pdfs/Webp555c.pdf](http://www.nickdoe.ca/pdfs/Webp555c.pdf), Accessed date: 21 July 2015.
- Dorn, R.I., Gordon, S.J., Allen, C.D., Cervený, N., Dixon, J.C., Groom, K.M., Hall, K., Harrison, E., Mol, L., Paradise, T.R., Sumner, P., Thomson, T., Turkington, A.V., 2013. The role of fieldwork in rock decay research: case studies from the fringe. *Geomorphology* 200, 59–74.
- Dumanowski, B., 1961. Forms of spherical cavities in the Stolowe Mountains. – *Zeszyty nauk. In: Univ. Wrocław., Wrocław. Ser. B. vol. 8. pp. 123–137.*
- Gómez-Alarcón, G., Muñoz, M., Ariño, X., Ortega-Calvo, J.J., 1995. Microbial communities in weathered sandstones: the case of Carrasosa del Campo church, Spain. *Sci. Total Environ.* 167, 249–254.
- Goudie, A.S., 2013. *Arid and Semi-arid Geomorphology*. Cambridge University Press (454 pp).
- Goudie, A.S., Migoń, P., Allison, R.J., Rosser, N., 2002. Sandstone geomorphology of the Al-Quwayra area of south Jordan. *Z. Geomorphol. N.F.* 46 (3), 365–390.
- Grimes, K.G., Wray, R.A.L., Spate, A., Houshold, I., 2009. Karst and Pseudokarst in Northern Australia. In: Report to Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts, Australia. Canberra.
- Groom, K.M., Allen, C.D., Mol, L., Paradise, T.R., Hall, K., 2015. Defining tafoni: re-examining terminological ambiguity for cavernous rock decay phenomena. *Prog. Phys. Geogr.* 39 (6), 775–793.
- Häberle, D., 1911. Über Kleinformen der Verwitterung im Hauptbuntsandstein des Pfälzerwaldes. *Verh. Naturh.-medizin. Ver. Heidelberg, N.F.* 11 (2), 166–209.
- Hasiotis, S.T., 2004. Reconnaissance of Upper Jurassic Morrison Formation ichnofossils, Rocky Mountain Region, USA: paleoenvironmental, stratigraphic, and paleoclimatic significance of terrestrial and freshwater ichnocoenoses. *Sediment. Geol.* 167, 177–268.
- Hess, R., 2010. *Blender Foundations: The Essential Guide to Learning Blender 2.6*. Focal Press, Burlington.
- Hettner, A., 1887. *Gebirgsbau und Oberflächengestaltung der Sächsischen Schweiz*. J. Engelhorn, Stuttgart (355 pp).
- Holland, W.M., 1977. Slot valleys. *Austr. Geogr.* 13, 338–339.
- Howard, A.D., Kochel, R.C., 1988. In: Howard, A.D., Kochel, R.C., Holt, H.E. (Eds.), *Sapping Features of the Colorado Plateau*. STIO & NASA, pp. 6–56.
- Huang, R., Wang, W., 2017. Microclimatic, chemical, and mineralogical evidence for tafoni weathering processes on the Miaowan Island, South China. *J. Asian Earth Sci.* 134, 1–12.
- Huinink, H.P., Pel, L., Kopinga, K., 2004. Simulating the growth of tafoni. *Earth Surf. Process. Landf.* 29, 1225–1233.
- Inkpen, R., Hall, K., 2016. Using morphospaces to understand tafoni development. *Geomorphology* 261, 193–199.
- Klaer, W., 1956. *Verwitterungsformen im Granit auf Korsika*. Petermanns Mitteilungen Ergänzungshefte 261 (146 pp).
- Klimaszewski, M., 1932. Some problems of the glaciation in Poland. *Ann. Soc. Geol. Pol.* 8, 2.
- Klimchouk, A., De Waele, J., 2017. Types and settings of hypogene karst. In: Klimchouk, A., Palmer, A.N., Auler, A.S., Audra, P. (Eds.), *Hypogene karst regions and caves of the World*. Springer, pp. 1–39.
- Kulič, V., 1983. *Geneze voštin v pískovci*. SVOČ, Katedra hydrogeologie a inženýrské geologie Přírodovědecké fakulty University Karlovy v Praze (43 pp, (in Czech)).
- Kvelberg, J., Popoff, B., 1938. *Die Tafoni Verwitterungs-erscheinung*. In: Kimijas Fakultates, Latvijas Univ. Raksti, Riga, Seria IV. 6. pp. 129–369.
- Laity, J.E., Malin, M.C., 1985. Sapping processes and the development of theater-headed valley networks on the Colorado Plateau. *GSA Bull.* 96 (2), 203–217.
- Laue, S., Siedel, H., Hilbert, G., Pfefferkorn, S., 2005. Alveolarverwitterung und schichtparalleles Auswittern der Kreidesteine an der Kirche von Leuba/Sachsen. *Z. Dtsch. Ges. Geowiss.* 156/1, 141–149 (in German).
- Ludovico-Marques, M., Chastre, C., 2012. Effect of salt crystallization ageing on the compressive behavior of sandstone blocks in historical buildings. *Eng. Fail. Anal.* 26, 247–257.
- Martini, J.E.J., 2000. Quartzite caves in Southern Africa. In: Klimchouk, A.B., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt, W. (Eds.), *Speleogenesis – Evolution of Karst Aquifers*. NSS, Huntsville, pp. 458–461.
- McBride, E.F., Picard, M.D., 2000. Origin of development of tafoni in Tunnel Spring Tuff, Crystal Peak, Utah, USA. *Earth Surf. Process. Landf.* 25, 869–879.
- McBride, E.F., Picard, M.D., 2004. Origin of honeycombs and related weathering forms in Oligocene Macigno Sandstone, Tuscan coast near Livorno, Italy. *Earth Surf. Process. Landf.* 29, 713–735.
- McGreevy, J.P., 1982. Frost and salt weathering: further experimental results. *Earth Surf. Process. Landf.* 7, 475–488.
- Migoń, P., 2006. *Granite Landscapes of the World*. Oxford University Press, New York (417 pp).
- Mikuláš, R., 2001. Gravity and orientated pressure as factors controlling “honeycomb weathering” of the Cretaceous castellated sandstones (Northern Bohemia, Czech Republic). *Bull. Czech Geol. Surv.* 76, 217–226.
- Mikuláš, R., 2007. Microforms of the sandstone relief. In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jakson, A., Williams, R. (Eds.), *Sandstone Landscapes*. Academia, Prague, pp. 66–75.
- Mikuláš, R., 2010. Drobné tvary na povrchu pískovcových skal. *Akademický Bull.* 2, 16–18 (in Czech).
- Mol, L., 2014. Investigations into the relationship between changes in internal moisture regimes and rock surface deterioration in cavernous sandstone features. *Earth Surf. Process. Landf.* 39, 914–927.
- Mol, L., Viles, H.A., 2010. Geoelectric investigations into sandstone moisture regimes: implications for rock weathering and the deterioration of San Rock Art in the Golden

- Gate Reserve, South Africa. *Geomorphology* 118, 280–287.
- Mol, L., Viles, H.A., 2012. The role of rock surface hardness and internal moisture in tafoni development in sandstone. *Earth Surf. Process. Landf.* 37, 301–314.
- Mottershead, D.N., 1997. A morphological study of greenschist weathering on dated coastal structures, South Devon, UK. *Earth Surf. Process. Landf.* 22, 491–506.
- Mottershead, D.N., Pye, K., 1994. Tafoni on coastal slopes, South Devon, UK. *Earth Surf. Process. Landf.* 19 (6), 543–563.
- Mustoe, G.E., 1982. The origin of honeycomb weathering. *Geol. Soc. Am. Bull.* 93, 108–115.
- Mustoe, G.E., 2010. Biogenic origin of coastal honeycomb weathering. *Earth Surf. Process. Landf.* 35, 424–434.
- Norwick, S.A., Dexter, L.R., 2002. Rates of development of tafoni in the Moekopi and Kaibab formations in meteor crater and on Colorado plateau, northeastern Arizona. *Earth Surf. Process. Landf.* 27, 11–27.
- Oberlander, T.M., 1977. Origin of segmented cliffs in massive sandstones of southeastern Utah. In: Doehring, D.O. (Ed.), *Geomorphology of Arid Regions*. Allen and Unwin, Boston, pp. 79–114.
- Ostanin, I., Safonov, A., Oseledets, I., 2017. Natural erosion of sandstone as shape optimisation. *Sci. Rep.* 7 (1), 17301.
- Paradise, T.R., 1997. Disparate sandstone weathering beneath lichens on Red Mountain Arizona. *Geogr. Ann.* 79, 177–184.
- Paradise, T.R., 2013. Tafoni and other rock basins. In: Pope, G.A. (Ed.), *Treatise on Geomorphology 4. Weathering and Soils Geomorphology*. Academic Press, San Diego, pp. 111–126.
- Peng, H., Pan, Z., Qiu, Z., 2015. Weathering pattern and development process of bedding-controlled caves at Mt. Danxiashan, China. *Z. Geomorphol.* 59 (Suppl. 1), 167–184.
- Rast, H., 1959. *Geologischer Führer durch das Elbsandsteingebirge*. Bergakademie Freiberg, Freiberg (224 pp).
- Richards, N.P., Barton, M.E., 1999. The Folkestone Bed sands: microfabric and strength. *Q. J. Eng. Geol.* 32, 21–44.
- Rihosek, J., Bruthans, J., Masin, D., Filippi, M., Carling, G.T., Schweigstillova, J., 2016. Gravity-induced stress as a factor reducing decay of sandstone monuments in Petra, Jordan. *J. Cult. Herit.* 19, 415–425.
- Robinson, D.A., 2007. *Geomorphology of the inland sandstone cliffs of Southeast England*. In: Härtel, H., Cílek, V., Herben, T., Jackson, A., Williams, R. (Eds.), *Sandstone Landscapes*. Academia, Prague, pp. 44–51.
- Robinson, D.A., Williams, R.B.G., 2000. Experimental weathering of sandstone by combinations of salts. *Earth Surf. Process. Landf.* 25, 1309–1315.
- Roddean, D., 2017. *Tochnog professional. Finite element application technology*, (2017, accessed date) [www.feat.nl](http://www.feat.nl).
- Rodriguez-Navarro, C., Doehne, E., Sebastian, E., 2000. How does sodium sulfate crystallize? Implications for the decay and testing of building materials. *Cem. Concr. Res.* 30, 1527–1534.
- Roqué, C., Zarroca, M., Linares, R., 2013. Subsurface initiation of tafoni in granite terrains – geophysical evidence from NE Spain: geomorphological implications. *Geomorphology* 196, 94–105.
- Ruedrich, J., Siegesmund, S., 2006. Fabric dependence of length change behaviour induced by ice crystallization in the pore space of natural building stones. In: Fort, R., Alvarez de Vuegro, M., Gomez-Heras, M., Vazquez-Calco, C. (Eds.), *Heritage, Weathering and Conservation*. Taylor & Francis Group, London, pp. 497–505.
- Sauro, F., 2014. Structural and lithological guidance on speleogenesis in quartz-sandstone: evidence of the arenisation process. *Geomorphology* 226, 106–123.
- Schnepfleitner, H., Sass, O., Fruhmans, S., Viles, H., Goudie, A., 2016. A multi-method investigation of temperature, moisture and salt dynamics in tafoni (Tafraute, Morocco). *Earth Surf. Process. Landf.* 41, 473–485.
- Siedel, H., 2010. Alveolar weathering of Cretaceous building sandstones on monuments in Saxony, Germany. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.* 333 (1), 11–23.
- Slavík, M., Bruthans, J., Filippi, M., Schweigstillová, J., Falteisek, L., Řihošek, J., 2017. Biologically-initiated rock crust on sandstone: mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion. *Geomorphology* 67, 211–227.
- Smith, B.J., McAlister, J.J., 1986. Observations on the occurrence and origins of salt weathering phenomena near Lake Magadi, southern Kenya. *Z. Geomorphol. N.F.* 30, 445–460.
- Smith, B.J., Warke, P.A., McGreevy, J.P., Kane, H.L., 2005. Salt-weathering simulations under hot desert conditions: agents of enlightenment or perpetrators of preconceptions? *Geomorphology* 67, 211–227.
- Steiger, M., Charola, A.E., Sterflinger, K., 2011. Weathering and deterioration. In: Siegesmund, S., Snetlage, R. (Eds.), *Stone in Architecture: Properties, Durability*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 227–316.
- Sunamura, T., 1996. A physical model for the rate of coastal tafoni development. *J. Geol.* 104, 741–748.
- Turkington, A., Phillips, J.D., 2004. Cavernous weathering, dynamical instability and self-organization. *Earth Surf. Process. Landf.* 29, 665–675.
- Twidale, C.R., 1982. Caves and Tafoni. In: Twidale, C.R. (Ed.), *Granite Landforms*. Elsevier, Amsterdam, pp. 280–300.
- Urban, J., Górník, M., 2017. Some aspects of lithological and exogenic control of sandstone morphology, the Świętokrzyskie (Holy Cross) Mts. case study, Poland. *Geomorphology* 295, 773–789.
- Vaňilová, Z., Příkryl, R., Cílek, V., 2011. Pravčice Rock Arch (Bohemian Switzerland National Park, Czech Rep.): deterioration due to natural and anthropogenic weathering. *Environ. Earth Sci.* 63, 1861–1878.
- Vidal-Romaní, J.R., 2008. Forms and structural fabric in granite rocks. *Cadernos Laboratorio Xeolóxico de Laxe* 33, 175–198.
- Viles, H.A., 2001. Scale issues in weathering studies. *Geomorphology* 41, 63–72.
- Viles, H., 2005. Self-organized or disorganized? Towards a general explanation of cavernous weathering. *Earth Surf. Process. Landf.* 30, 1471–1473.
- Viles, H.A., Goudie, A.S., 2004. Biofilms and case hardening on sandstones from Al-Quwayra, Jordan. *Earth Surf. Process. Landf.* 29, 1473–1485.
- Vítek, J., 1981. Morfogenetická typizace pseudokrasu v Československu (Morphogenetic typology of pseudokarst in Czechoslovakia). *Sbor. Českosl. Geograf. Spol.* 86, 153–165 (in Czech).
- Walder, J.S., Hallet, B., 1986. The physical basis of frost weathering: toward a more fundamental and unified perspective. *Arct. Alp. Res.* 18 (1), 27–32.
- Wilhelmy, H., 1958. *Klimamorphologie der Massengesteine*. Westermann, Braunschweig (238 pp).
- Wilhelmy, H., 1964. Cavernous rock surfaces (tafone) in semiarid and arid climates. *Pakistan Geograph. Rev.* 19, 9–13.
- Williams, R.B.G., Robinson, D.A., 1981. Weathering of sandstone by the combined action of frost and salt. *Earth Surf. Process. Landf.* 6, 1–9.
- Wojewoda, J., 2012. Geology and geological history. In: Kasprzak, M., Migoń, P. (Eds.), *Góry Stołowe. Geology, Landforms, Vegetation Patterns and Human Impact*. University of Wrocław, Wrocław, pp. 7–11.
- Worthington, S.R.H., Davies, G.J., Alexander Jr., E.C., 2016. Enhancement of bedrock permeability by weathering. *Earth-Sci. Rev.* 160, 188–202.
- Wray, R.A.L., Sauro, F., 2017. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Sci. Rev.* 171, 520–557.
- Wyckoff, J., 1999. The works of weather. In: Wyckoff, J. (Ed.), *Reading the Earth/Landforms in the Making*. Adastra West, Inc., Mahwah, pp. 21–63.
- Young, R.W., Wray, R.A.L., Young, A.R.M., 2009. *Sandstone Landforms*. Cambridge University Press, Cambridge (317 pp).

# Quantitative study of a rapidly weathering overhang developed in an artificially wetted sandstone cliff

Jiří Bruthans,<sup>1\*</sup> Michal Filippi,<sup>2</sup> Jana Schweigstillová<sup>3</sup> and Jaroslav Řihošek<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Faculty of Science, Charles University, Prague, Czech Republic

<sup>2</sup> Institute of Geology, The Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic

<sup>3</sup> Institute of Rock Structure and Mechanics, The Czech Academy of Sciences, Prague, Czech Republic

Received 27 November 2015; Revised 24 July 2016; Accepted 28 July 2016

\*Correspondence to: Jiří Bruthans, Faculty of Science, Charles University, Albertov 6, 128 43 Praha 2, Czech Republic. E-mail: bruthans@natur.cuni.cz

ESPL

Earth Surface Processes and Landforms

**ABSTRACT:** Those factors controlling the weathering and erosion of sandstone on the field scale are still not well understood. In this study, a specific sandstone overhang (and its surroundings) with artificially induced and extremely high erosion rates was subjected to a complex investigation. Contrast between the erosion rate of the wet and dry portions of the same cliff enabled isolation of the factors responsible for rapid sandstone retreat. Erosion rates, moisture, and salt content, as well as suction were monitored in the field. Mineral phases and water chemistry were analyzed. The measurement of tensile strength, laboratory frost weathering tests, and numerical modeling of stress were performed. The acquired data show that an increase of moisture content in pores in the area of the studied overhang decreased tensile strength of the sandstone to 14% of its dry value, and increases the sandstone weathering and erosion rate, by nearly four orders of magnitude, compared to the same sandstone under natural moisture conditions outside of the cliff area. Consequently, frost weathering, in combination with wetting weakening was found to play a major role in weathering/erosion of the sandstone cliff and overhang. Frost weathering rate in both the laboratory and field increases up to 15 times with decreasing gravity-induced stress. The results also indicate that sandstone landforms in temperate climates may potentially develop very rapidly if the pore space is nearly saturated with water, and will later remain relatively stable when the moisture content decreases. As a general implication, it is suggested that overhangs in Central Europe (and elsewhere) might be the result of rapid frost weathering of nearly saturated sandstone during the Last Glacial. Copyright © 2016 John Wiley & Sons, Ltd.

**KEYWORDS:** sandstone overhang; retreat; frost weathering; erosion rate; stress

## Introduction

Weathering and erosion of sandstone produces a great variety of natural landforms (Young *et al.*, 2009). Some of the finest ancient monuments are carved in sandstone (e.g. Petra, Jordan, Heinrichs, 2008), and sandstone is also one of the most frequently used dimension stones (Siegesmund and Snehlage, 2011). Thus, understanding the weathering and erosion of sandstone is crucial in the preservation of unique natural landforms as well as in protecting ancient monuments. However, those factors affecting sandstone weathering and erosion are still not well understood, especially on the field scale as the following authors demonstrate on numerous examples (Viles, 2001, 2013; Turkington and Paradise, 2005; Warke *et al.*, 2006; Ruedrich and Siegesmund, 2007; Mol, 2014).

Salt and frost weathering are probably the most common processes responsible for sandstone degradation on bare sandstone surfaces (Steiger *et al.*, 2011). This is nicely demonstrated by Huinink *et al.* (2004) showing that the location where salt weathering will occur is controlled by the moisture flux, and hence by the hydraulic field and its boundary conditions. Mol and Viles (2012) documented a dynamic relationship between

surface hardness (i.e. case hardening), degree of weathering, and internal moisture regimes. Laboratory experiments on sandstone specimens several centimeters in size, make it possible to compare the durability of various sandstone types to a specific salt, to frost weathering, or to test the degree of damage created by various salts to a single sandstone lithology (Robinson and Williams, 2000; Williams and Robinson, 2001). However, these experiments are on too small a scale and too simplified to account for effects of the hydraulic field and other factors occurring on the field scale. Also, moisture content and other conditions used in laboratory tests are often far from the conditions present in the field (Dorn *et al.*, 2013).

As has recently been shown by laboratory experiments performed on many different sandstone types and under controlled conditions, increased gravity-induced stress (hereafter 'stress') significantly decreases the salt and frost weathering rate (Bruthans *et al.*, 2014; Řihošek *et al.*, 2016). Via physical modeling it was also demonstrated that stress plays a crucial role in the origin of natural sandstone landforms such as pillars, arches, alcoves, and pedestal rocks. Numerical modeling revealed how erosion and weathering are coordinated by the stress field to reshape the original rock exposure geometry into

a new one, where portions with low loading have been removed (Bruthans *et al.*, 2014). Nevertheless, it is still difficult to carry out a relevant quantitative study of those factors affecting the weathering and erosion rates in the field for the following specific reasons: Erosion is too slow to be measured over the same time period as those factors affecting it. Contrast in weathering intensity at a single locality is too small to see clear differences in erosion rates. Too many weathering factors occur at a single location and/or during the same time period. Finally, lithology changes on the same scale as the weathering factors, such that the effects of weathering and lithology on the erosion rate can not be separated.

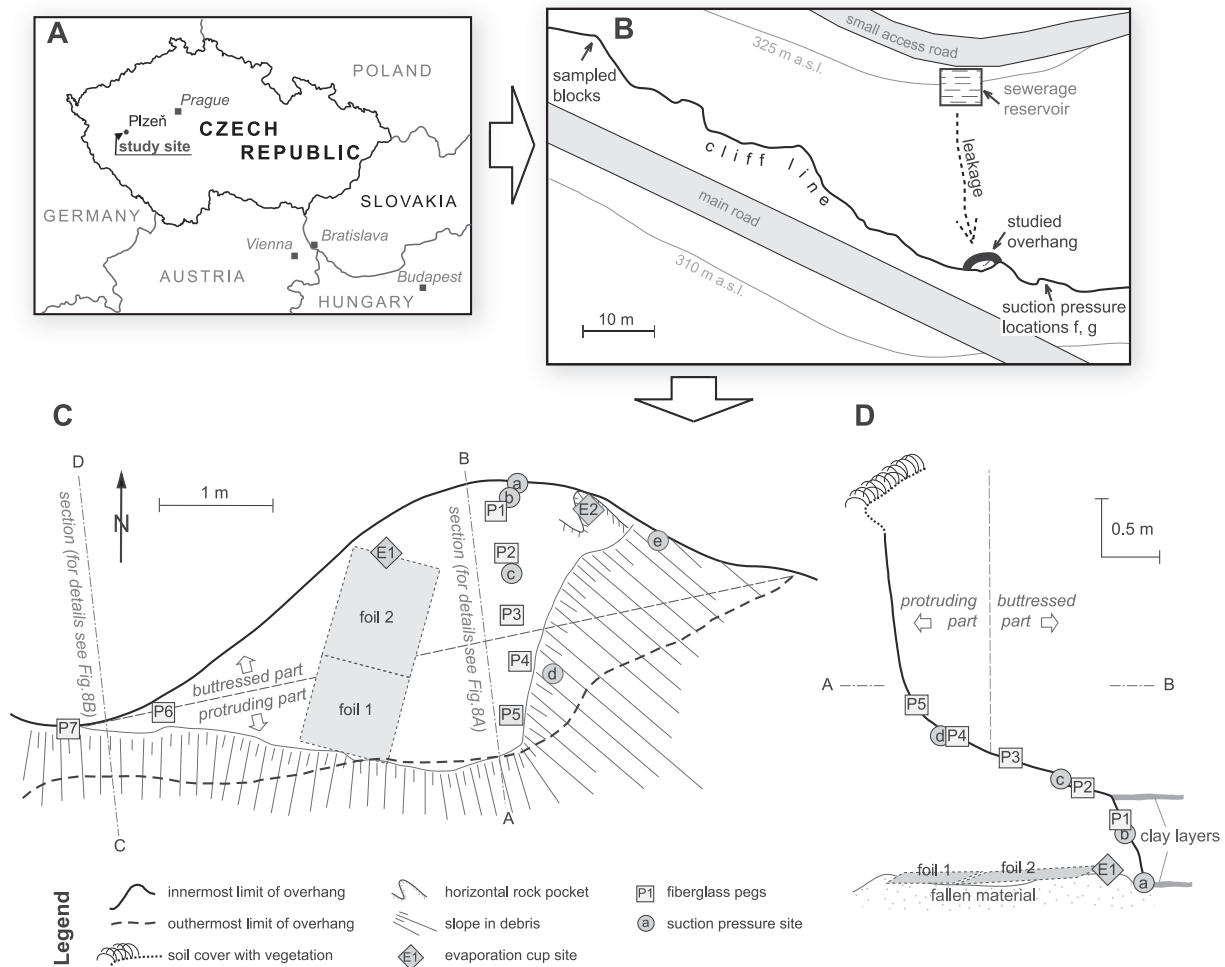
That is why the present study is focused upon a unique sandstone overhang with extremely high erosion rates (Figures 1A–1D, 2A, and 2B). During the last ~35 years, the fallen material has gradually accumulated below the overhang, forming a 1.8 m high pile (mean debris accumulation rate of approximately 50 mm/yr; time period reported by a local resident). Such rapid sandstone erosion only occurs in this overhang, the only wet place in the studied sandstone cliff. The source of the moisture at the overhang is suspected to be a leak from a sewerage reservoir (Figure 1B). No other segments of the sandstone cliff (including other overhangs) show traces of such rapid erosion. A well-preserved engraving '1915', which was found just 5 m to the west of the overhang in the same sandstone layer (Figure 2C), demonstrates that the erosion rate does not exceed 1 mm/100 yr on dry surfaces.

The erosion rate at the seasonally wet overhang is at least 2000 times faster.

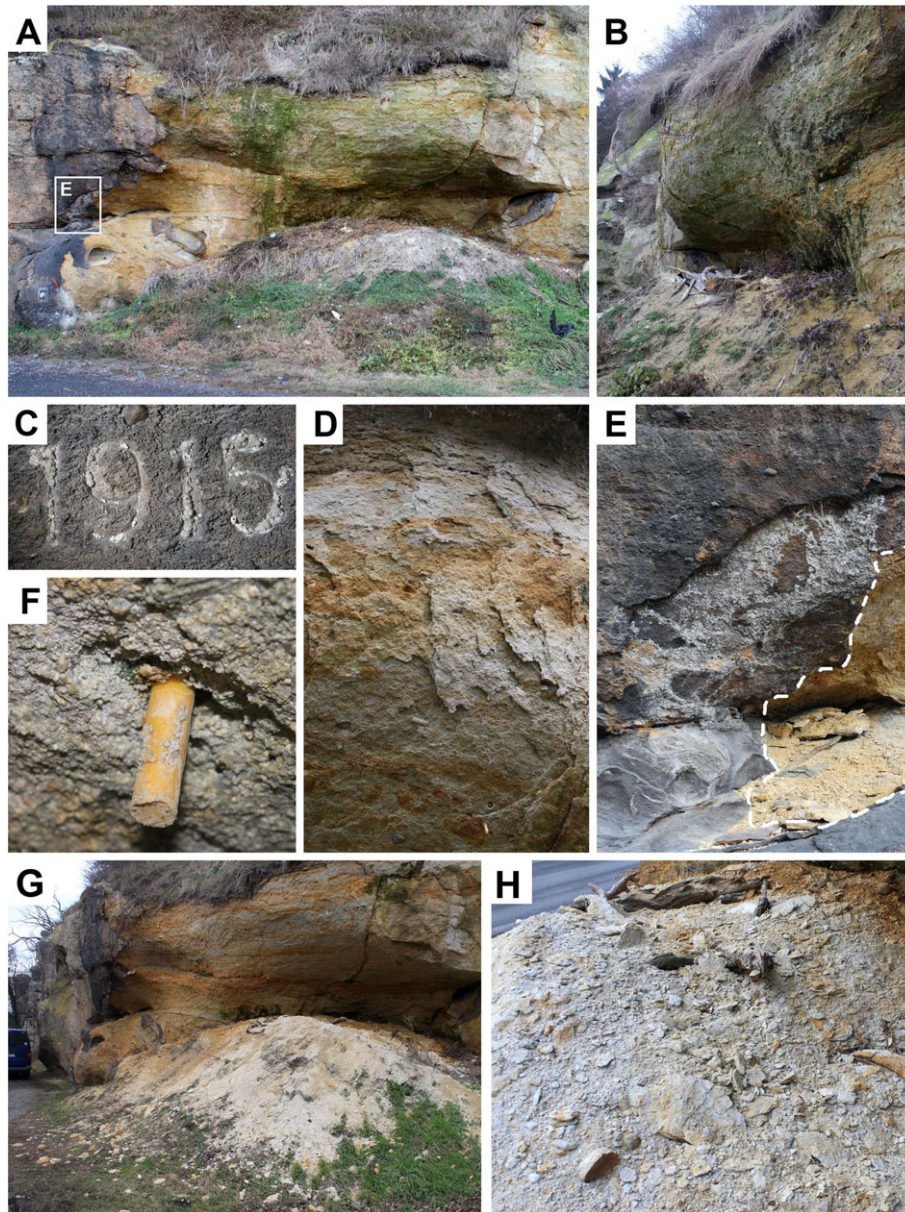
We consider this overhang as an appropriate field-scale and decade-long 'model', which may facilitate an understanding of rapid sandstone weathering and erosion under real conditions, in general. As the rapid decay of sandstone in this locality is confined to a limited place with neighboring stable sandstone, the properties of both environments can be compared.

The purpose of this study was to characterize those factors responsible for the rapid weathering and erosion of the sandstone in the overhang in contrast to the stable sandstone in its immediate surroundings and use this knowledge to interpret relative rate of erosion of overhangs in the past in Central Europe and elsewhere. To attain this, the following particular tasks were carried out:

- sandstone and salt efflorescence were characterized from the mineralogical point of view and the salt content was determined;
- erosion rates were measured – at various locations in the overhang, and the conditions under which the erosion rates were maximal and minimal were analyzed;
- selected parameters including, tensile strength, moisture, suction and water chemistry were monitored in the overhang and its vicinity;
- the field data were complemented with a laboratory simulation of frost weathering of the sandstone, and numerical modeling of the stress in the studied overhang.
- erosion rates measured in the artificially wetted overhang were compared with those derived for overhangs with ambient moisture content in Central Europe and Colorado



**Figure 1.** Overall situation of the studied overhang: (A) location in Europe; (B) study area; (C) plan of the studied overhang, with positions of particular sites; for details about the sections A–B and C–D see Figures 8A and 8B; (D) vertical section by the overhang.



**Figure 2.** Field situation of the overhang and nearby surroundings: (A) front view of the overhang with the heap of fallen materials (photograph taken prior to first freezing – December 2011) – note the vegetation cover at the heap top; (B) side view; (C) well-preserved engraving '1915' situated 5 m to the west of the overhang; (D) flakes parallel to overhang surface; (E) detail from part A showing case hardening covered by salt efflorescence outside of the studied overhang area (left from the dashed line); (F) fiberglass pegs for measurement of erosion rate; (G) stable cliff wall with case hardening (left in the photograph), and front side view of the overhang with heap covered by freshly fallen material – March 2013); (H) accumulation of flakes and sand on the top of the heap. [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

Plateau (USA) and used to develop ideas on the timing of evolution of these overhangs.

### Characteristics of the Study Area

The studied overhang developed in a sandstone cliff named 'Čertova Kazatelna' ('Devil's Pulpit' in English), and is situated 85 km west-southwest (WSW) of Prague in the western part of the town of Plzeň, at an altitude of 315 m above sea level (a.s.l.) (Figures 1A and 1B). The mean annual precipitation in the area is 527 mm, with an average temperature of 7.5 °C (Station Plzeň-Bolevec, 1961–1990). The mean regional evapotranspiration is ~90% (according to the Czech Hydrometeorological Institute).

The cliff is approximately 700 m long and up to 22 m high, and it lines the alluvium of the Mže River (Vítek, 1987). The cliff

is formed by arkosic sandstone and conglomerate that belong to the upper part of Nýřany member of the Kladno formation, which is of Carboniferous age. The material of the cliff is fluvial in origin, with common cross-bedding (Opluštil *et al.*, 2005), belonging to the Plzeň Basin, one of the post-Variscan intermountain depressions, with a several hundred meter thick infill. The sediments are faulted but not folded, the beds are subhorizontal. The cliff hosts several overhangs, numerous tafoni-like forms, and honeycombs (Vítek, 1987).

The easternmost part of the cliff, in close proximity to the overhang, is studied; it is located at 49°45'28.1"N, 13°20'24.3"E (Figure 1B). Here, the cliff is from 6 to 10 m high. The studied overhang, approximately 3 m wide and up to 1.5 m deep, is situated at the base of the cliff (Figures 1C, 2A, and 2B). The overhang faces southward. Its sides and ceiling are made of coarse sandstone and conglomerate, with sporadic pebbles up to 5 cm in size. Two thin (~1 cm) clay horizons



cause abrupt changes in the ceiling geometry (Figure 1D). The overhang's sides and ceiling are decaying into flakes from several millimeters up to several tens of millimeters thick, similar to those described by Dragovich (1967). Flakes are parallel to the overhang surface (Figure 2D). The pile below the overhang has formed by the accumulation of fallen flakes. Outside the area of the studied overhang, the sandstone exposures are mostly covered by case hardening 5–16 mm thick (Figure 2E). Relics of the case hardening in some parts of the overhang indicate that the case hardening originally occurred there, as well. Salt efflorescences are common on sandstone exposures shielded from the rain; by contrast, they occur only temporarily on the studied overhang. In the colder periods of the year, water drips from the western part of the overhang.

## Materials and Methods

### Solid sampling and sample treatment

Solid samples were taken from the overhang, and also from other parts of the cliff; i.e. from a sandstone outcrop unaffected by seeping moisture. For the locations of the sampling sites see Figures 1C and 1D. Samples 5 mm thick (approximately 5–20 g of material) were scraped off from the surface zone of the overhang. This material was used for solid phase identification, as well as periodic determination of moisture and salt contents. Samples were taken from the wider surroundings of fiberglass pegs (Figure 2F) in order to not affect the erosion rates. Additionally, materials that fell onto plastic foil were sampled for a mineralogical study and measurements of their tensile strength. Sandstone blocks sampled outside the overhang area from the same lithological horizon were used as background for both the tensile strength measurements and frost weathering tests.

### Phase identification and salt content

To determine the mineralogical composition of the matrix in the sandstone cliff, the fine clay- and silt-fraction was separated by sedimentation of the disintegrated flakes in distilled water. Phase identification was determined by conventional X-ray diffraction (XRD) analyses using a PANalytical X'Pert Pro diffractometer under the following conditions: CuK $\alpha$  radiation 40 kV, 30 mA, step scanning at 0.013°/300 s in the range 2°–89° 2 $\theta$ . Qualitative analysis was performed using the HighScorePlus software package (PANalytical, the Netherlands; HighScore-Plus, 2011), Diffrac-Plus software package (Bruker AXS, Germany), and JCPDS PDF-2 database (2004).

To determine the salt content, the solid material was dried at 105 °C until a stable weight was obtained, crushed by a rubber pestle, and quartered. A small amount of material was mixed with deionized water (1:100), shaken at 150 RPM for 24 hours, filtered through a membrane filter (Millipore®), and stored in HDPE bottles in the cold. The conductivity of leachates was measured, and TDS (total dissolved solids) was calculated from the electric conductivity of the leachate based on a calibration using the chemical composition of the analyzed leachates.

### Measurement of erosion rate

Two different approaches were applied to measure the erosion rate of the sandstone overhang. The first approach consisted of placing the plastic foil on the floor below the overhang ceiling, and collecting the fallen material during several time periods (Figures 1C and 1D). The fallen material was dried, weighed,

and its weight was divided by the surface area of the plastic foil, and by the time period for which material was collected (in kg/m<sup>2</sup>/day). Finally, the erosion rate was calculated from the accumulation rate using the following equation:

$$RR = AR / \text{dens} * AC_{\text{area}} / EX_{\text{area}},$$

where RR is the erosion rate (in m/day); AR is the accumulation rate (in kg/m<sup>2</sup>/day); dens is sandstone density (in kg/m<sup>3</sup>); AC<sub>area</sub> is the extent of the accumulation area (in m<sup>2</sup>); EX<sub>area</sub> is the extent of the exposure area (in m<sup>2</sup>).

Between 2008 and 2011, the rate was occasionally measured in 0.2–1 day long periods during different seasons of the year. Between December 26, 2012 and March 14, 2015 the erosion rate was measured continuously in 1–3 month long periods.

The second approach was based on placing fiberglass pegs (0.8 cm in diameter, ~15 cm long, Figure 2F) into drill holes in the sandstone, fixing them with epoxy resin, and measuring the distance between the peg top and the rock surface in the peg's surroundings with a caliper. Five fiberglass pegs (P1–P5) were emplaced into the overhang on March 3, 2013, forming a line from the innermost part of the overhang outwards (Figures 1C and 1D). Two additional pegs (P6 and P7) were placed on December 2, 2013 on the vertical wall west of the overhang. Surface erosion around the fiberglass pegs was measured in 1–3 months long periods. Due to the undulating surface, the distance between the peg top and rock surface is measured with a precision of  $\pm 2$  mm.

Sandstone bulk density was measured on small samples by the wax immersion method (ASTM, 2004). The bulk density of debris which had accumulated in a pile below the overhang was measured as the ratio of the weight of debris taken from a hole dug into the debris pile, divided by the volume of the hole. The hole bottom and sides were covered by thin plastic foil, and the volume of the excavated material was measured by the amount of liquid needed to fill the hole.

Erosion rates were compared with air temperatures measured hourly at the Plzeň Mikulka station (Czech Hydrometeorological Institute, situated 3 km east of the overhang, altitude of 370 m a.s.l.). Total duration of freezing was calculated for each period. As a second parameter, those continuous freezing periods exceeding 24 hours were selected, and their duration was multiplied by the mean temperature during the period. Resulting numbers were summed over each monitoring period. This parameter, called FDI (°C  $\times$  day) later in the text, accounts for both the duration and intensity of freezing.

### Tensile strength measurement

Cementation cohesion of sandstone can be roughly approximated by the tensile strength (Bruthans *et al.*, 2012b, 2014). The tensile strength is an important property showing resistance of sandstone to disruptive impact of majority of weathering and erosion processes (Steiger and Asmussen, 2008; Goudie, 2013). The tensile strength of dry and water saturated samples was measured in the laboratory. Strips of T profile (aluminum with a 2 by 2 cm surface area) were glued with epoxy to the sandstone surfaces. After hardening, a tensile force was gradually increased perpendicular to the sandstone surface until the sandstone beneath the epoxy failed. The maximum (pull off) force and effective area was measured (tensiometer) and calculated in kPa (Bruthans *et al.*, 2014). The dry tensile strength was measured after drying the sample under laboratory conditions (25 °C, 50% relative humidity). The saturated tensile strength was measured by placing the sandstone blocks in a water tank

(with the surface measured facing upward). The block was slowly saturated adding water, and the tensile strength was measured after one week of saturation.

### Determination of moisture content and drip water/leachate chemistry

Moisture content is a key factor in many processes of weathering and deterioration affecting sandstones (Viles and Goudie, 2007; Mol and Viles, 2010). Moisture content in the overhang subsurface was measured by the gravimetric method. The material was weighed in the field, dried at 105 °C, and weighed again until a stable weight was reached. As the surface of sandstone outside of the region of the overhang is firm, and collecting samples would thus result in unacceptable damage; the moisture content outside of the area of the overhang was monitored indirectly by suction, and thus its relationship with moisture content. To monitor the suction, the miniature tensiometer T5x (UMS Germany) was used. The T5x device is designed to measure the capillary suction in soils and other porous materials. The more negative the suction, the lower the water content (Tindall and Kunkel, 1999). Suction was measured in drilled holes 5 mm in diameter at depths 20–40 mm below the sandstone surface. The position of the measuring points are labeled as a–g in Figures 1C and 1D. The holes were sealed by plastic foil between individual measurements to prevent evaporation.

The air temperature and humidity was monitored by sensor with a datalogger placed inside the overhang between March 3, 2013 and October 5, 2014. The potential evaporation rate was measured by two plastic cups, 57 mm in diameter, filled by distilled water, and weighed periodically (E1, E2 in Figures 1C and 1D). The evaporation surface was protected with a mesh, 2 mm in diameter, to prevent damage by animals.

The chemical composition of the liquid samples (dripping water, local spring water, and solid-water leachates) were analyzed for concentrations of nitrates, chlorides, and sulfates by high performance liquid chromatography (HPLC) (Dionex ICS-2000); cations by inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP OES) (Thermo Scientific) in the laboratories of the Institute of Geology of The Czech Academy of Sciences and the Faculty of Science, Charles University.

### Laboratory frost weathering tests

Frost weathering tests were performed to evaluate the effect of gravity-induced stress on frost weathering rate. Sandstone cubes with edge lengths of  $40 \pm 1$  mm were cut from a block of the collected sandstone using a diamond saw cooled by water. Susceptibility to frost weathering was tested by repeated cycles consisting of submerging the cubes in water (+20 °C) for  $\geq 8$  hours, followed by placing them in a freezer (–20 °C) for the same period of time. To remove the loose grains, the cubes were turned upside-down each 10th cycle for 10 seconds and submerged again into the water. The cubes were weighed in each cycle.

Frost weathering tests were done with three unconfined and three uniaxially loaded cubes. Unconfined cubes were left bare, touching the base on its lower side. Uniaxially loaded cubes were compressed by placing square stiff steel plates of the same size as the cube sides onto the opposite side of the cube. The plates were compressed against the cube sides by tightening the nuts on a steel casing constructed around the cube. The nuts were tightened by a torque screwdriver to

0.75 Nm, which corresponds to a confinement of  $\sim 680$  kPa, based on calibration with a tensiometer.

### Numerical modeling

Numerical modeling was used to predict stress distribution within the rock mass of the overhang and its effect on the erosion rate. PLAXIS 3D geotechnical software was used. Model dimensions were exactly the same as the dimensions of the overhang, and the model geometry closely resembled the geometry of the physical models. The three-dimensional (3D) shape of the overhang was created by means of photogrammetry. The finite element mesh of the model consisted of 618 000 tetrahedral finite elements with second-order interpolation of displacements. Boundary displacements were assigned for the bottom boundary, zero horizontal displacement in the normal direction to boundary planes (free displacement in the other two axes) for left and right vertical model boundaries with the rock mass, fixed horizontal displacement (free vertical displacement) for the back vertical boundary with the rock mass, and free displacement in all three axes for the free superficial boundary (frontal and upper boundary).

The sandstone was described using a Mohr–Coulomb constitutive model. Model parameters for weak sandstones were used: Young modulus of  $E = 4$  GPa, Poisson's ratio  $\nu = 0.3$ , internal friction angle  $\phi = 30^\circ$ , angle of dilatancy was estimated as  $\psi = 15^\circ$ , cohesion  $c = 600$  kPa, density as  $\rho = 2390$  (wet)  $\text{kg/m}^3$ . The stress state within the physical model was generated using the gravity loading procedure available in the PLAXIS 3D software. Stress was generated during finite element simulation. The initial stress was prescribed as zero alongside of zero gravity acceleration. During the stress generation stage, the gravity acceleration was gradually increased to the value of  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  under the condition of constant density.

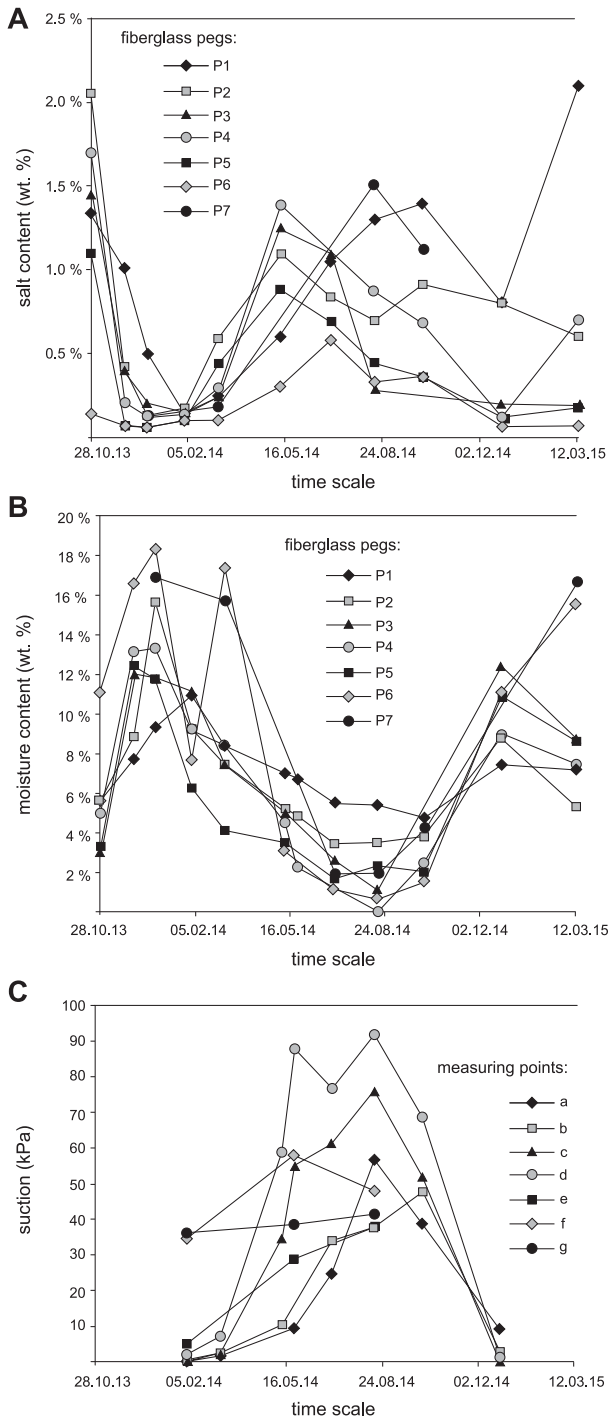
## Results and Discussion

### Solid phase characterization and salt content

The fine fraction (silt and clay) of the sandstone, separated from the overhang material, is formed of quartz, kaolinite, illite, and K-feldspar. Dark surficial case hardening zone contains a significant portion of gypsum and most probably also organic matter and trapped dust particles (Gorbushina, 2007, and references cited therein). Gypsum is also the major constituent of all the efflorescence samples analyzed. Occurrence of efflorescence is strongly connected to those parts of the case hardening situated outside of the overhang area in those places shielded from rain. By contrast, in the overhang itself, the efflorescence is only present temporarily, due to the fast erosion of the material.

The measured salt content in the overhang samples varied noticeably during the year between 0.1 and 2 wt% in depths from 0 to 5 mm (Figure 3A). The salt content abruptly decreased during November, as the overhang became wet, and salts were dissolved and leached by seeping water (Figure 3A). Salts started to accumulate in spring, and reached its maximum content either in summer or in autumn, depending on the time when pore water ceased to flow towards the sandstone surface at a specific part of the overhang. Flakes which fell from the overhang during the winter showed only low content of salts (0.06–0.1 wt%).

A tight correlation was found between the concentration of sulfate and calcium ( $R^2 = 0.88$ ), sulfate and magnesium ( $R^2 = 0.87$ ), sodium with both chlorides ( $R^2 = 0.67$ ), and nitrates ( $R^2 = 0.63$ ) in leachates from the overhang. Gypsum was



**Figure 3.** Temporal changes of moisture and salt content in overhang: (A) salt content; (B) moisture content; (C) suction.

identified as the main dissoluble mineral based on the ionic composition of the leachates. Mean gypsum content in the leachates is ~40% of dissoluble matter. Other potentially occurring minerals are nitratine ( $\text{NaNO}_3$ ) and halite, with the mean content in the leachates of about 20 and 10%, respectively. Unlike gypsum, halite and nitratine were not confirmed by XRD. Both of these phases, especially the unstable nitratine, may only occur intermittently during the warmest periods of the day, since the increasing air moisture will dissolve such phases.

### Erosion rate of sandstone in the overhang

Seven short-term measurements (0.2–1 day long) of the accumulation rate of the fallen materials from the overhang were made between 2008 and 2011. The maximum measured accumulation rate ( $60\text{--}200\text{ g/m}^2/\text{day}$ ) occurred in the winter during an intense thaw (Table I, Figures 2G and 2H). Sandstone flakes were falling with a frequency of one every several seconds when the overhang was exposed to direct solar radiation. The peak intensity of the accumulation rate was estimated to be  $5000\text{ g/m}^2/\text{day}$  (December 26, 2008). This event lasted just a few hours, but removed a considerable amount of weak material from the overhang's ceiling and walls. A much lower accumulation rate was measured when the air temperature was slightly below the freezing point ( $10\text{--}20\text{ g/m}^2/\text{day}$ ). A negligible accumulation rate was measured prior to the first freezing ( $< 1\text{ g/m}^2/\text{day}$ ). In spring and summer, the accumulation rate was low ( $2\text{--}10\text{ g/m}^2/\text{day}$ ).

Between December 26, 2012 and March 14, 2015 the erosion rate was continuously measured in periods 1–3 months long. Within this period, three different winters occurred. Winter 2012/2013 was unusually long and cold, with freezing periods lasting 68 days in total. The longest continuous freezing period lasted 15 days. In contrast, winters 2013/2014 and 2014/2015 were mild, with freezing periods lasting a total of 34 and 27 days, respectively. The mean accumulation rate was extremely high during a cold winter ( $1047\text{ g/m}^2/\text{day}$ ), while during a mild winters the mean accumulation rate was only  $55\text{--}89\text{ g/m}^2/\text{day}$  (Table II). In spring, summer, and autumn the mean accumulation rate did not exceed  $8\text{ g/m}^2/\text{day}$ . Erosion rate timings, measured on the fiberglass pegs, correspond to the accumulation rates of materials on the plastic foil. The highest erosion was observed between March 3, 2013 and April 11, 2013 (Table III). The erosion rate in 2013–2015, normalized to one year, was lowest in the inner part of the overhang (P1 and P2, with a rate of 3 to 4 mm/yr), but increasing outwards to 31 mm/yr at P5.

All the measurements clearly demonstrated that 87–99% of the material is accumulated during the winter period, and that its falling is connected to the thaw after freezing periods. A

**Table I.** Accumulation and erosion rates based on materials collected on plastic foils over short time periods

Start time of accumulation rate measurement	Period of measurement (days)	Accumulation area ( $\text{m}^2$ )	Accumulation rate ( $\text{g/m}^2/\text{day}$ )	Climatic conditions
December 23, 2009 16:10	1.0	2.6	214	Cloudy, +3 °C; 24 hours after onset of thaw
December 25, 2010 14:00	0.9	4.5	62	Freezing in shade, but melting on insulated places
December 26, 2008 18:00	0.6	4.8	17	Cloudy; -1 °C
August 15, 2009 10:00	1.0	5.1	11	Clear sky, 25 °C
December 27, 2008 09:00	0.2	4.8	10	Cloudy; -1 °C
May 1, 2009 12:00	1.0	5.0	2.1	—
December 24, 2011 12:00	1.0	5.0	0.1	5 °C, no freezing yet

**Table II.** Accumulation and erosion rates based on materials collected on plastic foils over long time periods

Period	From	To	Foil 1 (g/m <sup>2</sup> /day)	Foil 1, mean (g/m <sup>2</sup> /day)	Erosion rate foil 1 (mm/yr)	Foil 2 (g/m <sup>2</sup> /day)
Cold winter	December 26, 2012	March 3, 2013	1070		93	—
	March 3, 2013	April 11, 2013	1020	1047	88	—
Warmer period	April 11, 2013	May 21, 2013	<26		<2.3	—
	May 21, 2013	July 8, 2013	<4		<0.3	—
	July 8, 2013	August 22, 2013	0		0	—
Mild winter	August 22, 2013	October 28, 2013	1.2	<8	0.1	—
	October 28, 2013	December 2, 2013	39		3.4	—
	December 2, 2013	December 25, 2013	24		2.1	8
	December 25, 2013	February 1, 2014	103		8.9	90
Warmer period	February 1, 2014	March 8, 2014	54	55	4.7	54
	March 8, 2014	May 11, 2014	0		0	0
	May 11, 2014	July 2, 2014	0		0	0
	July 2, 2014	August 16, 2014	26		2.3	1.6
Mild winter	August 16, 2014	October 5, 2014	0	7	0	0
	October 5, 2014	December 25, 2014	11		0.9	2.3
	December 25, 2014	March 14, 2015	168	89	14	146
Mean December 26, 2012–December 25, 2013			315		27	
Mean December 26, 2013–December 25, 2014			22		1.8	
Mean December 26, 2012–December 25, 2014			169		14	

**Table III.** Erosion in given time period (in millimeters), and in the last row the average erosion rate (in mm/yr) measured at the plastic pegs

Period	From	To	Freeze duration (days)	FDI (°C × day)	P1	P2	P3	P4	P5	P6 <sup>b</sup>	P7 <sup>b</sup>
Cold winter	March 3, 2013	April 11, 2013	17 (68 <sup>a</sup> )	−37 (−167 <sup>a</sup> )	3	2	10	26	47	—	—
Warmer period	April 11, 2013	October 28, 2013	0	0	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2	—	—
Mild winter	October 28, 2013	March 8, 2014	34	−34	3	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2
Warmer period	March 8, 2014	October 5, 2014	2	0	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2	≤2
Mild winter	October 5, 2014	March 14, 2015	27	−35	≤2	≤2	19	≤2	16	≤2	≤2
Total	March 3, 2013	March 14, 2015	81	−106	8	7	34	26	63	≤2	≤2
Normalized to one year			40	−53	4	3	17	13	31	≤2	≤2

Note: FDI, factor of frost duration and intensity.

<sup>a</sup>Entire winter.

<sup>b</sup>Placed December 2, 2013.

cold winter with long freezing periods produces ~10 times more accumulated material than a mild winter with limited freezing (Table II). Considering the sandstone dry density of 2.3 g/cm<sup>3</sup>, and average accumulation rate of 169 g/m<sup>2</sup>/day, the mean erosion rate of the protruding part of the sandstone exposure is 14 mm/yr (Table II). However, at P6 and P7, where no protruding sandstone mass occurs, the erosion rate did not exceed 2 mm/yr (Table III).

The density of the debris pile below the overhang is 1.6 g/cm<sup>3</sup>. As the original sandstone density is 2.3 g/cm<sup>3</sup>, the 1.8 m high pile of debris was derived from a 1.25 m thick zone of sandstone. Thus the sandstone in the overhang has been eroded at a mean rate of 36 mm/yr over a period of 35 years. The long-term erosion rate is 2.6 times higher than the rate measured on foil 1 during 2013–2015, which is in agreement with the statement of a local resident that in the past the erosion rate was even greater.

The measured erosion rate is much higher than the reported erosion rates on sandstone exposures from various locations: 0.6–9 mm/yr in different coastal areas (Gill, 1981; Mottershead, 1994; Sunamura, 1996), 0–0.35 mm/yr in an arid climate measured on the sandstone tombs at the Petra Monument (Paradise, 2005; Heinrichs, 2008), or approximately 0.3 mm/yr in a mountainous precipitation-rich area of Japan (Imaizumi *et al.*, 2015).

## Tensile strength

Tensile strength was measured on larger sandstone flakes having fallen from the overhang during the winter (Table IV). Most of the measurements were done on the flat sides of the flakes (A flakes); other measurements were also done in a direction perpendicular to the flat sides of the flakes (B flakes). A large sandstone block sampled outside of overhang area was measured to determine whether the materials of the flakes are weakened compared to the sandstone in the vicinity of the overhang. Results showed that the mean dry tensile strengths of both flakes and block are relatively low (120–270 kPa).

**Table IV.** Tensile strength of sandstone in overhang (flakes), and outside of the overhang area (block)

Surface type	Tensile strength	Mean value (kPa)	SD (kPa)	<i>n</i>
Sandstone block	Dry	266	28	9
Flakes A	Dry	194	105	17
Flakes B	Dry	122	38	14
Flakes A	Saturated	27	20	9

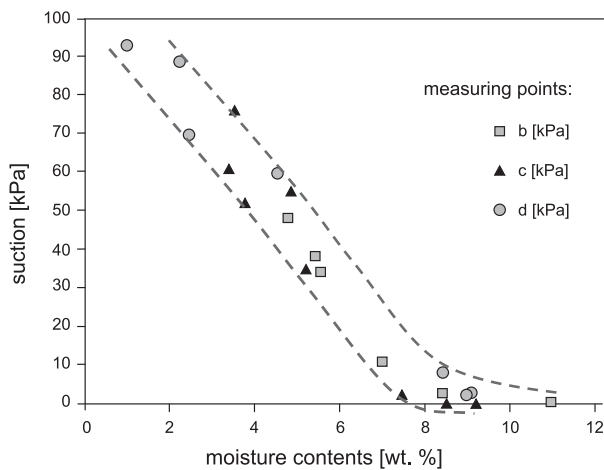
Note: *n*, number of measurements; SD, standard deviation.

Flakes A showed nearly the same dry tensile strengths as the sandstone block, while flakes B had dry tensile strengths only 50% of flakes A. A drastic decrease of tensile strength was observed when the material was saturated. The mean saturated tensile strength of flakes A dropped to 27 kPa, which is nearly one order of magnitude less than the same material under dry conditions (Table IV).

### Moisture content and drip water chemistry

Rock moisture content in the overhang subsurface (0–5 mm depth) varies over time. The highest values (12–18 wt%) were measured in winter, while values of 1–5 wt% were measured during late spring and summer. High moisture values in winter correspond well with water dripping from the overhang ceiling and the presence of icicles when the temperature falls below zero. The largest variations in moisture content were determined in the outer parts of the overhang (spots P6, P7); and lowest in the innermost part (P1). This probably can be explained by differential evaporation rates in the two parts (Figure 3B).

High variations of the moisture content at a depth of 20 to 40 mm below the sandstone surface of the overhang are visible in the oscillation of the suction data (Figure 3C). The suction in the overhang was close to zero during winter, proving that the pore space was nearly fully saturated with water. As evaporation dominated during the summer, moisture was lost from the pore spaces, and suction reached up to 90 kPa in the outer parts of the overhang (Figure 3C, point d). In the inner part of overhang, the suction reaches between 40 and 60 kPa in summer (Figure 3C, points a and b). Suction measured outside the overhang area clearly showed low moisture content in the pore



**Figure 4.** Relationship between moisture content and suction obtained from the overhang. The measured data fall within the region between the dashed lines.

space in winter (35–45 kPa). Variation of the suction was much lower outside the overhang area. Based on the relationship between moisture content and suction, a moisture content of 40 kPa occurring in the winter outside of the overhang area is equal to a moisture content of ~5wt%. (Figure 4).

The mean potential evaporation rate in the innermost part of the overhang is up to 13 mm/month in late spring and early summer, and about ~5 mm/month in late autumn and winter (mean annual rate ~6–7 mm/month), based on plastic cups with water (Table V). In the outer parts of the overhang, the evaporation rate will be considerably higher. The mean annual air temperature and relative humidity at the overhang is 11.6 °C and 78%, respectively.

Drip water in the western side of the overhang was sampled in 2009, 2011, and 2015. TDS were markedly higher in the drip water than in the local groundwater (1007–1152 mg/l, and 276 mg/l respectively), pH was neutral (7.1–7.5). Furthermore,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ , and  $\text{K}^+$  are the major cations determined, and  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , and  $\text{Cl}^-$  the major anions (Table VI). Concentrations of  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , and boron are considerably higher in the drip water than in the local groundwater, which indicates that drip water is strongly affected by leakage from a sewage reservoir; therefore, the wetting is artificial in origin. Based on the solubility of gypsum (2.2–2.6 g/l in the temperature range 0–25 °C), and  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{SO}_4^{2-}$  concentrations in drip water, the evaporation of 80 to 90% of the pore water in the overhang is necessary to initiate precipitation of gypsum.

### Factors responsible for sandstone decay

The erosion rate of the overhang was compared with the: (a) freezing duration, (b) freezing duration and intensity (FDI); (c) moisture content; and (d) salt content. There is a close relationship between the erosion rate and both the freezing duration

**Table VI.** Concentration in drip water from overhang and local groundwater (in mg/l)

Ion	Overhang drip December 24, 2009	Overhang drip December 25, 2011	Overhang drip March 14, 2015	Čumperka Spring (Radčice)
$\text{Cl}^-$	179	198	128	20.0
$\text{SO}_4^{2-}$	240	200	162	38.0
$\text{NO}_3^-$	318	309	417	139
$\text{HCO}_3^-$	–	66	–	–
$\text{Ca}^{2+}$	220	132	160	42
$\text{Mg}^{2+}$	22	18	21	14
$\text{Na}^+$	98	89	81	6.0
$\text{K}^+$	62	53	47	11
Si	12	8	10.0	6.0
Fe	0.04	0.02	0.033	<0.005
Al	<0.05	>0.07	–	–
B	–	–	0.13	<0.005

**Table V.** Potential evaporation rate measured at locations E1 and E2

From	To	Number of days	E1 (mm/month)	E2 (mm/month)
May 11, 2014	May 24, 2014	13	10	8
May 24, 2014	July 2, 2014	39	13	12
July 2, 2014	August 16, 2014	45	6	10
August 16, 2014	October 5, 2014	50	6	7
October 5, 2014	December 25, 2014	81	5	5
December 25, 2014	March 14, 2015	79	5	5

and FDI. However, no relationship was found between the erosion rate and the moisture or salt content (Figure 5).

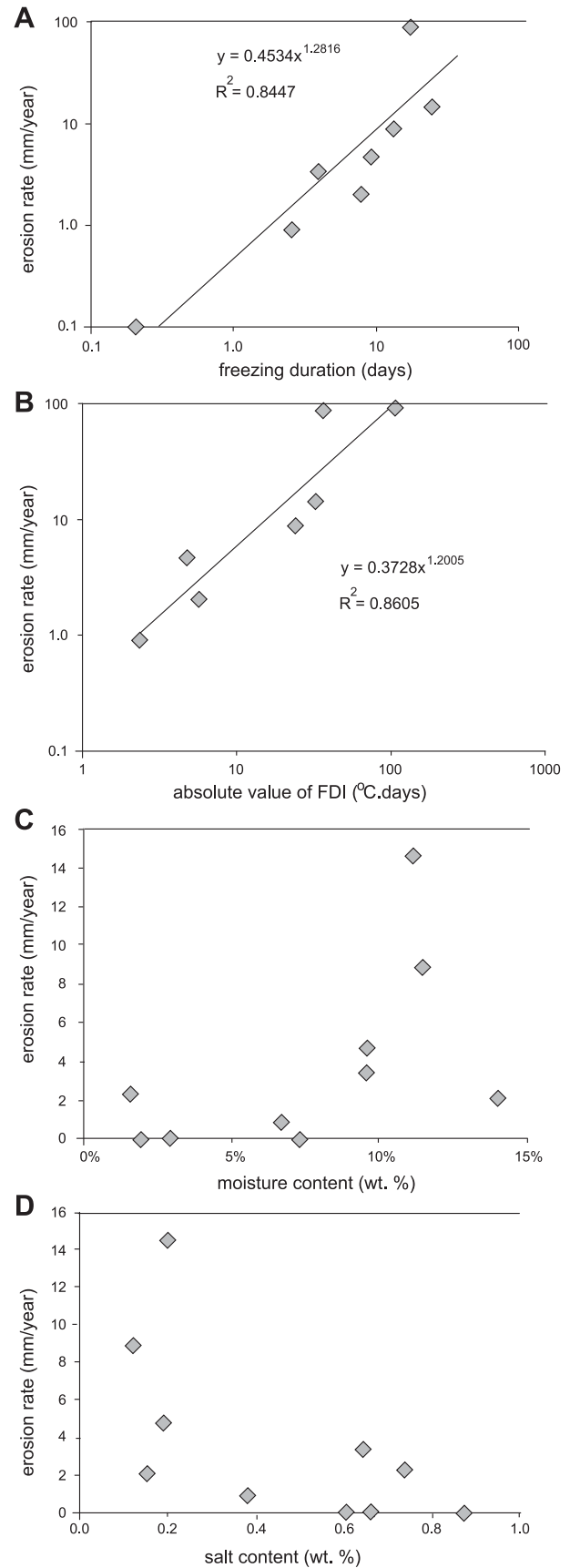
Based on our measurements and observations, the major factor responsible for the rapid erosion of the sandstone overhang is clearly the strong wetting of the sandstone pore space by seeping water in the wintertime (up to 18 wt% in the overhang, in contrast to ~5 wt% outside the overhang area). High moisture content in the pores can facilitate decay of the sandstone in several ways. First, the compressive and tensile strength decreases greatly when sandstone is wetted (cf. also Lin *et al.*, 2005; Bruthans *et al.*, 2012b, 2014). Weaker sandstone fails under lower disruptive pressures (caused by weathering) than does dry sandstone. Second, repeated wetting and drying is capable of deteriorating sandstone (Ruedrich *et al.*, 2011). Third, frost weathering strongly increases with the degree of pore saturation (Ruedrich and Siegesmund, 2006). In winter, the overhang pore space contains much more water than sandstone exposures in the nearby surroundings (Figure 3C).

The perfect match between the freeze–thaw periods and the erosion rate (Tables II and III; Figures 5A and 5B) strongly indicates that frost weathering is the major (if not the only) important weathering process operating at the studied site. The ice acts as a temporary cement, falling down of flakes is delayed until the next thaw. The highest falling intensity observed immediately after long freezing periods supports this idea. In accordance, Stark (1989) observed that longer freeze periods result in much greater destruction than the more frequent but shorter periods.

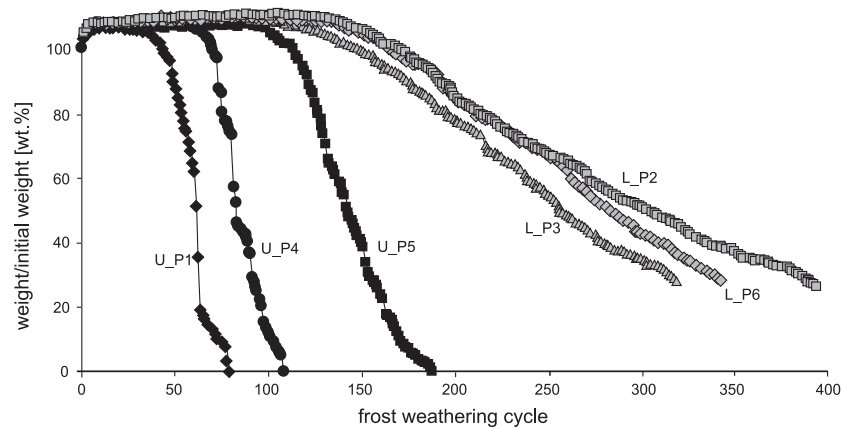
The susceptibility to frost weathering was tested with repeated cycles consisting of submerging the sandstone cubes in distilled water, followed by placing them in a freezer. Unconfined cubes lost 70% of their original weight within 62–153 cycles [mean and standard deviation (SD) 102 ± 38 cycles]. However, uniaxially loaded cubes lost 70% of their original weight after 316–384 cycles (mean and SD 347 ± 28 cycles; Figure 6). Thus, the frost weathering rate was 2–6 times higher than in the case of unconfined cubes. These results clearly document that gravity loading stress significantly affects the intensity of the frost weathering. All uniaxially loaded cubes weathered into pillars, which is also an indication of the stress effect on weathering (Figure 7A, Bruthans *et al.*, 2014).

The number of weathering cycles needed to fully disintegrate sandstone even without any load (78–187) seems to be relatively high. Nevertheless, the number of frost cycles may, in reality, be lower as the material in the overhang does not disintegrate completely, but decomposes into flakes several centimeters thick. Flakes of such a size cannot be replicated on the small cubes used in the laboratory; however, small-scale flaking was commonly observed on the cubes (Figure 7B).

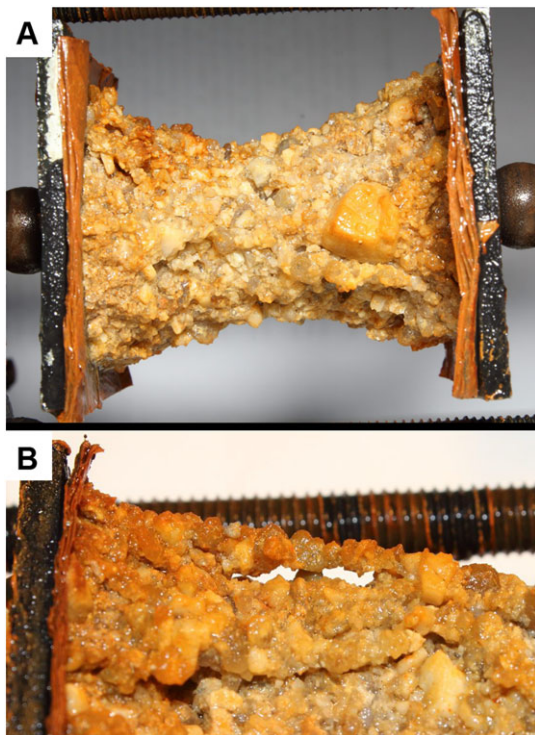
Based on our monitoring (see Figure 3A) the gypsum and other salts were leached from the sandstone overhang prior to the winter period. Therefore, low salt content most probably did not affect the frost weathering. In addition, the engraving '1915', which is covered by gypsum efflorescence, shows no retreat after 100 years. In light of these observations, it is unlikely that gypsum/salt crystallization under low moisture conditions (~5 wt%) plays an important role in the rapid decay of the studied sandstone. However, gypsum and potentially occurring halite and nitratine (or other salts of Na, K-Cl, NO<sub>3</sub>) may possibly play some role in weakening of the sandstone during the spring and summer, when evaporation dominates and salts crystallize in the sandstone pore spaces. Both halite and nitratine are deliquescent, so these salts dissolve in atmospheric moisture if the relative humidity exceeds 68–76%, dependent on their proportions (for 22 °C, Gupta *et al.*, 2015). The measurements show that the relative humidity in the overhang during the period October 1, 2013 to September 30, 2014



**Figure 5.** Relationship between erosion rate and various factors: (A) total duration of freezing; (B) absolute value of FDI – frost duration and intensity (sum of multiples of length of freezing periods and their mean temperature); (C) mean moisture content; (D) mean salt content. Erosion rates are calculated from accumulation on foil 1.



**Figure 6.** Frost weathering of loaded (L) and unconfined (U) cubes. Loaded cubes survived many more weathering cycles than unconfined cubes.

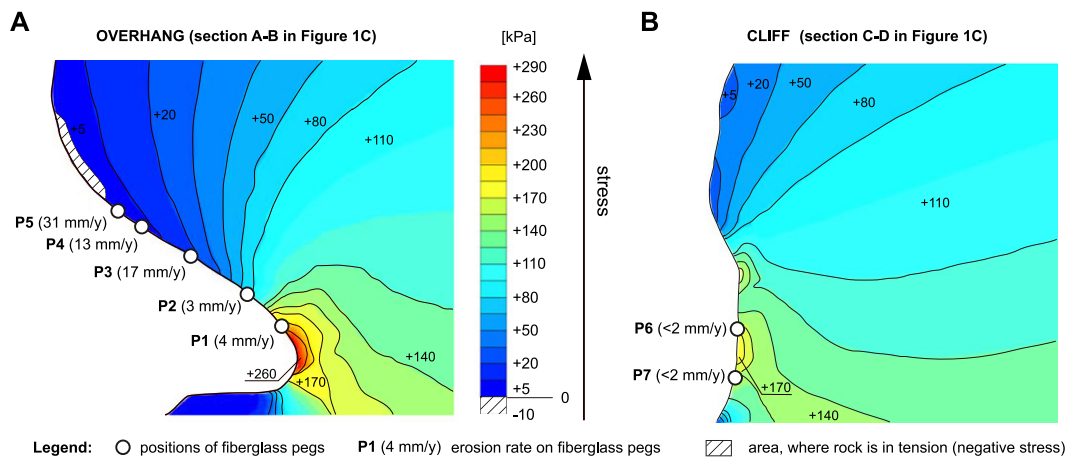


**Figure 7.** Laboratory frost weathering of 4 cm cubes (A) weathered into pillar, (B) small scale flaking of pillar surface. [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

decreased below the 68 and 76% thresholds 175 and 201 times per year, respectively. During each such event, the halite and/or nitrate may crystallize, and dissolve once again after the event, which would considerably increase potential sandstone damage. Nitrate is reported to be 10 to 100 times more effective in degradation than gypsum (Zehnder, 1996). Halite was found to be two times more destructive than gypsum (Robinson and Williams, 2000). Additionally, the combination of gypsum with halite, and more generally with any deliquescent salt, is appreciably more destructive than either of the salts alone (Robinson and Williams, 2000; Charola *et al.*, 2007). Nevertheless, salt weathering cannot be a major weathering factor, otherwise the accumulation of the materials on the foil would occur during the first wetting of the sandstone after the summer period, and not after the thaw. The same consideration may be applied for weathering by repeated wetting and drying as well as by biodegradation.

#### Effects of stress on erosion rate

The erosion rate measured at the fiberglass pegs was compared with the calculated stress in the sandstone subsurface (Figure 8). The highest erosion rate (13–31 mm/yr, P3–P5) corresponds to the overhanging surface with a very low compressive stress, and even tension (stress  $-10$  to  $+50$  kPa). However, a low erosion rate ( $< 2$  mm/yr) was measured at a vertical wall, with compressive stress exceeding 150 kPa (high stress, P6, P7). An erosion rate of 3 to 4 mm/yr was measured at the overhanging



**Figure 8.** Numerical models showing principal stress magnitude on sections from Figure 1C. (A) Section A–B is directed across the overhang; (B) section C–D is situated across the cliff outside of the overhang area. Note that the erosion rate is decreasing with increasing stress. [Colour figure can be viewed at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)]

surface with a stress of 70 to 200 kPa (P1, P2). The erosion rate is thus affected by stress in the rock subsurface. Zones with low or even negative stress (tension) erode at the fastest rate; while zones with the stress exceeding 70 kPa erode at a slower rate. This is in agreement with the laboratory frost weathering experiment with the sandstone cubes, where the stress also decreased the weathering rate (Figure 6).

The magnitude of stress in the overhang subsurface is dictated by its geometry, including the overburden. The central part of overhang ceiling acts as a large protrusion (Figure 1C). For protruding parts of the sandstone massive, lower stresses are typical (Bruthans *et al.*, 2014). The protruding shape of this particular overhang is therefore strongly increasing the effect of the frost weathering. Sandstone landforms are commonly stress-controlled; this includes the overhangs lack of protruding parts, as these would have been quickly eroded (Bruthans *et al.*, 2014; Rihosek *et al.*, 2016). It is possible that the studied overhang's geometry was changed in the past during the building of a road, and the protrusion is a recent result of cutting of the western side of the overhang, which originally had a fully buttressed ceiling.

### Broader consequences

Dramatic differences in the erosion rate, dependent on sandstone moisture content, can help to elucidate the development of overhangs and caves during the Holocene in the studied sandstone area (Central Europe), but also in sandstone terrains in arid temperate climate (e.g. Colorado Plateau, USA). Radiocarbon dating of sedimentary infillings at archaeological sites of sandstone overhangs and shallow caves in the north-west part of the Bohemian Cretaceous Basin has indicated that walls of these overhangs and caves recessed less than 2–5 mm/1000 years after 8–11 kyr BP (Cílek, 2007; Cílek and Žák, 2007). Radiocarbon and U-series dating of secondary carbonates demonstrated that the walls and ceilings in the north part of the Bohemian Cretaceous Basin have not recessed more than 1 mm/1000 years during the last 8 kyr BP (Bruthans *et al.*, 2012a). Similarly, the radiocarbon dating of 'fossil dung' in sandstone overhangs and caves from the Colorado Plateau have also shown that these sites were created prior to 13 kyr BP (Jennings, 1980; Davis *et al.*, 1984), and that they were not enlarged in the Holocene, except for occasional block collapses of the ceilings. It is likely that neither salt weathering nor biota can effectively disintegrate sandstone inside relatively deep and dark cavities, and that frost weathering is the most significant factor.

Our study demonstrated that sandstone, the surface of which does not measurably retreat under the present climate (rate < 0.01 mm/yr), can retreat at a rate of ~18–36 mm/yr if the pore space is nearly saturated. Similarly, increased groundwater seepage in sandstone areas can be expected in the Last Glacial period, when low temperatures greatly decreased the evapotranspiration rate. More water was left for surface flow and infiltration, as demonstrated by the high level of lakes in closed basins (Licciardi, 2001). Overhangs in Central Europe and the Colorado Plateau might thus be a result of rapid frost weathering of nearly saturated sandstone during the Last Glacial period. Seeping groundwater and possibly wind could excavate the fallen material from overhangs, and explain why there is nearly no material dated prior to 12 kyr BP in sandstone caves in both regions (Bruthans *et al.*, 2012b). The erosion of overhangs and caves followed the critical partings (Oberlander, 1977), such as clay or shale layers. The erosion of critical partings is not affected by stress, and as a consequence, the stress was not effective in decreasing

the weathering rate (Bruthans *et al.*, 2014). Enlargement was strongly reduced after a change of climate in the Holocene, when relatively dry caves and overhangs became traps for sediments (cf. Cílek and Žák, 2007, p. 138).

Similar drastic changes in the erosion rate can be expected in many other situations where the climatic changes resulted in changes of the sandstone moisture content. At rare places with high moisture content the frost weathering can be relatively fast at the present time. In Aadršpach (northeast Bohemian Cretaceous Basin) the frost weathering up to 240 g/m<sup>2</sup>/yr was measured below strongly wetted sandstone blocks (unpublished). This observation does not rule out the possibility of locally relatively fast weathering/erosion by increased content of aggressive salts at the present time.

### Conclusion

Characterization of those processes controlling weathering and erosion of the specific sandstone overhang near Plzeň joins together valuable data of general significance. Long-term monitoring of the parameters important for weathering was performed, and data were compared against the relevant published information. The overhang ceiling is being eroded at a mean rate of 14 mm/yr, which is unusually high compared to other measured sites elsewhere. It was revealed that 87–99% of the erosion occurs during melting after periods of freezing. Frost weathering combined with wetting weakening play major roles in the degradation of the studied sandstone overhang. Salt weathering might possibly contribute to some extent. In addition, the erosion rate is strongly affected by the geometry of the overhang and overburden, which controls the stress field in the sandstone massive. With increasing stress the erosion rate decreases as clearly demonstrated both on laboratory experiments and in the field. Exposure geometry and stress should thus be considered as important factors in weathering and erosion studies concerning sandstones (cf. Bruthans *et al.*, 2014).

The salt content in the overhang varies over the year, with the minimum in the winter, and maximum in summer or autumn. Variation in salt content inversely correlates with the oscillation of moisture content. This oscillation is adequately measurable by suction, which can therefore be used for monitoring the moisture content, with minimum damage of the rock. The results clearly show that a strong increase of the moisture content in the pores (12–18 wt% in winter) increases sandstone weathering and erosion by nearly four orders of magnitude, compared to the same material under natural moisture content (5 wt%). This finding suggests that sandstone landforms may potentially develop very rapidly if the pore space is nearly saturated by water; yet remain stable in later phases when the moisture content decreases below the critical threshold. We believe that overhangs in Central Europe, but also in other regions like in the Colorado Plateau (USA), might be the result of rapid frost weathering of nearly saturated sandstone during the Last Glacial period; and that the 'present' state is long-standing, until the next significant change of climate.

*Acknowledgements*—This research was funded by the Czech Science Foundation (GA CR No. 13-28040S), and supported by research plans RVO 67985831 and RVO 67985891. The authors wish to thank Anna Sommerová for her cooperation in the laboratory, to P. Bezdička for XRD analyses, J. Rohovec and A. Matoušková for the determination of chemical composition of the liquid samples and J. Adamovič for valuable suggestions on an early draft of the manuscript, and to P. Lemkin for improvements of the English. The authors also appreciate the



reviews of two anonymous referees and also help of editors in improving the manuscript. Hourly air temperatures were provided by the Czech Hydrometeorological Institute.

## References

- ASTM. 2004. *C914–95: Standard Test Method for Bulk Density and Volume of Solid Refractories by Wax Immersion*. West Conshohocken, PA: ASTM International; 188–190.
- Bruthans J, Schweigstillová J, Jenč P, Churáčková Z, Bezdička P. 2012a.  $^{14}\text{C}$  and U-series dating of speleothems in the Bohemian Paradise (Czech Republic): retreat rates of sandstone cave walls and implications for cave origin. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* **9**: 93–108.
- Bruthans J, Světlík D, Soukup J, Schweigstillová J, Válek J, Sedlackova M, Mayo AL. 2012b. Fast evolving conduits in clay-bonded sandstone: Characterization, erosion processes and significance for origin of sandstone landforms. *Geomorphology* **177–178**: 178–193.
- Bruthans J, Soukup J, Vaculiková J, Filippi M, Schweigstillová J, Mayo AL, Masín D, Kletetschka G, Rihosek J. 2014. Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion. *Nature Geoscience* **7**: 597–601.
- Charola AE, Pühringer J, Steiger M. 2007. Gypsum: a review of its role in the deterioration of building materials. *Environmental Geology* **52**: 207–220.
- Cílek V, Žák K. 2007. Late Glacial and Holocene sedimentation under sandstone rock shelters of Northern Bohemia (Czech Republic). In *Sandstone Landscapes*, Härtel H, Cílek V, Herben T, Jackson A, Williams R (eds). Academia: Praha; 133–138.
- Cílek V. 2007. Climate, microclimate and paleoclimate of sandstone areas of Central and Northern Bohemia (Czech Republic). In *Sandstone Landscapes*, Härtel H, Cílek V, Herben T, Jackson A, Williams R (eds). Academia: Praha; 97–103.
- Davis OK, Agenbroad L, Martin PS, Mead JL. 1984. The pleistocene dung blanket of Becham Cave, Utah. In *Contribution in Vertebrate Paleontology: Volume in Memorial to John E. Guilday*, Genoways HH, Dawson MR (eds). Carnegie Museum Natural History Special Publication 8. Carnegie Museum: Pittsburgh, PA; 267–282.
- Dorn RI, Gordon SJ, Allen CD, Cerveny N, Dixon JC, Groom KM, Hall K, Harrison E, Mol L, Paradise TR, Sumner P, Thomson T, Turkington AV. 2013. The role of fieldwork in rock decay research: case studies from the fringe. *Geomorphology* **200**: 59–74.
- Dragovich D. 1967. Flaking, a weathering process operating on cavernous rock surfaces. *Geological Society of America Bulletin* **78**: 801–804.
- Gill ED. 1981. Rapid honeycomb weathering (tafoni formation) in Graywacke, S.E. Australia. *Earth Processes and Landforms* **6**: 81–83.
- Gorbushina AA. 2007. Life on the rocks. *Environmental Microbiology* **9** (7): 1613–1631.
- Goudie AS. 2013. *Arid and Semi-arid Geomorphology*. Cambridge University Press: Cambridge; 454 pp.
- Gupta D, Kim H, Park G, Li X, Eom JH, Ro CU. 2015. Hygroscopic properties on NaCl and NaNO<sub>3</sub> mixture particles as reacted inorganic sea-salt aerosol surrogates. *Atmospheric Chemistry and Physics* **15**: 3379–3393.
- Heinrichs K. 2008. Diagnosis of weathering damage on rock-cut monuments in Petra, Jordan. *Environmental Geology* **56**: 653–675.
- HighScorePlus. 2011. version 3.0d, PANalytical b.v., Almelo, NL.
- Huinink HP, Pel L, Kopinga K. 2004. Simulating the growth of tafoni. *Earth Surface Processes and Landforms* **29**: 1225–1233.
- Imaizumi F, Nishii R, Murakami W, Daimaru H. 2015. Parallel retreat of rock slopes underlain by alternation of strata. *Geomorphology* **238**: 27–36.
- JCPDS PDF2. 2004. *Sets 1–54*. International Centre for Diffraction Data: Newtown, PA.
- Jennings JD. 1980. Cowboy Cave, University of Utah Anthropological Papers 104. University of Utah Press: Salt Lake City, UT.
- Licciardi JM. 2001. Chronology of latest Pleistocene lake-level fluctuations in the pluvial Lake Chewaucan basin, Oregon, USA. *Journal of Quaternary Science* **16**(6): 545–553.
- Lin ML, Jeng FS, Tsai LS, Huang TH. 2005. Wetting weakening of tertiary sandstones-microscopic mechanism. *Environmental Geology* **48**: 265–275.
- Mol L. 2014. Investigations into the relationship between changes in internal moisture regimes and rock surface deterioration in cavernous sandstone features. *Earth Surface Processes and Landforms* **39**: 914–927.
- Mol L, Viles HA. 2010. Geoelectric investigations into sandstone moisture regimes: Implications for rock weathering and the deterioration of San Rock Art in the Golden Gate Reserve, South Africa. *Geomorphology* **118**: 280–287.
- Mol L, Viles HA. 2012. The role of rock surface hardness and internal moisture in tafoni development in sandstone. *Earth Surface Processes and Landforms* **37**: 301–314.
- Mottershead DN. 1994. Spatial variations in intensity of alveolar weathering of dated sandstone structure in a coastal environment, Weston Super mare, UK. In *Rock Weathering and Landform Evolution*, Robinson DA, Williams RBG (eds). John Wiley & Sons: Chichester; 151–174.
- Oberlander TM. 1977. Origin of segmented cliffs in massive sandstones of southeastern Utah. In *Geomorphology of Arid Regions*, Doehring DO (ed). Allen and Unwin: Boston, MA; 79–114.
- Opluštil S, Martínek K, Tasáriová Z. 2005. Facies and architectural analysis of fluvial deposits of the Nýřany Member and the Týnec Formation (Westphalian D-Barruelian) in the Kladno-Rakovník and Pilsen basins. *Bulletin of Geosciences* **80**(1): 45–66.
- Paradise TR. 2005. Petra revised: An examination of sandstone weathering research in Petra, Jordan. *Geological Society of America, Special Paper* **390**: 39–49.
- Rihosek J, Bruthans J, Masin D, Filippi M, Carling GT, Schweigstillová J. 2016. Gravity-induced stress as a factor reducing decay of sandstone monuments in Petra, Jordan. *Journal of Cultural Heritage* **19**: 415–425.
- Robinson DA, Williams RBG. 2000. Experimental weathering of sandstone by combinations of salts. *Earth Surface Processes and Landforms* **25**: 1309–1315.
- Ruedrich J, Siegesmund S. 2006. Fabric dependence of length change behaviour induced by ice crystallization in the pore space of natural building stones. In *Heritage, Weathering and Conservation*, Fort R, Alvarez de Vuegro M, Gomez-Heras M, Vazquez-Calco C (eds). Taylor & Francis Group: London; 497–505.
- Ruedrich J, Siegesmund S. 2007. Salt and ice crystallisation in porous sandstones. *Environmental Geology* **52**: 225–249.
- Ruedrich J, Bartelsen T, Dohrmann R, Siegesmund S. 2011. Moisture expansion as a deterioration factor for sandstone used in buildings. *Environment and Earth Science* **63**: 1545–1564.
- Siegesmund S, Snelthage R. 2011. *Stone in Architecture: Properties, Durability*. Springer Verlag: Berlin.
- Stark D. 1989. Effect of length of freezing period on durability of concrete. PCA Research and Development Bulletin RD096.01T. Portland Cement Association: Skokie, IL: 9.
- Steiger M, Asmussen S. 2008. Crystallization of sodium sulphate phases in porous materials: the phase diagram Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O and generation of stress. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **72**: 4291–4306.
- Steiger M, Charola AE, Sterflinger K. 2011. Weathering and deterioration. In *Stone in Architecture: Properties, Durability*, Siegesmund S, Snelthage R (eds). Springer Verlag: Berlin; 227–316.
- Sunamura T. 1996. A physical model for the rate of coastal tafoni development. *Journal of Geology* **104**: 741–748.
- Tindall JA, Kunkel JR. 1999. *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ.
- Turkington AV, Paradise TR. 2005. Sandstone weathering: a century of research and innovation. *Geomorphology* **67**: 229–253.
- Viles HA. 2001. Scale issues in weathering studies. *Geomorphology* **41**: 63–72.
- Viles HA. 2013. Linking weathering and rock slope instability: non-linear perspectives. *Earth Surface Processes and Landforms* **38**: 62–70.
- Viles and Goudie. 2007. Rapid salt-weathering in the coastal Namib desert: implications for landscape development. *Geomorphology* **85**(1–2): 49–62.
- Vítek J. 1987. Pseudokrasové tvary v karbonických sedimentech sz. od Plzně. *Český kras* **38**: 125–127 .in Czech

- Warke PA, McKinley J, Smith BJ. 2006. Variable weathering response in sandstone: Factors controlling decay sequences. *Earth Surface Processes and Landforms* **31**: 715–735.
- Williams RBG, Robinson DA. 2001. Experimental frost weathering of sandstone by various combinations of salts. *Earth Surface Processes and Landforms* **26**: 811–818.
- Young RW, Wray AL, Young ARM. 2009. *Sandstone Landforms*. Cambridge University Press: Cambridge.
- Zehnder K. 1996. Gypsum efflorescences in the zone of rising damp. Monitoring of slow decay processes caused by crystallizing salts on wall paintings. In *Proceedings, 8th International Congress on Deterioration on Conservation of Stone*, Riederer J (ed). Möller Druck: Berlin; 1669–1678.

# Evolution of natural rock arches: A realistic small-scale experiment

Jaroslav Řihošek<sup>1\*</sup>, Martin Slavík<sup>1</sup>, Jiří Bruthans<sup>1</sup>, and Michal Filippi<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Science, Charles University, Albertov 6, 128 43 Prague 2, Czech Republic

<sup>2</sup>Institute of Geology of the Czech Academy of Sciences, Rozvojová 269, 165 00 Prague 6, Czech Republic

## ABSTRACT

People tend to admire well-developed rock arches and bridges as a symbol of perfection in nature. However, the origin of such arches still remains unclear, with different authors emphasizing different factors as essential. An authentic small-scale physical model of a perfect arch was created *in situ* from friable sandstone through a simulation of natural erosion. Based on three-dimensional photogrammetric and numerical modeling, we established three evolutionary stages of the modeled arch: the initial, mature, and senile stages. Erosion removed the material from stress shadows, thus exposing the compressed zone of the material, which spans over the discontinuity. From its original lintel thickness with a length ratio of 0.3, the modeled arch thinned out to a ratio of 0.03, which is close to the best-developed natural arches. The erosion rate of the arch surface was relatively low for 90% of its lifespan, but the last 10% was characterized by an abrupt increase in the erosion rate. Our results show that the only conditions essential to producing a delicate arch through erosion are a thin, vertically elongated rock body with an appropriate discontinuity, and a material prone to stress-controlled erosion.

## INTRODUCTION

Natural arches and bridges are probably the most captivating wonders of sandstone landscapes. Human fascination by the shapes of rock arches is exemplified by their many occurrences in movies and popular photographs. World-famous arch sites include Arches National Park, Natural Bridges National Monument (Utah, USA), Wadi Rum Protected Area (Jordan), Tassili n' Ajjer National Park (Algeria), Ennedi Plateau (Chad), and others—attracting hundreds of thousands of visitors each year. There are ~400 arches longer than 50 m in the world (Young et al., 2009). Despite their unusual and aesthetic appeal, natural arches are among the least studied of all sandstone landforms (Grab et al., 2011). Some arches, such as Delicate Arch or Rainbow Bridge on the Colorado Plateau (USA), are free-standing above their widely eroded surroundings, indicating that they are more resistant to erosion compared to the surrounding surface.

Various factors have been considered to be essential in the origin and evolution of sandstone arches, including erosion of weakly cemented zones (Blair et al., 1975), the action of acidic

solutions derived from sand dune soils (Doelling, 1985), or the action of fluvial water, in the case of natural bridges (Cruikshank and Aydin, 1994). See the GSA Data Repository<sup>1</sup> for other explanations of natural arch origins. However, most studies have emphasized some role of joints and other tectonic-related features (Stokes, 1951; Robinson, 1970; Stephansson, 1971; Stevens and McCarrick, 1988; Cruikshank and Aydin, 1994; Grab et al., 2011). When the role of stress on arch evolution has been taken into account, it was usually considered as a factor controlling crack formation; thus accelerating localized erosion of the sandstone body creating an arch (Robinson, 1970; Stephansson, 1971; Cruikshank and Aydin, 1994).

Recent studies have clearly demonstrated that increased compression within sandstone reduces the erosion rate (Bruthans et al., 2014, 2017; Řihošek et al., 2016; Ostanin et al., 2017; Filippi et al., 2018). Gravity-induced stress (henceforth referred to as stress) is the primary factor controlling the evolution of various sandstone landforms (arches, pedestal rocks, rock pillars) (Bruthans et al., 2014; Filippi et al., 2018). The grain fabric

of sandstone and other granular rocks subjected to compression is protected against mechanical disintegration. Erosion thus proceeds faster on portions with lower compression, and especially tension, while portions with higher compression are eroded at a noticeably slower rate (Bruthans et al., 2014, 2017).

An appropriate horizontal (or inclined) discontinuity is an essential condition for an arched landform to develop. A zone of lower compression or even tension (stress shadow) is formed around the discontinuity. Above the stress shadow, an arched-shaped zone of higher compression is formed, similar to the line of thrust or thrust zone in a masonry arch (Young et al., 2009). Such a structure can be formed above any discontinuity deflecting stress, such as a tectonic fracture, a bedding plane, or a thin disintegrating clay layer. In other words, the incipient arch structure is present in any undercut block before any weathering and erosional processes start to carve it (Bruthans et al., 2014; Filippi et al., 2018).

Although natural rock arches are popular phenomena, we are not aware of any study that has successfully simulated arch formation from the initial stage, through maturity, to the senile stage. Therefore, the purpose of this study was to create a realistic small-scale physical model of an arch by simulating natural erosion.

## METHODS

Friable sandstone or locked sand (SLS) occurring at the Střeleč Quarry in the Czech Republic was used to create an *in situ* physical model of an arch. SLS is erodible by flowing water and rain due to the lack of any interstitial cement (see the Data Repository; Bruthans et al., 2014). The initial shape for the physical model was created with a hand saw to form an artificial fin (fin herein; protruding from the surrounding

\*E-mail: [rihosekjaroslav@gmail.com](mailto:rihosekjaroslav@gmail.com)

<sup>1</sup>GSA Data Repository item 2019028, supplementary text and Video DR1 of physical model erosion, is available online at <http://www.geosociety.org/datarepository/2019/>, or on request from [editing@geosociety.org](mailto:editing@geosociety.org).

CITATION: Řihošek, J., Slavík, M., Bruthans, J., and Filippi, M., 2018, Title: Evolution of natural rock arches: A realistic small-scale experiment, <https://doi.org/10.1130/G45421.1>.

rock) ~40 cm high, 20 cm wide, and 90 cm long, with an approximately rectangular base. Two incisions (discontinuities) were cut into the fin. First, a 14-cm-deep transversal vertical incision was cut to separate the fin from the influence of ambient stress generated by the surrounding sandstone mass. Second, a 37-cm-long horizontal incision was cut 13 cm below the top of the fin to form a stress arch. The setup of the physical model, with assumed stress distribution, is depicted in Figure 1A.

The modified fin was then repeatedly subjected to watering (with a watering can; uniformly

distributed from a height of ~30–40 cm along the top surface of the fin) in steps, with one erosional step (ES) represented by the application of two volumes of the can (7 L each). Each ES represents the effect of a unit of potential erosion applied upon the fin. Making the assumption that all ESs are equivalent, we can simulate the arch shape evolution in time (Rihosek et al., 2016). The physical model was subjected to ESs until the modeled arch had collapsed. It is important to note that water erosion used here is just one of many erosion processes that are affected by stress (see the Data Repository).

The entire erosion process was documented with a camera fixed on a tripod; and after every set of 10 ESs, the arch was photographed from all possible angles in order to create a three-dimensional (3-D) photogrammetric model, showing the gradual evolution of its shape. The final shape of the artificially created arch was compared with Landscape Arch (Arches National Park, Utah) as the most similar natural analogue of the our physical model.

3-D photogrammetric models of the artificial arch and Landscape Arch were also used to calculate a numerical model of stress distribution using Plaxis 3D geotechnical software (<https://www.plaxis.com/product/plaxis-3d/>). The elastic material model was based on the mechanical properties of SLS acquired from Rihosek et al. (2016): total density  $\rho = 2067 \text{ kg m}^{-3}$ , Young's modulus  $E = 606.3 \text{ MPa}$ , estimated Poisson ratio  $\nu = 0.25$ . The boundary conditions of the numerical model were set as follows: the movements of nodes on exposed surfaces were free along all three axes, while the movements of the basal nodes were set to be fixed along all three axes. The numerical model was calculated in a mode of staged construction, and stress was applied by gravity loading. The stress distribution was similarly calculated for a true-scale 3-D photogrammetric model of Landscape Arch.

## RESULTS

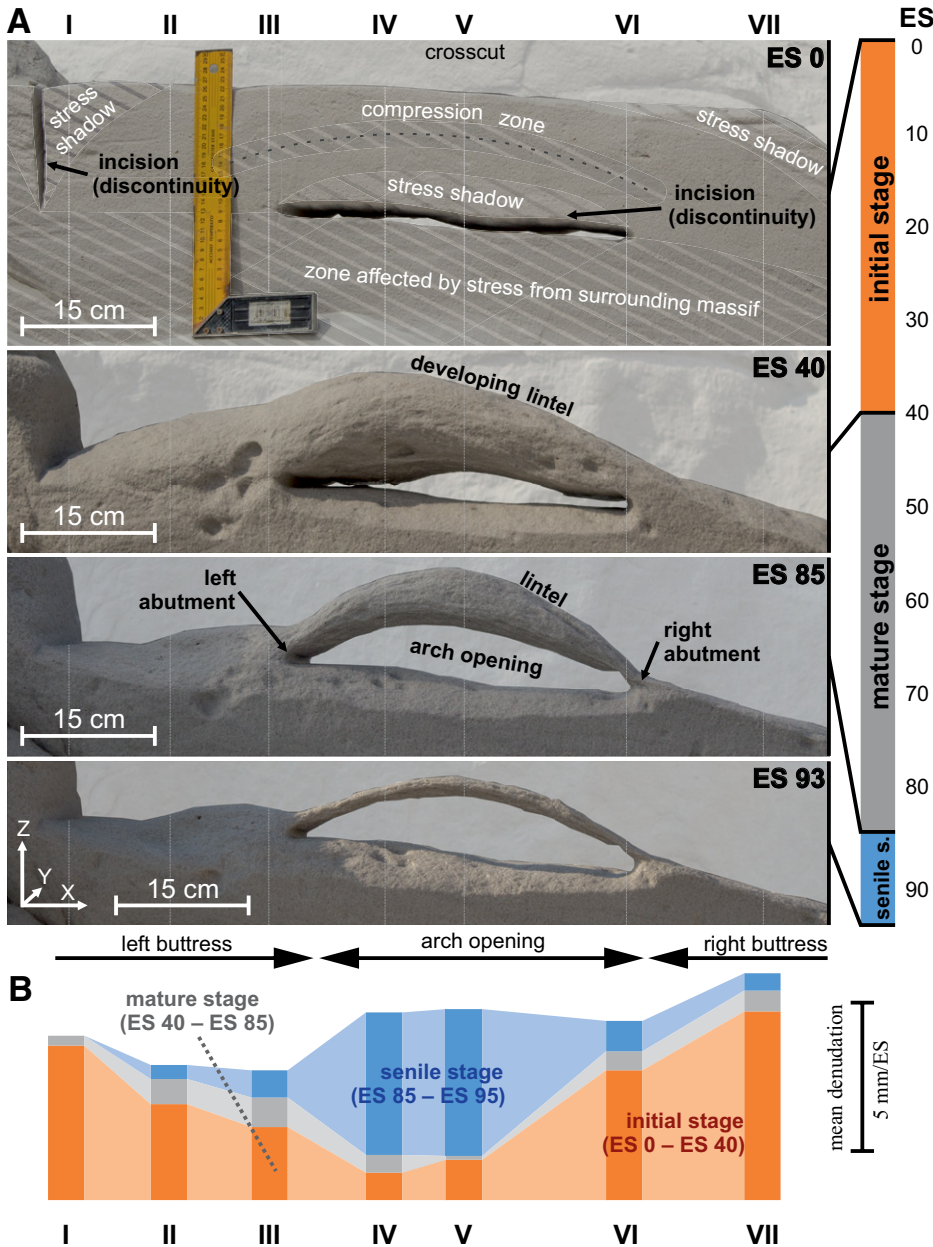
Gradual watering of the artificial fin formed out of the SLS resulted in the development of a perfectly shaped, small-scale physical model analogous to a natural arch (Fig. 1A; see Video DR1 in the Data Repository).

The mode of erosion varied depending on the site within the fin evolving to arch. Erosion on the top of the arch was dominated by water-drop impacts, while the lower portion of the arch was also partially eroded by flowing water. Those parts shielded from water drops, under the overhang of the lintel, were generally eroded by low-energy trickling water. The erosion of the overhanging parts of the arch occurred by tensile failures, while the rest of the arch was dominated by granular disintegration.

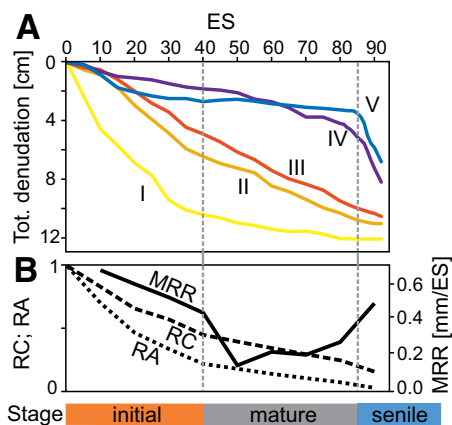
Three stages of arch evolution were established, based on the measured changes from the frontal view (Figs. 1B and 2A) and on analysis of the 3-D photogrammetric model (Fig. 2B):

(1) The initial stage (including erosional steps ES 0 to ES 40) was characterized by a relatively rapid denudation of the surface on both ends of the horizontal incision, and by a decrease of the lintel thickness. The thickness-to-width ratio of the lintel in its center decreased to ~0.65 (Fig. 3A).

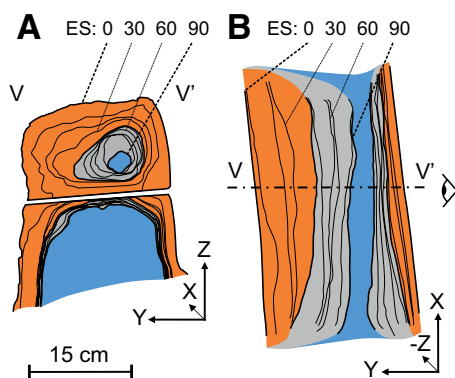
(2) The mature stage (ES 40 to ES 85) was characterized by a decreased erosion rate on both ends of the horizontal incision, resulting in more equal erosion of the surface by enlargement of the arch opening and by decreasing of the lintel



**Figure 1.** Evolution of a small-scale, *in situ* physical model of an arch. **A:** Key erosional steps (ESs) and the main stages of arch evolution (initial, mature, senile). I–VII: Positions of vertical cross sections used for measuring denudation of the sandstone fin: I, II, and VII beside the arch; IV and V through the arch; and VI and VII adjacent to the horizontal incision (later arch opening). V shows the position of cross section V–V' in Figure 3. Time scale on the right side shows the timespan of corresponding stages. **B:** Mean value of denudation per ES at each stage of arch evolution.



**Figure 2.** Erosion progress of the *in situ* physical arch model. **A:** Vertical denudation of the top of the fin in five different cross sections, I–V. **B:** Mean radial recession per erosional step (ES) of lintel surface (MRR), change of relative area (RA), and change of relative circumference (RC) of the lintel in cross section at the center of the arch (cross section V). Relative values RA and RC are normalized by the respective value in ES 0. See the Data Repository (see footnote 1) for RA, RC, and MRR definitions.

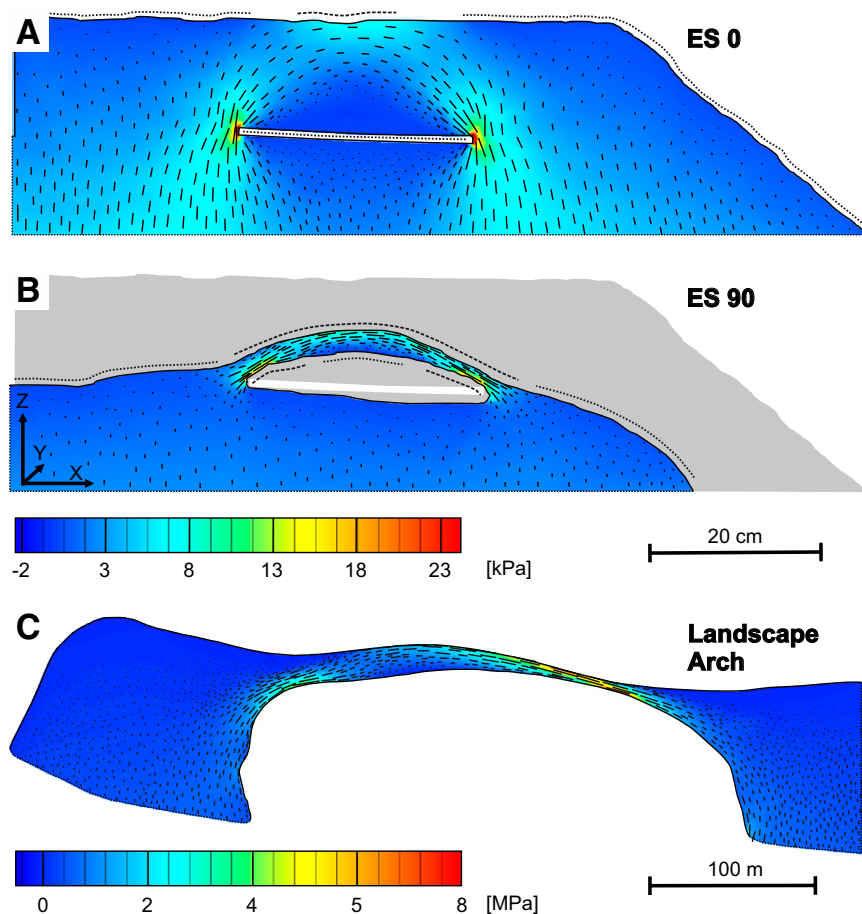


**Figure 3.** Shape evolution of the *in situ* physical arch model. Colors according to the stage of arch evolution. Contours show the arch shape in corresponding erosional steps (ESs). **A:** Cross section V–V' (corresponds to cross section V in Fig. 1). **B:** Ground-plane view.

width. The thickness-to-width ratio of the lintel in its center increased to  $\sim 1$  (Fig. 3A).

(3) The senile stage (ES 85 to ES93) was characterized by an accelerated erosion of the arch surface, and terminated with arch collapse.

The modeled arch eroded relatively slowly for the first 90% of its lifespan (until the end of the mature stage), but then the erosion rate abruptly increased, and 44% to 51% of the erosion (cross sections IV and V, respectively) occurred during the last 10% of its lifespan based on a frontal view (Figs. 1B and 2A). On the other hand, for the rock surrounding the arch, the erosion was rapid at the onset of watering, and slowed down during the mature and senile stages. For details on erosion measurements, see the Data Repository.



**Figure 4.** Results of three-dimensional photogrammetric and numerical modeling, showing the distribution (color and length of lines) and directions of the principal effective stresses (direction of lines). **A:** Initial erosional step (ES 0) of the *in situ* physical model. **B:** ES 90 of the physical model (gray area corresponds to the outline of ES 0). **C:** Landscape Arch, Utah, USA. Dotted and dashed lines in A and B show a surface with higher tension perpendicular to the surface, and lower compression parallel to the surface, respectively.

Photogrammetric documentation of the 3-D arch shape allowed detailed inspection of the erosion in different sections. While a frontal view reveals only part of the shape's evolution, the narrowing of the lintel and its migration toward the front is only visible in cross-sectional and ground-plane view (Figs. 3A and 3B).

During the initial stage, the non-load-bearing portions (e.g., edges, protrusions) of the fin were removed, so that the shape of the forming arch was rounded and its surface smoothed out. The mature and senile stages were characterized by a more-or-less uniform erosion of the whole surface. Rapid erosion in the form of a propagating erosional front (starting at one abutment, propagating along the lintel, and terminating at another abutment) was triggered by erosion of a small portion of the material, and proceeded due to stress redistribution.

Distribution of principal effective stress in ES 0 (Fig. 4A) reveals a large stress shadow ( $-2.5$  to  $\sim 2.5$  kPa) surrounding the horizontal incision. The stress shadow was also located in the left and right upper parts of the fin. The zone of

arch-shaped higher compression ( $2.5$ – $7.5$  kPa), caused by horizontal incision, was situated above the stress shadow. Compression over  $7.5$  kPa was then limited to terminations of the horizontal incision. Distribution of the tension and compression in near the subsurface zones of the arch controlled the erosion rate. Large portions of material in the stress shadows were removed by erosion between ES 0 and ES 90 (especially in the part of the fin above the incision), while a smoothed thin arch of circular cross section resisted erosion. The final arch-shaped compression zone was considerably flattened during the arch evolution (height was decreased to 50%). Arch development led to a narrowing of the initially diffused arch-shaped high-compression zone, and the gradient of principal stress on the cross section of the lintel increased (Figs. 4A and 4B). The highest erosion rate occurred on those portions with higher tension perpendicular to the surface (dotted line in Figs. 4A and 4B). The lowest erosion rate occurred on those portions with higher compression parallel to the surface (dashed line in Figs. 4A and 4B).

Stress distribution in the senile stage of the modeled arch was compared with the stress distribution in the 3-D model of Landscape Arch. Results of the numerical models, calculating stress distribution in both arches, show clear similarities. Higher compression and the highest gradients of stress are located along the thinnest parts of both arches, beside their abutments. While an arch-shaped high-compression zone of the modeled arch shows regular stress distribution, the compression of the 3-D model of Landscape Arch is increased in the thinnest part of lintel due to scars after recently fallen blocks (Fig. 4C). Buttresses of Landscape Arch were preserved as a result of a higher level of lateral stress due to different original geometry of the fin and position of the initial discontinuity.

## DISCUSSION

The refinement of the arch shape (convergence toward a “perfect” shape) is undoubtedly the result of a negative feedback mechanism between stress and erosion (Video DR1; Bruthans et al., 2014). The resulting shape is a product of the erosional process, which locally minimizes elastic strain energy stored in the rock, influenced by external forces (Ostanin et al., 2017). Upward propagation of erosion within our modeled arch terminates when the buttresses are eroded, and the stress is uniformly distributed along the lintel. This observation agrees with the upward erosion along arcuate fissures due to tension above the center of the arch (Robinson, 1970).

Cruikshank and Aydin (1994) attributed the abundance of arches at Arches National Park to preexisting fracture zones cutting the sandstone fins. Our experiments demonstrated that a single horizontal or inclined incision is sufficient to form an arch (see the Data Repository). The common occurrence of free-standing arches in nature is partly the result of the removal of those portions under tension, which is in agreement with older studies (Robinson, 1970; Stephansson, 1971), and is also partly the result of negative feedback between stress and erosion (Bruthans et al., 2014), as is clearly documented by this study. It is likely that stress-controlled erosion is the dominant mechanism responsible for origin of well-developed arches (see the Data Repository).

Perfection of a natural arch can be quantified, for example, as the ratio of lintel thickness to its span ( $T/S$ ). The  $T/S$  of our modeled arch at ES 0 was  $\sim 0.3$ , while at ES 93 it was just  $\sim 0.03$ , which is comparable to some of the thinnest arches in nature (Landscape Arch  $\approx 0.02$ , Crawford Arch  $\approx 0.03$ , Rainbow Bridge  $\approx 0.16$ ).

For a deeper understanding of the evolution of arches, it is crucial to monitor rapidly evolving natural arches such as La Damme Blanche

arch, France (see the Data Repository) to test if the stages observed in our model are applicable to full-scale arches, and therefore possibly to be able to predict future rapid erosional events concerning natural arches.

Because cemented sandstone on the landform surface loses its cohesion by weathering, and its surficial zone has at least, in some cases, properties similar to locked sand, the locked sand used in our model seems to be a suitable analogue even for cemented sandstones (Bruthans et al., 2014).

Our modeled arch was developed in relatively homogeneous material. The lithological variability of full-scale arches (e. g. granulometry, interlocking, clay content) should be studied, and their effect on resulting shape should be considered.

## CONCLUSIONS

For the first time, an authentic small-scale physical model of an arch was created *in situ* from locked sand (friable sandstone) via the simulation of natural erosion. The evolution of this modeled arch was documented and characterized from its initial through its senile stages, and final destruction. 3-D documentation was found to be critical to understanding an arch’s evolution, as an arch might undergo rapid narrowing while the facial view does not change.

Numerical analysis of stress distribution in our model proved that the evolution from an initial unattractive blocky lintel into a thin delicate arch was orchestrated by gravity-induced stress, which controlled the erosion rate of the three different processes involved: raindrop impacts, flowing water, and tensile failures.

Erosion removed the material from stress shadows, and thus exposed the compressed zones of the material, which spans over the discontinuity. From its original lintel thickness-to-length ratio of  $\sim 0.3$ , the modeled arch thinned out to the ratio of  $\sim 0.03$ . The erosion rate of the arch surface was relatively low for 90% of its lifespan; however, the last 10% of the lifespan was characterized by an abrupt increase in the erosion rate.

Our results show that the only essential conditions to produce a delicate arch through erosion are a thin, vertically elongated rock body, with an appropriate discontinuity, and material prone to stress-controlled erosion.

## ACKNOWLEDGMENTS

This research was financed by the Czech Science Foundation (grant No.16–19459S) and conducted within institutional support RVO 67985831 and project UNCE/SCI/006. We wish to express our thanks to Sklopísek Střeleč, a.s.; specifically to Lukáš Horák for permission to enter the quarry, to Jiří Adamovič for his valuable comments, to Alan L. Mayo and Gregory T. Carling for their support in Utah, USA, and to Stephen Collett. We thank Francesco Sauro and two anonymous reviewers for their valuable comments.

## REFERENCES CITED

- Bruthans, J., Soukup, J., Vaculikova, J., Filippi, M., Schweigstillova, J., Mayo, A.L., Masin, D., Kletetschka, G., and Rihosek, J., 2014, Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion: *Nature Geoscience*, v. 7, p. 597–601, <https://doi.org/10.1038/ngeo2209>.
- Bruthans, J., Filippi, M., Schweigstillová, J., and Řihošek, J., 2017, Quantitative study of a rapidly weathering overhang developed in an artificially wetted sandstone cliff: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 42, p. 711–723, <https://doi.org/10.1002/esp.4016>.
- Blair, R.W., Jr., Mann, J.N., McFee, C., Rothwell, G.A., Thenhaus, L.M., Thenhaus, P.C., and Wyant, C., 1975, Origin and Classification of Natural Arches in Southern Utah, in Fasset, J.E., ed., *Canyonlands Country: Four Corners Geological Society Guidebook*, 8th Field Conference, p. 81–86.
- Cruikshank, K.M., and Aydin, A., 1994, Role of fracture localization in arch formation, *Arches National Park, Utah: Geological Society of America Bulletin*, v. 106, p. 879–891, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1994\)106<0879:ROFLIA>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1994)106<0879:ROFLIA>2.3.CO;2).
- Doelling, H.H., 1985, Geologic map of Arches National Park and vicinity, Grand County, Utah, with accompanying text: Salt Lake City, Utah, Utah Geological and Mineralogical Survey Map 74, scale 1:50 000, 15 p. text.
- Filippi, M., Bruthans, J., Řihošek, J., Slavík, M., Adamovič, J., and Mašín, D., 2018, Arcades: Products of stress-controlled and discontinuity-related weathering: *Earth-Science Reviews*, v. 180, p. 159–184, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.012>.
- Grab, S.W., Goudie, A.S., Viles, H.A., and Webb, N., 2011, Sandstone geomorphology of the Golden Gate Highlands National Park, South Africa, in a global context: *Koedoe*, v. 53, p. a985, <https://doi.org/10.4102/koedoe.v53i1.985>.
- Ostanin, I., Safonov, A., and Oseledets, I., 2017, Natural erosion of sandstone as shape optimisation: *Scientific Reports*, v. 7, p. 17301, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17777-1>.
- Rihosek, J., Bruthans, J., Masin, D., Filippi, M., Carling, G.T., and Schweigstillova, J., 2016, Gravity-induced stress as a factor reducing decay of sandstone monuments in Petra, Jordan: *Journal of Cultural Heritage*, v. 19, p. 415–425, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.10.004>.
- Robinson, E.S., 1970, Mechanical disintegration of the Navajo Sandstone in Zion Canyon, Utah: *Geological Society of America Bulletin*, v. 81, p. 2799–2806, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1970\)81\[2799:MDOTNS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1970)81[2799:MDOTNS]2.0.CO;2).
- Stephansson, O., 1971, Stability of single openings in horizontally bedded rock: *Engineering Geology*, v. 5, p. 5–71, [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(71\)90030-5](https://doi.org/10.1016/0013-7952(71)90030-5).
- Stevens, D.J., and McCarrick, J.E., 1988, *The Arches of Arches National Park; A Comprehensive Study*: Moab, Utah: Salt Lake City, Utah, Mainstay Publishing, 169 p.
- Stokes, W.L., 1951, Some aspects of the geology of Arches National Monument, Grant County, Utah: *Utah Academy of Sciences, Arts and Letters Proceedings 1948–1949*, v. 26, p. 151.
- Young, R.W., Wray, R.A.L., and Young, A.R.M., 2009, *Sandstone Landforms*: Cambridge, UK, Cambridge University Press, 314 p.

Printed in USA

# Supplementary text for the article “Evolution of natural rock arches: A realistic small-scale experiment”

**Jaroslav Řihošek<sup>1\*</sup>, Martin Slavík<sup>1</sup>, Jiří Bruthans<sup>1</sup>, Michal Filippi<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Faculty of Science, Charles University, Albertov 6, 128 43 Prague 2, Czech Republic*

<sup>2</sup>*Institute of Geology of the Czech Academy of Sciences, Rozvojová 269, 165 00 Prague 6, Czech Republic*

*\*Corresponding author: Tel.: +420 777786738*

*E-mail address: rihosekjaroslav@gmail.com*

**Video DR1 of physical model erosion**

2019028\_Video DR1.zip

## **JUSTIFICATION OF PURPOSE**

A natural arch is defined as a rock exposure that has a hole completely through it formed by the natural, selective removal of rock, leaving a relatively intact frame (Wilbur, n.d.-a). Many rock arches are formed accidentally, when a combination of “microscopic” and “macroscopic” erosion mechanisms acts together with specific conditions such as the shape of the rock exposure, action of peculiar weathering processes, tectonic history, etc. These have been considered to be essential causes for the formation of natural arches (Vreeland, 1976; Barnes, 1987). Since various fractures in sandstone are commonly a clearly observable feature related to arches, many studies have dealt with the influence of fracturing and enhanced erosion in fracture zones in the creation of arch origins (Cruikshank and Aydin, 1994; Grab et al., 2011). However, no detailed mechanisms of arch formation have yet been given.

The present work was aimed on “perfectly shaped” rock arches that are formed in some sandstones and other granular rocks constituting materials in which the erosion is stress-controlled (see Bruthans et al. 2014; 2017, Filippi et al. 2018).

## **STUDY SITES AND MATERIAL CHARACTERISTICS**

Physical modeling was conducted at the bottom of the Střeleč Quarry (Bohemian Cretaceous Basin), situated approximately 75 km NE of Prague, Czech Republic (50.493346N, 15.245163E). The quarry produces pure quartz sand for the glass industry. The friable sandstone and locked sand (SLS) was deposited during the upper Turonian and Coniacian in a shallow marine environment as coarse grained delta bodies (Uličný, 2001). Impressive features such as towers, arches, windows, etc. are developed in the wider area. The SLS is predominantly composed of fine to medium-grained angular quartz grains (95-99% quartz). The fine fraction content (particles smaller than 25  $\mu\text{m}$ ) is 1.4%, and is composed of well-ordered kaolinite (75%), quartz (24%), and illite (1%) (Bruthans et al., 2014). The SLS that was used for the modeling is characterized by an extreme contrast of tensile and compressive strengths. The uniaxial compressive strength is 2.7-3.2 MPa. Its tensile strength is 2-4 orders of magnitude lower than its compressive strength (Bruthans et al., 2014; Slavík et al., 2017). A high internal friction angle ( $74^\circ$ ) and low cohesion (6 kPa), both determined by the drained triaxial test (Bruthans et al., 2014), are associated with a partially interlocked fabric of angular grains (Dusseault and Morgenstern, 1979). The effectiveness of erosion of SLS depends on the stress level. SLS disintegrates in standing water and is eroded by rain if not loaded. On the contrary, if the same specimen is loaded by an external load or by weight of the overburden, which creates a compressive stress locking the internal structure, it resists both slacking, rain, and flowing water (Bruthans et al., 2014). Further experiments (Rihosek et al., 2016) have demonstrated that the SLS is an excellent material for an accelerated simulation of erosion because of the lack of any interstitial cement.



It is important to note that water erosion by watering can be used as an erosional agent of physical model presented in our work is just one of many erosion processes which are affected by stress. As demonstrated by Bruthans et al. (2014), stress is capable to orchestrate different erosion factors to carve similar shapes including arches (e.g. rain drop and flowing water erosion, slaking disintegration, removal of material due to salt and frost weathering, probably wind erosion).

Arches National Park is very rich in rock arches (over 2000 per 31 km<sup>2</sup>), most of these having developed within the fin-like ridges of the Entrada Sandstone (Oberlander, 1977). Their presence is controlled by a joint system (Cruikshank and Aydin, 1994; Stevens and McCarrick, 1988). Landscape Arch is about 88 m long from base to base, and is considered to be one of the longest arches on Earth (Dixon, 2010). In the 1990's, several rockfall events of the arch occurred (Wilbur, n.d.-b).

## **PROGRESS OF DENUDATION**

Using the frontal view, denudation of the top of the model's fin at seven different points was measured (Figure 1A in main article). It was revealed that during the initial stage, cross-sections I, II, and VII adjacent to the arch eroded, on average, at the rate of 3.2 to 6.3 mm per erosional step; and then the erosion rate surrounding the arch decreased to ~0.5 mm per erosional step, on average (Figure 1B in main article). In the mature stage (erosional step 40-85), cross-sections IV and V at the arch lintel showed the lowest erosion of 0.1, resp. 0.6 mm per erosional step, on average; while in the senile stage (erosional step 85-93), they eroded at the highest rate 4.8-4.9 mm per erosional step, on average. The erosion rate at cross-section VI showed a rapid erosional rate during the initial stage (4.4 mm per erosional step); subsequently the rate decreases to 0.6 resp. 1 mm per erosional step. In the case of III, the initial erosion rate was 2.5 mm per erosional step, and then it remained more-or-less constant, with a speed of 0.9-1 mm per erosional step. It can be seen from Figure 1A in main article that while both cross-sections III and VI were outlined onto abutments at erosional step 0, their location in relation to the arch changed during the development of the arch because the

line of sight wasn't aligned with the incision. The mean denudation per erosional step of the corresponding stage on cross-sections I-VII is illustrated on Figure 1B in main article.

For the sake of analysis of the arch's lintel erosion in its cross section at the center of the arch, the 3D photogrammetric model for each tenth erosional step was created. Area ( $A_i$ ) and circumference ( $C_i$ ) was measured on cross section of arch's lintel to calculate Relative area ( $RA_i$ ), Relative circumference ( $RC_i$ ), and Mean radial recession ( $MRR_i$ ), in corresponding erosional step  $i$ . The following formulae were used:

$$RA_i = A_i/A_0, (1)$$

where  $A_i$  is the area in the step  $i$  and  $A_0$  is the area in the initial stage,

$$RC_i = C_i/C_0, (2)$$

where  $C_i$  is the circumference in the step  $i$ , and  $C_0$  is the circumference in the initial stage, and

$$MRR_i = (A_i - A_{i-1})/C_{i-1}, (3)$$

where  $A_i$  is the area in the step  $i$ ,  $A_{i-1}$  is the area in the preceding step, and  $C_{i-1}$  is circumference in the preceding step.

## **ARCHES ON INCLINED DISCONTINUITIES**

Development of a rock arch on an inclined discontinuity was studied on a small-scale physical model in the Střeleč Quarry (Figure 1). The setup of the experiment was analogous as in case of physical model for the arch developing on a horizontal incision. The lateral compression decreases erosion of the lintel which serves as a buttress of the rock face while the erosion along the inclined incision removes material not supporting the structure (Figure 2). Such arches commonly develop on an inclined discontinuity associated with vertical cliff face (Figure 3).



**Figure 1** Initial step of physical model of arch on an inclined discontinuity.



**Figure 2** Final step of physical model of arch on an inclined discontinuity.



**Figure 3** Arch developed on an inclined discontinuity. An example from Czech Paradise – Duhová brána (Rainbow gate) in Protected landscape area Bohemian Paradise.

#### **ADDITIONAL DISCUSSION TO ARCH FORMATION RATES**

It is usual that arch evolution in many places around the World normally occurs over thousands of years or more.

Our experiment on SLS and a natural example of the La Dame Blanche (The White Lady) Arch in the vicinity of Dieulefit, France (<http://www.naturalarches.org/blog/rapid-evolution-of-an-arch/>), shows that the process can also be very fast. The La Dame Blanche Arch consisted of a

crumbly clay-like rock and evolved from youth through maturity to collapse in the course of just a few years. The arch was first observed in 2009 as a small opening in a fin of the rock, and culminated as a thin bridge in 2014 with a span of approximately 6 m. The arch collapsed in 2015.

The evolution of smaller rapidly-developing arches is dominated by granular disintegration or the flaking of scales, so we have to be cautious extrapolating the results presented prior herein to larger natural arches and bridges built of firm sandstone, with significant amounts of fracturing. In such arches, the stress may exceed strength limits. The physical erosional model can then be adopted assuming some simple structural delimitations: a roughly steady rate of erosion, and relatively negligible size of the eroded elements. Caution must be taken when applying an erosional agent in order to reflect the theorized intensity and distribution of erosion under natural conditions.

#### **NOTE ON THE SUITABILITY OF LOCKED SAND AS AN ANALOGUE TO DEVELOPMENT OF ARCHES IN CEMENTED SANDSTONE**

Sandstone arches are dominantly developed in cemented sandstones, less commonly in locked sands. However, exposed surface of cemented sandstone is usually affected by weathering which effectively decreases cement bonding between individual grains. Framework-supported sandstone with cementation will be transformed on its surface to non-cohesive locked-sand during weathering. This superficial zone is commonly just a few mm thick. Navajo sandstone and some other rock types on Colorado Plateau (USA) showed decrease of tensile strength on weathered surfaces by several orders of magnitude to values typical for locked sand (Bruthans et al., 2014).

#### **NOTE ON THE ORIGIN OF WELL-DEVELOPED ARCHES**

Part of arches clearly originated by random failures of material with lesser importance of stress control on erosion (e.g. Natural Bridge in Bryce Canyon National Park). However well-developed arches (elegant, with smooth surface and nicely curved over most of its span) are probably all the result of strong control of stress on erosion. Stress is the only factor that we are aware of, which physically interconnects all grains or building blocks in a larger scale (Bruthans et

al. 2014) in a rock body into a single system - landform. Instant feedback of the stress field in the landform onto its shape makes stress the only factor capable of organizing the erosion to carve non-random shapes.

#### REFERENCES CITED

Barnes, F.A., 1987. Canyon Country Arches and Bridges: Moab, Utah, Canyon County Publishers, 416 p.

Bruthans, J., Soukup, J., Vaculikova, J., Filippi, M., Schweigstilova, J., Mayo, A.L., Masin, D., Kletetschka, G., and Rihosek, J., 2014, Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion: *Nature Geoscience*, v. 7, p. 597–601.

Bruthans, J., Filippi, M., Schweigstillová, J., and Řihošek, J., 2017, Quantitative study of a rapidly weathering overhang developed in an artificially wetted sandstone cliff: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 42, p. 711–723.

Cruikshank, K.M., and Aydin, A., 1994, Role of fracture localization in arch formation, Arches National Park, Utah: *Geological Society of America Bulletin*, v. 106, no. 7, p. 879–891.

Dixon, J.C., 2010, Canyonlands and Arches: Windows on landscapes in the American southwest, *in* Migoń, P. ed., *Geomorphological Landscapes of the World*: London, Springer Science, p. 39-47.

Dusseault, M.B., Morgenstern, N.R., 1979, Locked sands: *Quarterly Journal of Engineering Geology*, v. 12, p. 117–132.

Filippi, M., Bruthans, J., Řihošek, J., Slavík, M., Adamovič, J., and Mašín, D., 2018, Arcades: Products of stress-controlled and discontinuity-related weathering: *Earth-Science Reviews*, v. 180, p. 159–184.

Grab, S.W., Goudie, A.S., Viles, H.A., and Webb, N., 2011, Sandstone geomorphology of the Golden Gate Highlands National Park, South Africa, in a global context: *Koedoe*, v. 53, no. 1, 14 pages., doi: 10.4102/koedoe.v53i1.985.

- Rihosek, J., Bruthans, J., Masin, D., Filippi, M., Carling, G.T., and Schweigstillova, J., 2016, Gravity-induced stress as a factor reducing decay of sandstone monuments in Petra, Jordan: *Journal of Cultural Heritage*, v. 19, p. 415–425.
- Oberlander, T.M., 1977, Origin of segmented cliffs in massive sandstones of southeastern Utah, *in* Doehring D.O., ed., *Geomorphology in arid regions*, Proceedings of 8th Annual Geomorphological Symposium: Binghamton, State University of New York Publications in Geomorphology, p. 79–114.
- Slavík, M., Bruthans, J., Filippi, M., Schweigstillová, J., Falteisek, L., and Řihošek, J., 2017, Biologically-initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion: *Geomorphology*, v. 278, p. 298–313.
- Stevens, D.J., and McCarrick, J.E., 1988, *The arches of Arches National Park, a comprehensive study*: Moab, Utah: Salt Lake City, Utah, Mainstay Publishing, 169 p.
- Uličný, D., 2001, Depositional system and sequence stratigraphy of coarse-grained deltas in shallow-marine, strike-slip setting: the Bohemian Cretaceous Basin, Czech Republic: *Sedimentology*, v. 48, p. 599–628.
- Vreeland, R.H., 1976, *Nature's Bridges and Arches, Volume 1 – General Information*: Westminster, California, self-published, 64 p.
- Wilbur, J.H., n.d.-a, *Natural Arch Information: Frequently Asked Questions*: <http://www.naturalarches.org/archinfo/faq.htm> (accessed May 2018).
- Wilbur, J.H., n.d.-b, *Landscape Arch*: <http://www.naturalarches.org/big9-1.htm> (accessed May 2018).