

Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky

Charles University, Faculty of Science
Institute of hydrogeology, engineering geology and applied geophysics

Doktorský studijní program: Aplikovaná geologie
Doctoral study programme: Applied geology



Mgr. Jaroslav Řihošek

Vliv napěťového pole na zvětrávání a erozi pískovcových útvarů
Influence of the stress field on weathering and erosion of sandstone landforms

Autoreferát disertační práce
Summary of the Doctoral thesis

Školitel/Supervisor: Doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.
Školitel-konzultant/Supervisor-consultant: prof. RNDr. David Mašín, M.Phil, Ph.D.

Praha, 2022

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 nejintenzivnějšímu zvětrávání či erozi 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 / Table of contents

1. Úvod	5
1.1. Vnitřní faktory zvětrávání a eroze pískovců	5
1.2. Vnější faktory zvětrávání a eroze pískovců	5
1.3. Vliv napěťového pole na zvětrávání a erozi pískovců	6
2. Cíle práce	7
3. Materiál a metodika	7
3.1. Solné zvětrávací experimenty	7
3.2. Tvorba fyzikálních modelů	8
3.3. Analýza rozložení napětí v pískovcovém skalním útvaru nebo fyzikálním modelu	9
3.4. Numerická simulace vzniku pískovcového skalního útvaru	10
4. Výsledky a diskuse	10
4.1. Solné zvětrávací experimenty	10
4.2. Tvorba fyzikálních modelů a numerický výpočet napětí	12
4.2.1. Zvětrávání a eroze nabatejské skalní architektury	12
4.2.2. Rychlý ústup stěny arkózového převisu (Plzeň)	14
4.2.3. Vznik a vývoj pískovcových arkád	15
4.2.4. Vznik a vývoj pískovcových skalních bran	18
5. Závěry	22
1. Introduction	24
1.1. Internal factors of weathering and erosion of sandstones	24
1.2. External factors of weathering and erosion of sandstones	24
1.3. Influence of stress field on weathering and erosion of sandstones	25
2. Aims of the study	25
3. Material and methods	26
3.1. Salt weathering experiments	26
3.2. Construction of physical models	27
3.3. Analysis of stress distribution in a sandstone rock formation or physical model	28
3.4. Numerical simulation of sandstone rock form development	29
4. Results and discussion	29
4.1. Salt weathering tests	29
4.2. Construction of physical models and numerical analysis of stress	31
4.2.1. Weathering and erosion of Nabataean rock architecture	31

4.2.2.	Rapidly recessing wall of arcose overhang (Pilsen).....	33
4.2.3.	Origin and evolution of sandstone arcades	34
4.2.4.	Formation and development of rock arches.....	37
5.	Conclusions	41
	Použitá literatura / References.....	43
	Životopis / Curriculum vitae	47
	Seznam publikací / List of publications:.....	49

1. Úvod

Disertační práci „Vliv napětového pole na zvětrávání a erozi pískovcových útvarů“ tvoří komentovaný souhrn 4 publikovaných odborných recenzovaných článků, které vznikly během mého doktorského studia. Články jsou tematicky zaměřeny na procesy zvětrávání a eroze pískovců a vznik pískovcových skalních útvarů, jejichž tvary je těmito procesy utvářeny.

Pískovcové 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 či 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 a v pískovcových oblastech bývají zodpovědné za vznik charakteristického reliéfu krajiny. Za zvětrávání je obecně považován proces, jehož důsledkem je porušení struktury horniny a jejího mineralogického složení exogenními procesy při zemském povrchu či mělce pod zemským povrchem (Reiche, 1950; Whalley a Warke, 2005). Tradičně se rozlišují fyzikální, chemické a biologické složky zvětrávání.

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

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

1.1. Vnitřní faktory zvětrávání a eroze pískovců

Mezi vnitřní faktory 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 velkých pórů, umožňující pronikání vlhkosti a naopak malých pórů (mikropórů), které snižují odolnost proti mrazovému a solnému zvětrávání. Významnou roli hraje i mineralogické složení pískovců. Zvláště přítomnost jílových minerálů, které jsou častou složkou tmelu pískovců, značně snižuje odolnost před procesy zvětrávání (např. McGreevy a Smith, 1984). Mezi vnitřní faktory lze počítat i stavbu a strukturní prvky pískovcového masivu, které mohou ovlivnit lokalizaci zvětrávání a eroze v rámci výchozu. 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).

1.2. Vnější faktory zvětrávání a eroze pískovců

S projevy mrazového zvětrávání vlivem opakovaného mrznutí a tání vody se setkáváme v pískovcích mírného pásu a chladných oblastí (Palmer a Radley, 1961).

K solnému zvětrávání dochází vlivem krystalizace solí z přesyceného roztoku v pórových prostorech pískovce. Lokalizace krystalizace určuje, zda dojde ke krystalizaci pod povrchem materiálu, která má za následek jeho poškození, nebo zda dojde k relativně méně poškozujícímu výkvětu solí na povrchu materiálu (Rodriguez-Navarro a Doehne, 1999).

Na solné zvětrávání má vliv klima, a v důsledku transportu vlhkosti a solí pod pískovcovým povrchem dochází k akumulaci solí a odpařování částí pískovcového povrchu například v pískovcových převisech (Mol a Viles, 2010). Transportu rozpuštěných solí v důsledku odpařování vody je také připisován vznik fenoménu tafoni (Huinink et al., 2004).

Čistě mechanické působení proudění podzemní vody v porézním pískovci vlivem hydraulického gradientu může způsobovat zrychlenou erozi a podřezávání pískovcového masivu v místě pramene pod hranou pískovcové kvesty. Vznik a vývoj říční sítě tak v některých případech odráží zpětnou vazbu mezi hydraulickým polem podzemní vody a tvarem reliéfu – tento proces se nazývá *sapping* (Laity a Malin, 1985). *Piping* je analogickým procesem, kdy ale vlivem hydraulického gradientu a pole podzemního proudění vznikají podzemní tunely, což bylo pozorováno například v netmelených hruboskalských pískovcích lomu Střeleč v Českém Ráji (Bruthans et al., 2012).

Mineralizované kůry *povrchového zpevnění* (case hardening) vznikají díky migraci vody s rozpouštěnými minerálními látkami směrem k povrchu, kde se po odpaření vody tyto látky ukládají (Robinson a Williams, 1994; Turkington a Paradise, 2005), což vede k zvýšené variabilitě rychlosti zvětrávání v rámci pískovcového výchozu.

Křemenné litologie jsou tradičně považovány za prakticky imunní vůči působení chemického zvětrávání (Tricart a Cailleux, 1972, p. 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 rozpouštěním 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). Proces arenizace je nicméně 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).

Zvětráváním vlivem *teplotní roztažnosti* 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 především v pouštním klimatu, kterému je vystavena např. hora Uluru v centrální Austrálii (Ollier a Tuddenham, 1961).

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.

1.3. Vliv napěťového pole na zvětrávání a erozi pískovců

Vliv mechanického napětí vyvolaného tlakem nadloží na morfologii skalních útvarů byl většinou chápán jako faktor zesilující erozi a zvětrávání. K takové situaci může dojít díky koncentraci napětí u paty skalní stěny a v horských údolích. Velikost napětí protne obálku pevnosti horniny, načež dochází k porušování materiálu, který je tím pádem snadněji erodován. (Gerber a Scheidegger, 1969; Gerber a Scheidegger, 1973). V práci Young et al. (2009) byla již dříve popsána role napěťového pole pro stabilitu a vývoj skalních bran tvořených obloukem.

Předchozí studie kromě článku Mikuláše (1997) nicméně zpravidla nevysvětlují, jakým mechanismem mechanické napětí ovlivňuje proces zvětrávání.

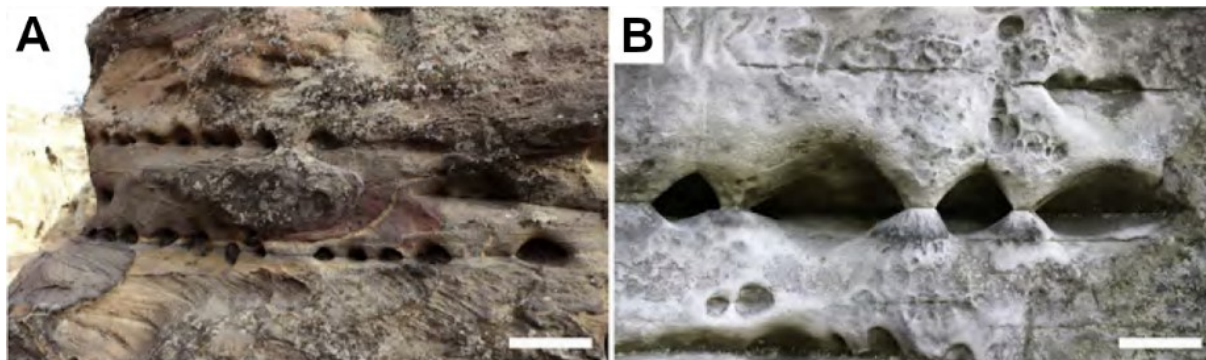
Na příkladu netmeleného střelečského pískovce, jehož nestlačený vzorek se při ponoření do vody rozpadá vlivem slákingu a jehož rozpad je omezen a kontrolován v případě, že je tento vzorek jednoose stlačen, demonstrovali Bruthans et al. (2014) existenci negativní zpětné vazby mezi tlakem a erozí, kdy skalní útvar v gravitačním poli určuje napěťové pole a napěťové pole zase předurčuje, v jaké části daného útvaru bude docházet k erozi.

2. Cíle práce

Disertační práce si klade za cíl shrnout nejvýznamnější poznatky z publikovaných článků, které jsou součástí jejího textu. Společným tématem článků je vliv mechanického napětí na procesy zvětrávání a eroze pískovců, čímž navazují na publikaci „Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion“ (Bruthans et al., 2014), jejíž jsem spoluautorem.

Definoval jsem si následující vědecké otázky a úkoly:

- Ověření principů negativní zpětné vazby mezi napětím a zvětráváním na dlouhodobě exponovaných architektonických památkách vytesaných do pískovce, u kterých je možné odhadnout jejich původní tvar a které od doby svého vybudování již podlely značné míře rozpadu.
- Nalezení vztahu mezi rychlostí rozpadu při solném zvětrávání a mírou stlačení u pískovce, jehož rozpad je řízen napětím.
- Ověření využití skrápění střelečského pískovce pro erozní experimenty, aby bylo možné střelečský pískovec použít jako univerzální přírodní analog k simulaci zvětrávání a eroze cementovaných pískovců.
- Využití principu negativní zpětné vazby mezi napětím a erozí 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 arkády“; Obr. 2-1) a skalní brány.
- Sestavení a testování numerického modelu využívající distribuci napětí určující lokalizaci eroze (matematického modelu v počítači), který by byl schopen předpovídat postupný vývoj tvaru pískovcového útvaru od počátečního tvaru.



Obr. 2-1 Příklady arkád (upraveno podle Filippi et al., 2018). Pískovcové arkády jsou nově popsáným povrchovým fenoménem pískovcových stěn a ukloněných povrchů s přítomností planárních diskontinuit. Mají podobu prohlubní seřazených na povrchu pískovcového masívu podél výrazné plochy vrstevnatosti nebo pukliny. Jednotlivé prohlubně mohou být 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).

3. Materiál a metodika

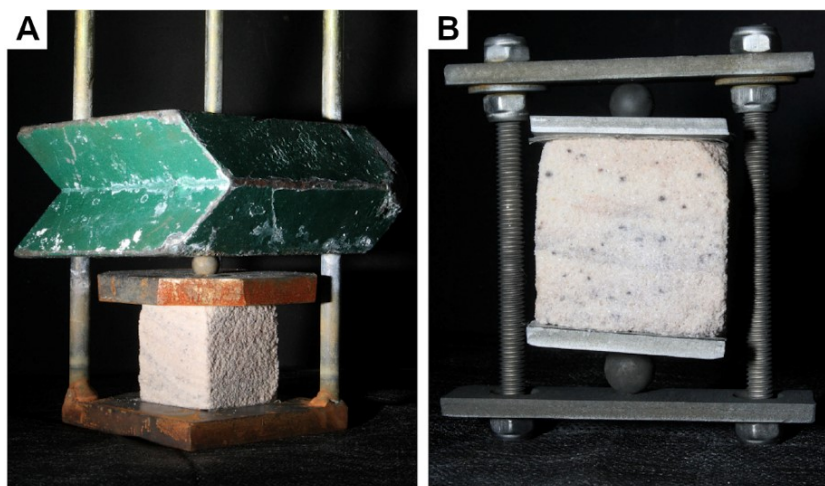
K řešení výše zmíněných otázek jsem použil několik na sebe navazujících metod. Jsou jimi *solné zvětrávací experimenty*, *tvorba fyzikálních modelů*, *analýza rozložení napětí v pískovcovém skalním útvaru nebo fyzikálním modelu* a *numerická simulace vzniku pískovcového skalního útvaru*.

3.1. Solné zvětrávací experimenty

Testy solného zvětrávání slouží ke zjištění odolnosti hornin (zpravidla stavebních materiálů historických památek) vůči destruktivním účinkům krystalizace solí. Tyto testy lze využít i pro laboratorní ověření vlivu mechanického napětí na rychlost zvětrávání. Abych ověřil vliv různých

úrovni stlačení na rychlost zvětrávání pískovců, provedl jsem solné zvětrávací experimenty na vzorcích pískovců 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 vytríděnými pískovci s matrix tvořenou autigenním kaolinitem a cementem hematitu, goethitu a podřízeně kalcitu (Delmonaco et al., 2013). Pískovec má porozitou v rozsahu 4 až 21 % a obsah cementu 7 až 50 % (Heinrichs, 2008).

Testy solného zvětrávání jsem prováděl na šesti vzorcích pískovce v podobě krychlí o hraně délky 4 cm. Dva vzorky jsem nechal nestlačené jako kontrolní, dva vzorky jsem jednoose stlačil pomocí závaží o hmotnostech 5,9 a 11,5 kg (Obr. 3-1 A) 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 (Obr. 3-1 B) 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 Na_2SO_4 , následně sušil v laboratorní peci po dobu 20 h a poté vyndal z laboratorní pece, aby vychladly před jejich dalším nasycením roztokem Na_2SO_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).



Obr. 3-1 Stlačené vzorky krychlí pískovce souvrství Umm Ishrin: A) vzorek stlačený závažím, B) vzorek stlačený stahovací klecí. Upraveno podle Rihosek et al. (2016).

3.2. Tvorba fyzikálních modelů

Jednou ze základních metod mého studia vzniku a vývoje pískovcových skalních útvarů byla tvorba fyzikálních modelů eroze s využitím střelečského pískovce.

Střelečský pískovec nebo dle práce Bruthans et al. (2014) střelečský uzamčený písek (SLS – Strelec Locked Sand) je varieta hruboskalského pískovce těženého v lomu Střeleč u Mladějova v Českém ráji. Těleso hruboskalského pískovce bylo uloženo v prostředí mořských hrubozrnných písčitých delt ve svrchním turonu až spodním coniacu a náleží teplému souvrství české křídové pánve (Uličný, 2001). SLS 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.

Z mechanického hlediska má tento pískovec vysoký úhel vnitřního tření (72°). Jednoosá pevnost SLS 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 pískovec značně křehký a snadno se drolí a obrušuje bříšky prstů. Holý povrch SLS 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 struktury (Bruthans et al., 2014).

Podle charakteristik dle Dusseaulta a Morgensterna (1979) lze SLS 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, vysokou pevnost v tlaku oproti nízké pevnosti v tahu. Tyto vlastnosti jsou způsobeny vzájemným zaklesnutím angulárních zrn, ze kterých jsou uzamčené písky tvořeny.

Vytvořené fyzikální modely simulující erozi mají podobu napodobeniny pískovcového skalního útvaru zmenšeného i skutečného měřítka. Iniciální stav jsem vytvořil z homogenního bloku SLS *in-situ* v lomu Střeleč, na který je následně aplikován erozní proces. V práci Rihosek et al. (2016), Filippi et al. (2018) a Řihošek et al. (2018) jsem tento erozní proces napodobil kropením vodou, kdy energie dopadajících kapek z kropidla 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 toto napětí přenášejí.

V SLS v lomu Střeleč jsem pomocí akumulátorové vrtačky, dlát a ruční pily vytvořil:

- Dva zmenšené idealizované modely (model A a model B) nabatejské skalní architektury v Jordánské Petře představující skalní obydlí s oknem a skupinu kvádrových dutin v ukloněné lomové stěně.
- Hladkou svislou stěnu pro znázornění vzniku pískovcových arkád na přirozených horizontálních diskontinuitách v pískovci jako důsledek kropení vodou.
- Modely iniciálních tvarů v podobě přerušovaných či průběžných horizontálních zářezů ve vertikální skalní stěně pro simulaci vzniku pískovcových arkád.
- Iniciální tvar tvořený horizontálním zářezem, který procházel skrze úzký blok pískovce pro simulaci vzniku a vývoje skalní brány.

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 sestavoval časosběrné záznamy vývoje tvarů těchto erodujících objektů (Rihosek et al., 2016; Filippi et al., 2018; Řihošek et al., 2018).

3.3. Analýza rozložení napětí v pískovcovém skalním útvaru nebo fyzikálním modelu

Pro pochopení vlivu napětí na proces zvětrávání či 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 v geotechnice pro analýzu deformace a stability v geotechnickém inženýrství a mechanice hornin a zemin (Herle, 2003).

V pracích Rihosek et al. (2016) a Filippi et al. (2018) a jsem vstupní 3D tvary vytvořil v programu pro tvorbu 3D počítačové grafiky a importoval je do geotechnického programu Plaxis 3D (Brinkgreve et al., 2013). V pracích Bruthans et al. (2017) a Řihošek et al. (2018) jsem pořídil snímky, z nichž jsem následně sestavil pomocí fotogrammetrického softwaru 3D fotogrammetrické modely. K zjednodušení jejich geometrie a opravě chyb geometrie jsem využil program pro tvorbu 3D počítačové grafiky Blender (Community, 2018). Tímto způsobem vytvořené 3D vstupní tvary jsem následně importoval do programu Plaxis 3D (Brinkgreve et al., 2013).

Úlohy jsem řešil pomocí Mohr-Coulombova materiálového modelu plasticity s parametry odrážejícími chování SLS (Rihosek 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; Rihosek et al., 2018).

Parametry Mohr-Coulombova materiálového modelu plasticity sestávají z Youngova modulu, Poissonova čísla, soudržnosti a úhlu dilatance. Tyto parametry pro SLS 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 dilatance $\psi=24^\circ$ a Poissonova čísla $\nu=0,25$ byly odhadnuty (Rihosek et al., 2016).

Na modely s předepsanými okrajovými podmínkami 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.

Řezy 3D modelů zobrazující velikosti a směry maximálního hlavního napětí σ_1 ukazují ty části pískovcového masivu nebo fyzikálního modelu, které jsou podle teorie napětím řízeného zvětrávání či eroze nejméně náchylné k erozi – s vyššími hodnotami σ_1 , a nejvíce náchylné k erozi – s nižšími hodnotami σ_1 .

3.4. Numerická simulace vzniku pískovcového skalního útvaru

Abych ověřil využití tlakem řízeného zvětrávání či eroze pro simulaci vzniku charakteristických prvků pískovcových skalních útvarů s předpokládaným vlivem mechanického napětí, sestavil jsem numerickou simulaci vzniku pískovcových arkád.

Pro tvorbu numerické simulace jsem využil geotechnický software Tochnog (Roddeman, 2017). 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 subrutina měnící geometrii modelu na základě předepsaného pravidla.

Vstupní 3D tvar jsem definoval jako hranol s tenkým horizontálním polokruhovitým zářezem simulující přítomnou horizontální diskontinuitu. Tento tvar jsem pravidelně rozdělil (diskretizoval) na prvky tvaru kostek, které budou 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 hlavní napětí $\sigma_1 < 2$ kPa. Jako materiálový model jsem použil Mohr-Coulombův model plasticity s odhadnutými mechanickými parametry pro zvětralý pískovec.

Na model byl následně v několika krocích aplikován vliv gravitace a dodatečné vertikální zatížení působící na horní část modelu, které odpovídalo zatížení vyvolaného cca 5 m nadloží. Tím bylo vyvoláno vnější zatížení na uzlech prvků a 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 $\sigma_1 > 2$ a simulace eroze se tím zastavila (Filippi et al., 2018).

4. Výsledky a diskuse

4.1. Solné zvětrávací experimenty

Pro zjištění, jestli existuje nějaký vztah mezi mírou stlačení a rychlostí rozpadu pískovce a jakou má tento vztah formu, jsem provedl v laboratoři sérii testů solného zvětrávání na stlačených vzorcích krychlí částečně zvětralého pískovce souvrství Umm Ishrin, přičemž jsem pozoroval rychlost rozpadu těchto vzorků. 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. Kostky sevřené na počátku experimentu napětím 36, 70, 250 a 680 kPa se rozpadly během 15, 26, 49 a 44 cyklů (Obr. 4-1 A). U vzorků stlačených na počátku experimentu napětím 250 a 680 kPa v ocelových klecích pomocí závitových tyčí a dotažením šroubů momentovým klíčem nebylo možné zaručit stálou sílu sevření během zvětrávacích cyklů, protože konstrukce klecí měla vysokou tuhost 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).

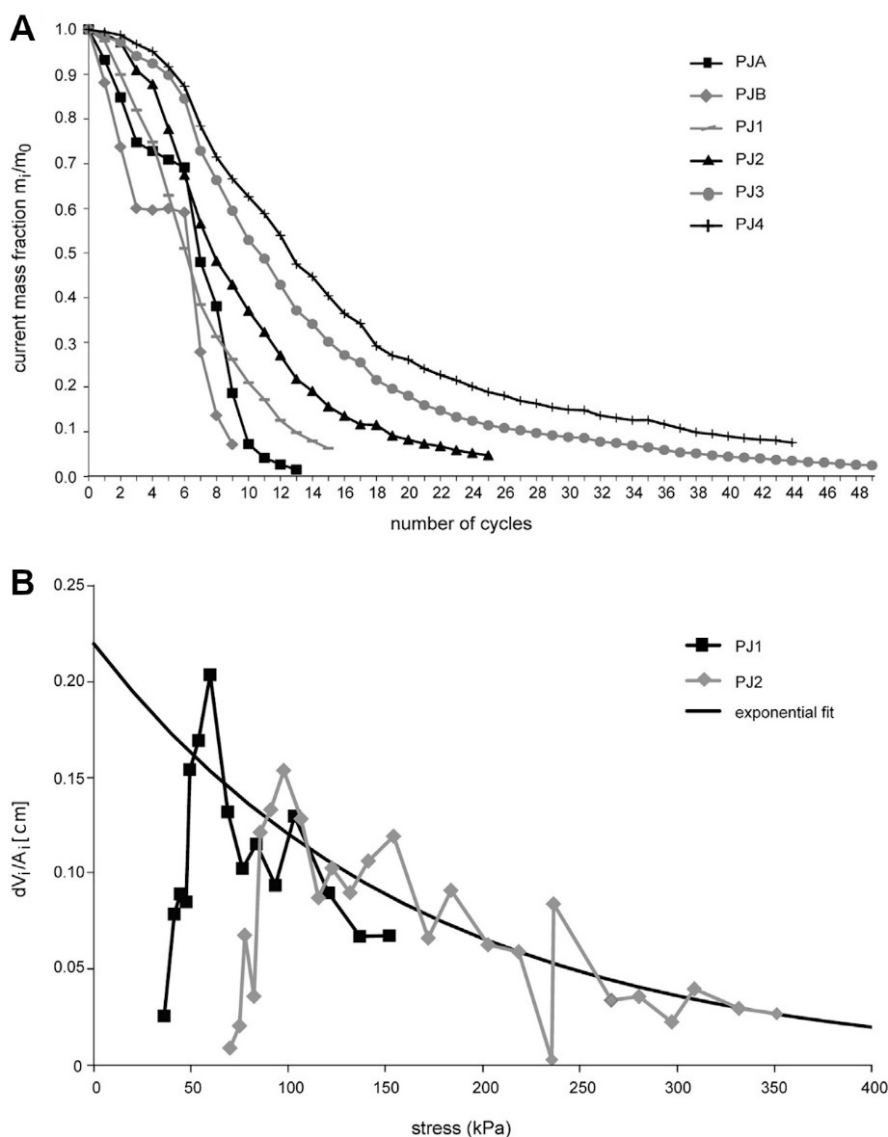
Díky měření hmotnosti uvolněného písku jsem byl schopen určit průměrnou mocnost vrstvy zóny vzorku, která v jednotlivých cyklech ze sloupků odpadla. Po vynesení do grafu stlačení proti této mocnosti se skupiny bodů pro oba experimenty částečně překrývaly, což naznačilo, že existuje empirický vztah mezi stlačením a rychlostí zvětrávání (Obr. 4-1 B). Tento vztah je exponenciální a má podobu

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

, kde V_i je uvolněný objem písku v daném zvětrávacím kroku, 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, α je koeficient exponentu o hodnotě 0,006 kPa⁻¹ a σ_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 Na₂SO₄ 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 se snižuje ke konstantní hodnotě nebo nule. Experiment neumožnil zjistit konkrétní rychlost zvětrávání při zatížení vyšším než 350 kPa (Rihosek et al., 2016).

Navazující dosud nepublikované testy solného zvětrávání s využitím stejné metody jako v Rihosek et al. (2016), které jsem prováděl na různých typech pískovců a které nadále probíhají, ukazují podobný vztah mezi napětím a rychlostí solného zvětrávání. Další směřování výzkumů by mohlo mít podobu experimentů využívajících jiný proces zvětrávání nebo terénního měření pro ověření, zda má tento vztah univerzální platnost. Cílem takových výzkumů by také bylo nalézt reálné parametry pro daný proces zvětrávání či eroze, prostředí a litologii, které by lépe definovaly rychlost zvětrávání vyjádřenou v rychlosti ústupu skalní stěny za jednotku času. Pro fasády nabatejských hrobek a dalších architektonických prvků byly stanoveny rychlosti zvětrávání v rozsahu 0-0,350 mm·rok⁻¹ (Paradise, 1995; Paradise, 2002; Paradise, 2013; Heinrichs, 2008), přičemž jako zvětrávací 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 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 byl zodpovědný pokud možno jeden v čase neproměnný rovnoměrně distribuovaný proces.



Obr. 4-1 Výsledky solných zvětrávacích experimentů na vzorcích pískovce Umm Ishrin. Vzorky PJ1 až PJ4 jsou jednoose stlačené s rostoucí mírou tlaku, vzorky PJA a PJB jsou volné: A) graf poklesu hmotnosti během cyklů solného zvětrávání, B) graf znázorňující snižování poloměru vzorku za jeden zvětrávací cyklus v závislosti na vzrůstající hodnotě jednoosého stlačení vzorku. Upraveno podle Rihosek et al. (2016).

4.2. Tvorba fyzikálních modelů a numerický výpočet napětí

Výsledky fyzikální simulace eroze útvarů vytvořených z SLS metodou kroupení jsem kombinoval s výsledky numerického výpočtu rozložení napětí v těchto útvarech, abych ověřil předpoklady představené 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 nevytvořil fyzikální model, protože u daného převisu v Plzni, který je tvořen arkózami, byla přímo zaznamenávána rychlost ústupu stěny na vybraných profilech.

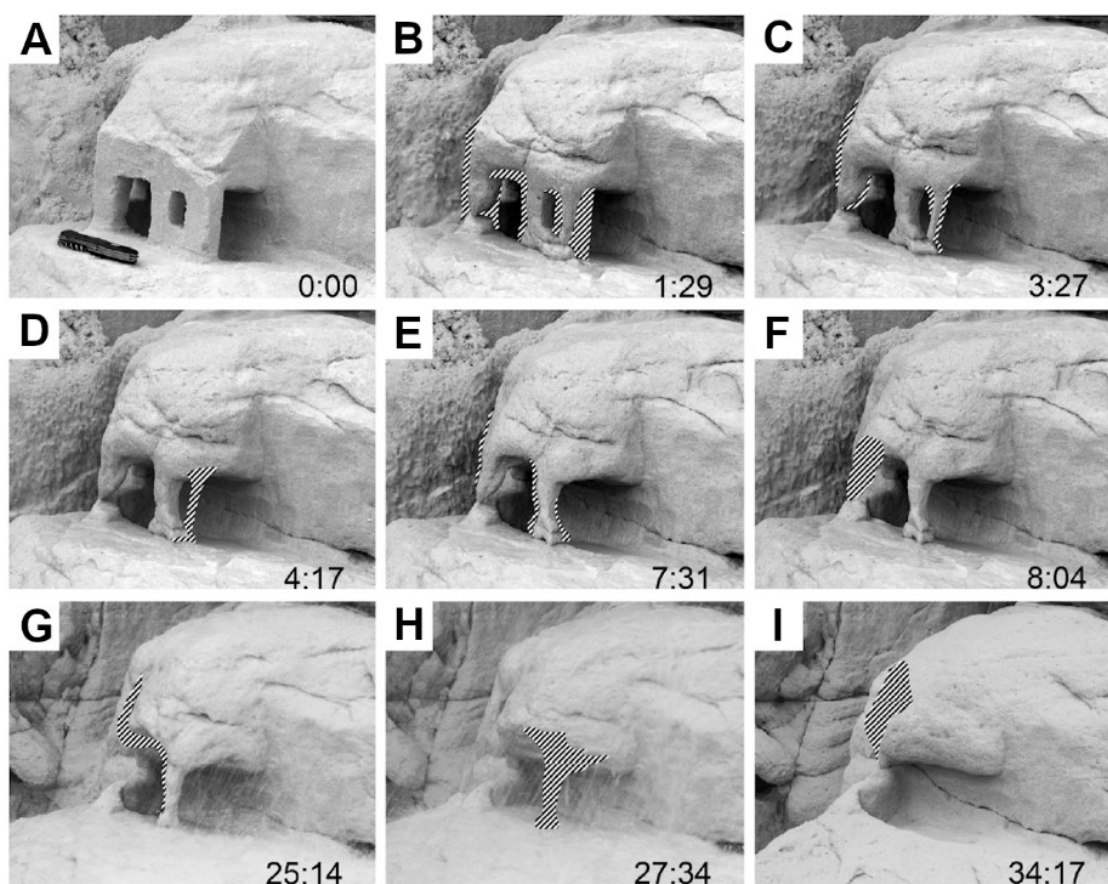
4.2.1. Zvětrávání a eroze nabatejské skalní architektury

Abych zjistil, jakým způsobem probíhá eroze zmenšených modelů nabatejské skalní architektury a zda lze tímto způsobem simulovat procesy eroze postihující reálné historické pískovcové památky, vytěsal 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 (Obr. 4-2) 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 čtyřhranného průřezu, které získaly podobu sloupů oválného průřezu. Střední části překladů a zárubní obdélníkových a čtvercových průzorů (např. „oken“ a „dveří“) byly rovněž rychle erodovány, takže otvory získaly oválný tvar. Po erozním odstranění 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 čtyřhranných 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 z SLS dobře odpovídají pozorovaným tvarům skalní architektury v Jordánské Petře. Zvláště blízké jsou tvarům zvětrání skalních obydlí a hrodek, které byly díky své expozici na okrajích masívů vystaveny výraznějšímu zvětrávání a erozi (Obr. 4-3 D a E; Rihosek et al., 2016).

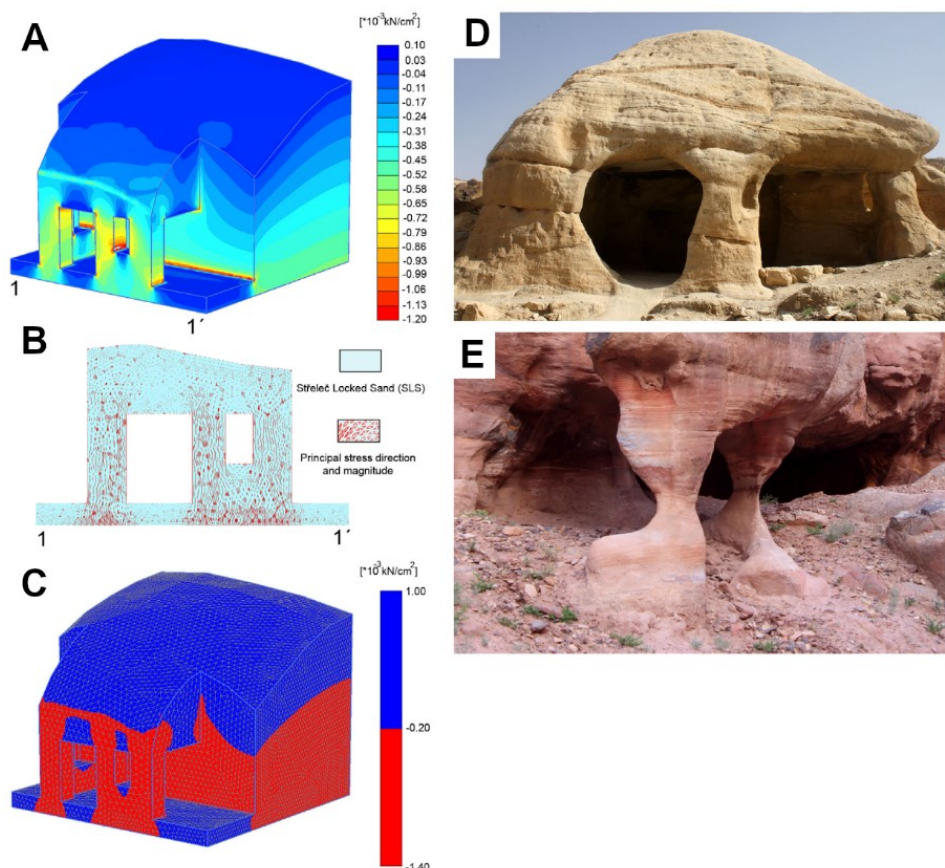


Obr. 4-2 Postupný vývoj fyzikálního modelu skalního obydlí s oknem. Simulaci eroze jsem prováděl skrápěním vodou pomocí ponorného čerpadla s napojenou kropicí násadou. Na fotkách uveden čas kropení. Šrafovou je vyznačena lokalizace eroze. Upraveno podle Rihosek et al. (2016).

Numerické výpočty poskytly rozložení mechanického napětí v iniciálních tvarech fyzikálních modelů nabatejské skalní architektury Jordánské Petry (Obr. 4-3). Zóny zvýšeného maximálního hlavního napětí σ_1 byly lokalizovány na konkávních rozích a hranách modelů jako například v rozích obdélníkových otvorů. Naopak nejnižší hodnota σ_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 (Obr. 4-3 A). Lokalizace nejintenzivnější eroze prostorově úzce korelovala právě s nižšími hodnotami σ_1 . Nejintenzivnější eroze těchto částí modelů vedla k zaoblování konvexních částí modelu. Vyšší odolnost před erozí

vykazovaly modelované tvary původně čtyřhranných pilířů po svém zaoblení do podoby sloupů, u nichž byly zjištěny vyšší hodnoty σ_1 (Rihosek et al., 2016).

Numerické výpočty napětí v inerciálních tvarech fyzikálních modelů poskytly předpověď, které části fyzikálních modelů budou v prvních fázích procesu eroze odstraněny, a tato předpověď dobře souhlasí se skutečností (Obr. 4-3 C, D a E). 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 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.



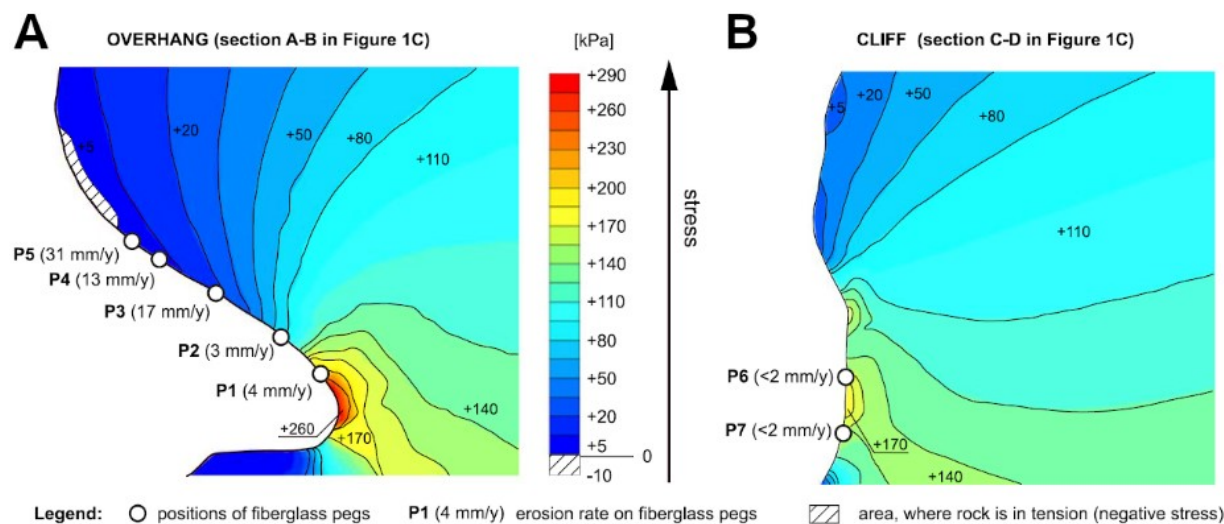
Obr. 4-3 Analýza napětí ve fyzikálním modelu: A) rozložení maximálního hlavního napětí σ_1 v modelu skalního obydlí s oknem, B) směry σ_1 v čelní stěně modelu skalního obydlí s oknem, C) identifikace částí v modelu skalního obydlí, ve kterých bude docházet k erozi (modře); kladné hodnoty značí tah. Příklady pokročilého zvětrávání nabatejské architektury: D) skalní obydlí či hrobka, E) ukázka vzhledu nabatejské architektury značně poškozené zvětráváním. Upraveno podle Rihosek et al. (2016).

4.2.2. Rychlý ústup stěny arkózového převisu (Plzeň)

Převis Čertova kazatelna v karbonských arkózách se nachází městském obvodu Plzeň 7 – Radčice. Tento převis je významný velmi rychlým ústupem stěny vlivem prosakující vody z kanalizace. K opadu velkého množství materiálu dochází převážně v zimních měsících. K zrychlenému ústupu stěny zde dochází již přibližně 35 let, přičemž její 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 je tedy vlivem antropogenních podmínek přibližně 2000 krát vyšší než na výchozech bez antropogenního vlivu a lze ji proto přímo měřit a porovnat s rozložením napěťového pole.

Na rozdíl od analýzy rozložení napětí ve zmenšených fyzikálních modelech budovaných z SLS se v tomto případě jedná o analýzu rozložení napětí v reálném skalním útvaru, která slouží k pochopení, proč určité části převisu zvětrávají rychleji, než jiné. Pro získání věrné geometrie komplikovaného tvaru převisu pro numerickou analýzu rozložení napětí jsem použil metodu fotogrammetrie.

V řezech numerického modelu arkóзовého převisu jsou nejvyšší hodnoty σ_1 (> 150 kPa) lokalizovány v nejzazší části stěny převisu, naproti tomu nejnižší hodnoty σ_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 stěny (cca $4 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$), zatímco nejrychlejší ústup stěny (až $31 \text{ mm} \cdot \text{rok}^{-1}$) byla vysledována právě v nejvíce vybíhající části, kde se hornina dostává do podmínek tahu (Bruthans et al., 2017). Srovnání rozložení σ_1 v převisu a na rovné stěně mimo převis a měřená rychlost eroze na povrchu obou profilů je znázorněno na Obr. 4-4.



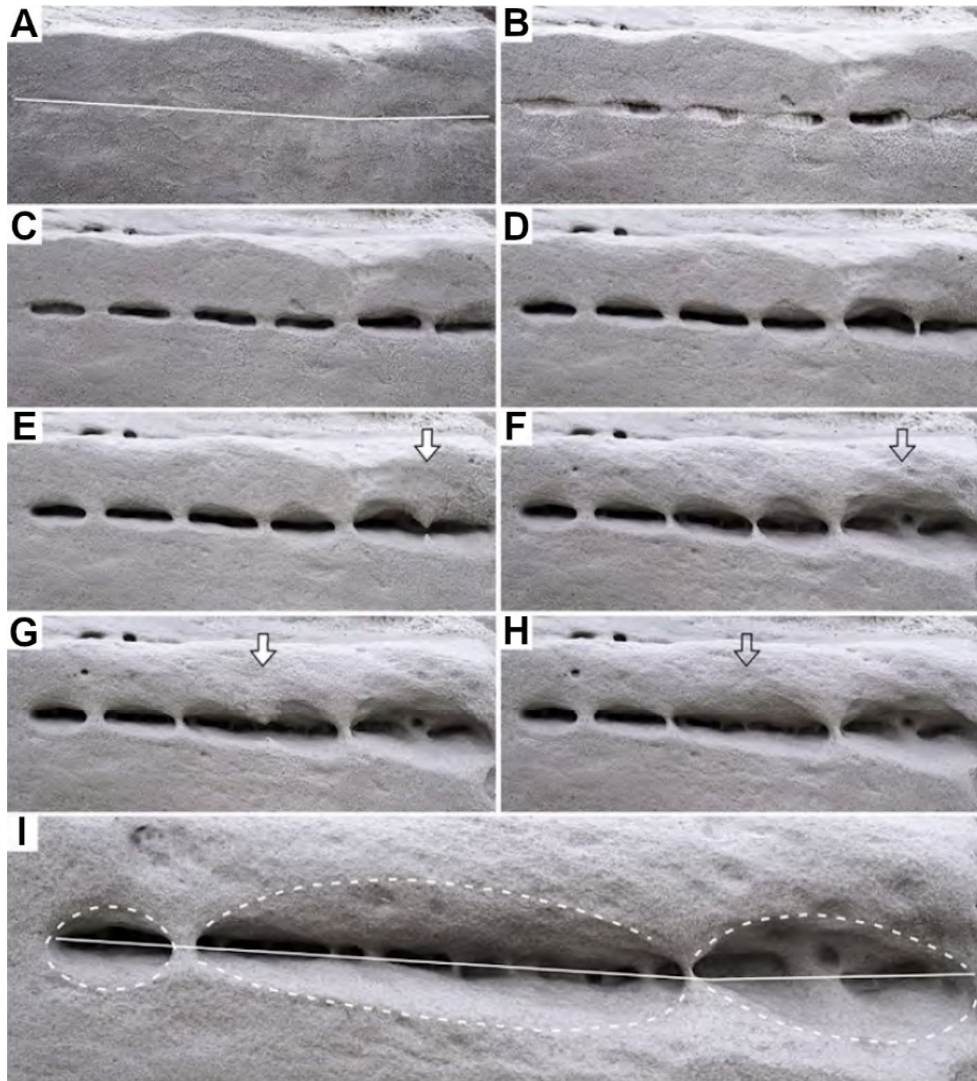
Obr. 4-4 Srovnání rozložení maximálního hlavního napětí v převisu (A) a na rovné stěně mimo převis (B) a měřená rychlost ústupu povrchu na povrchu převisu a rovné stěny. Šířka odpovídá kladným hodnotám napětí, tahové podmínky odpovídají záporným hodnotám napětí. Upraveno podle Bruthans et al. (2017).

4.2.3. Vznik a vývoj pískovcových arkád

V práci zaměřené na popis nové formy kavernózního zvětrávání pískovcových stěn – pískovcových arkád – jsem vytvořil fyzikální modely v lomu Střeleč simulující vznik tohoto fenoménu za účelem potvrzení jeho strukturální vazby na planární diskontinuity a kontrolní role napětí, který řídí tvar a velikosti jednotlivých kaveren, které pískovcové arkády tvoří.

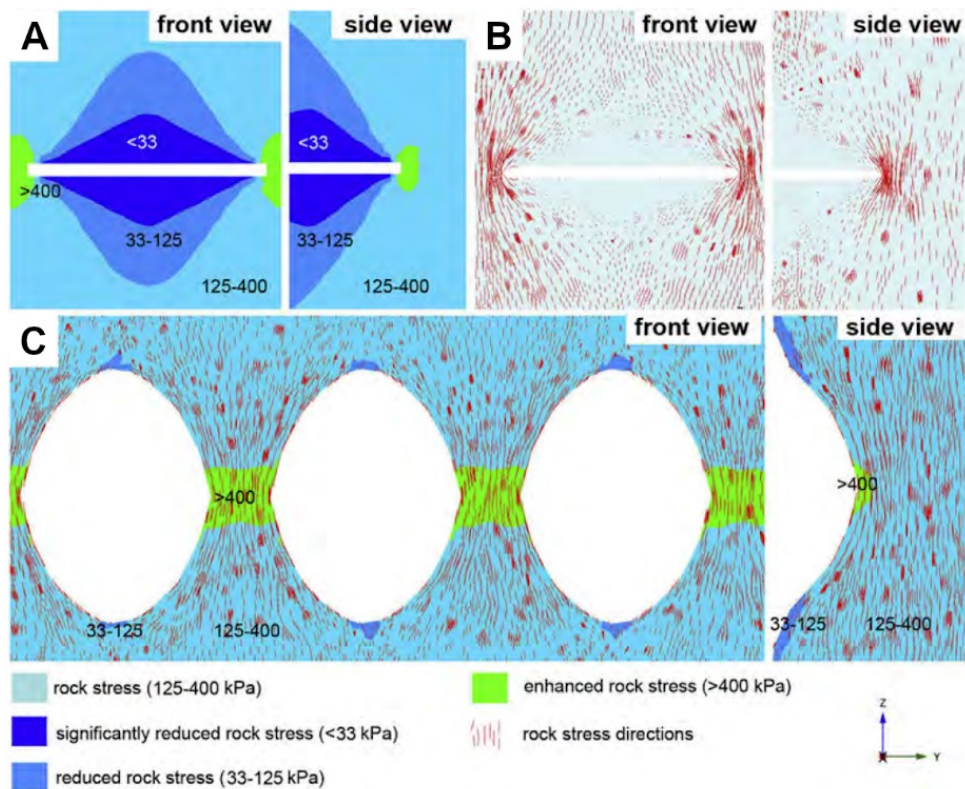
V první verzi simulace vzniku arkád jsem skrápěl vertikální stěnu s přítomností přirozeného subhorizontálního zvrstvení. Výsledkem byla rychlá eroze povrchu stěny, přičemž během několika minut skrápění vzniklo několik desítek půlměsíčitých prohlubní podél mezivrstevních ploch. Poté se eroze prakticky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

Při dalších verzích simulace vzniku skalních arkád byl vodou skrápěn uměle vytvořený průběžný a přerušovaný zářez ve skalní stěně (Obr. 4-5). Výsledkem byl vznik skupiny seřazených prohlubní na místě původních zářezů. Tyto prohlubně byly navzájem odděleny polosloupy. Zpočátku byla eroze preparující arkády značně rychlá, načež se zpomalovala. Eroze skrápěním postihovala především části masivu v napětovém 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 přerušování homogenního masivu a na jejím průniku s vertikální skalní stěnou dochází k redistribuci napětí.



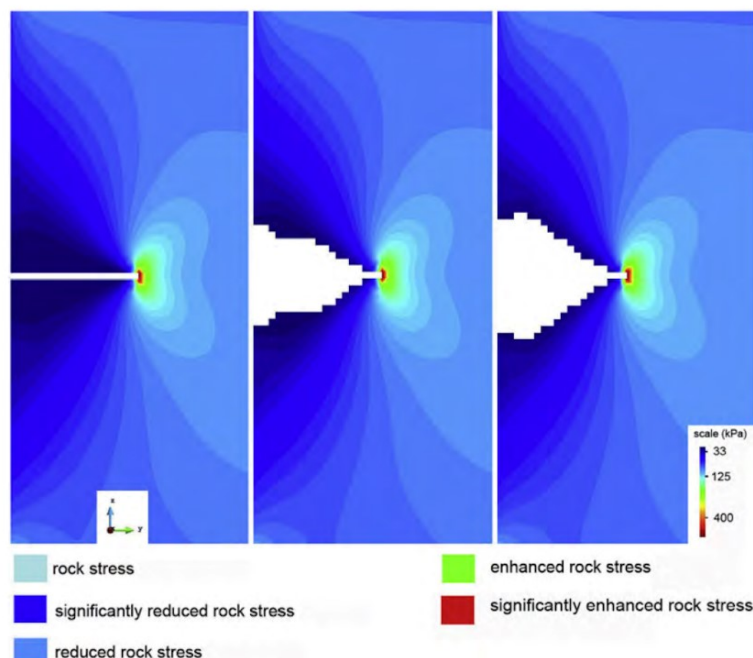
Obr. 4-5 Fyzikální model arkád a jeho postupný vývoj v čase na výchozu s přerušovaným zářezem v lomu Střeleč. Erozi fyzikálního modelu jsem simuloval skrápěním vodou. Upraveno podle Filippi et al. (2018).

Numerické výpočty rozložení napětí v několika typech skalních arkád ukazovaly lokalizaci zvýšeného σ_1 a lokalizaci sníženého σ_1 . Zatímco zvýšené σ_1 se vyskytovalo ve středních částech polosloupů skalních arkád a v jejich zadních stěnách, nejnižší hlavní napětí bylo pozorováno v podobě vybíhajících oblouků „tlakových stínů“ nad a pod zářezem v modelu s přerušovanou horizontální diskontinuitou (Obr. 4-6 A) a nad a pod prohlubněmi modelů s horizontálně protaženými prohlubněmi. Výjimkami byl model s vertikálně protaženými prohlubněmi, kde byl rozsah „tlakového stínu“ nad a pod prohlubní značně omezen (Obr. 4-6 B) a model horizontálně protažených oválných prohlubní s rovnými dny, kde byl „tlakový stín“ nad prohlubní 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. K opadu materiálu dochází nad a pod diskontinuitou, čímž vznikají podél diskontinuity vyrovnané prohlubně. Z hlediska napěťového rozložení bude nejvíce stabilní typ arkád s vertikálně protaženými prohlubněmi (Filippi et al., 2018).



Obr. 4-6 Numerická analýza rozložení napětí v okolí arkád: A) velikost maximálního hlavního napětí σ_1 v okolí horizontálního zářezu, B) směry σ_1 v okolí horizontálního zářezu, C) Velikost a směry σ_1 v okolí vertikálně protažených arkád. Upraveno podle 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 modelu 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 v modelu se spontánně zastavilo, jakmile hodnota σ_1 dosáhla předepsané úrovně ve všech odhalených prvcích (po deseti krocích). Na začátku byla nejvyšší hodnota σ_1 koncentrována v zadní stěně zářezu modelu a nejnižší hodnoty σ_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, nad a pod níž již nebyly přítomny zóny snížených hodnot σ_1 (Obr. 4-7; Filippi et al., 2018).



Obr. 4-7 Numerický model vývoje arkády znázorňující odstraňování povrchových elementů, u nichž je maximální hlavní napětí σ_1 nižší než kritické napětí. Po každém kroku je napětí opětovně vypočteno. Upraveno podle Filippi et al. (2018).

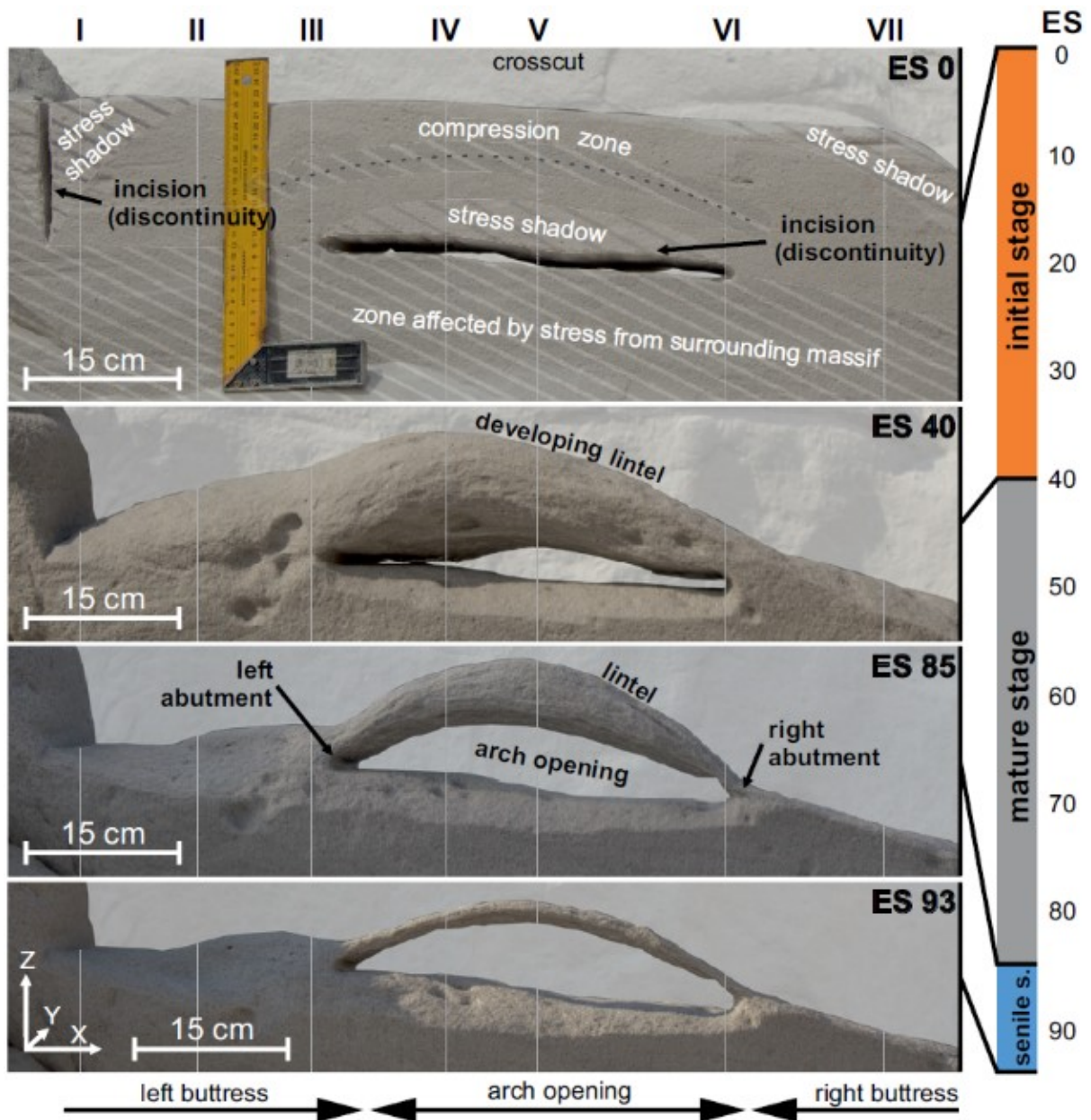
Numerické simulace napětím řízené eroze jako první publikoval Ostanin et al. (2017). Tyto simulace, které využívaly princip negativní zpětné vazby mezi napětím a erozí (Bruthans et al., 2014) byly zaměřeny především na vznik skalních bran a skalních věží. Numerická simulace publikovaná v (Filippi et al., 2018) vysvětlila vznik nově rozezaného prvku mikroreliefu pískovcových stěn. K simulaci byl přitom použit rozšířený 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 v takovém modelu tenký a snáze erodovatelný planární útvar), čímž se autoři vyhnuli nutnosti zadávat diskontinuitu jako prázdný prostor, ale spíše jako materiál kontrastních mechanických vlastností, které jsou způsobeny například odlišnou litologií.

4.2.4. Vznik a vývoj pískovcových skalních bran

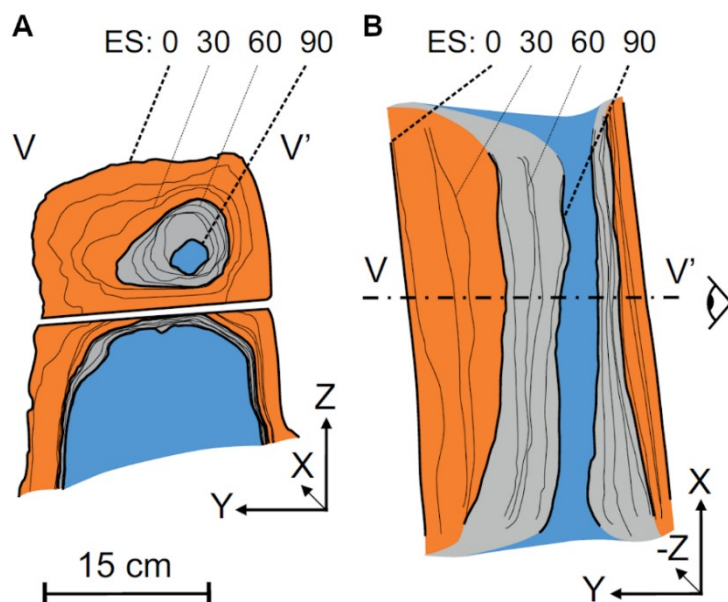
K napodobení vzniku a vývoje skalní brány erozí a zvětráváním jsem využil metodu skrápění iniciálního tvaru vytvořeného z pískovce v lomu Střeleč. Iniciální tvar měl formu úzkého bloku SLS s horizontálním zářezem, který tento blok příčně protínal. Postupným skrápěním vodou pomocí kropicí konve, které vyvolávalo erozi dopadajícími kapkami a proudící vodou, jsem vytvořil dokonalou zmenšeninu skalní brány, jejíž tvar odpovídal dobře vyvinutým skalním branám, s jakými se lze setkat v přírodě (Obr. 4-8).

Vývoj brány byl zachycen v 95 erozních krocích (1 erozní krok = 2 vyprázdňené objemy kropicí konve). Na základě analýzy obrazové dokumentace tvarových změn byly stanoveny tři vývojové stupně skalní brány – iniciální stadium, vyžralost a degradace. Během iniciálního stupně trvajících 40 erozních kroků byly erodovány především masiv po levé a pravé straně budoucí brány. Byl také ztenčen překlád budoucí brány – místo kde následně vznikal oblouk skalní brány. Stupeň vyžralosti, který trval 45 erozních kroků, charakterizovalo zpomalení eroze, eroze přitom postihovala rovnoměrně všechny povrchy modelu. Ve stupni degradace, který trval 10 erozních kroků, došlo k urychlení eroze oblouku brány, který byl zrychleně ztenčován, až do okamžiku jeho kolapsu. 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 (Obr. 4-9). Eroze oblouku byla kontrolována mocností pískovce při bázi obou křídel brány. Ve chvíli, kdy byl 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 k nejrychlejší erozi docházelo především na počátku kropení a postupně se tato rychlost zpomalovala (Řihošek et al., 2018).



Obr. 4-8 Postupný vývoj dokonale skalní brány na fyzikálním modelu z čelního pohledu. ES - erozní kroky. Upraveno podle Řihošek et al. (2018).

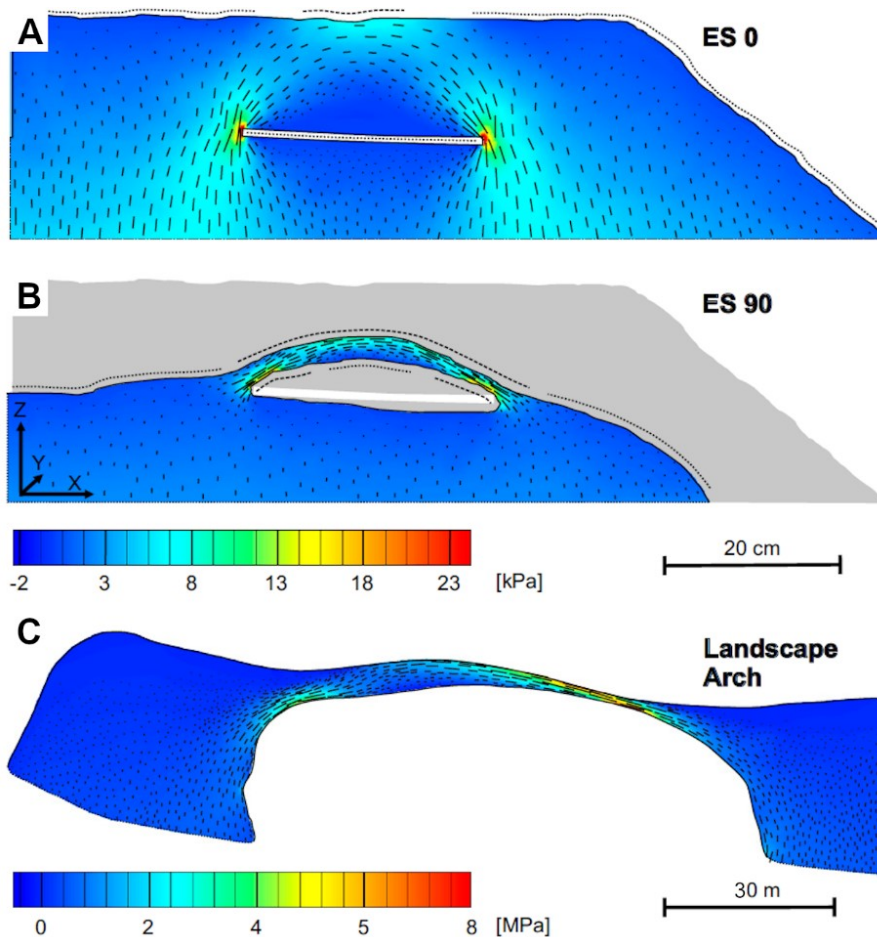


Obr. 4-9 Postupný vývoj skalní brány na fyzikálním modelu v příčném řezu (A) a z horního pohledu (B). Oranžově je znázorněna hmota erodovaná v iniciálním stadiu, šedě hmota erodovaná ve stadiu vyzrálosti, modře je znázorněna hmota erodovaná v senilním stadiu. ES - erozní kroky. Upraveno podle Řihošek et al. (2018).

Numerické modely analýzy rozložení napětí jsem vytvořil pro iniciální a konečný tvar (před zřícením oblouku) fyzikálního modelu brány z SLS a pro skalní bránu Landscape Arch v Národním parku Arches v USA (Obr. 4-10). K tvorbě geometrií modelů jsem využil fotogrammetrii. Pořízené vertikální podélné řezy zobrazily distribuci hodnot σ_1 v těchto objektech a umožnily jejich vzájemné porovnání.

V modelu rozložení napětí iniciálního tvaru fyzikálního modelu byly nejvyšší hodnoty σ_1 koncentrovány v rozích horizontálního zářezu a zvýšené hodnoty σ_1 vytvářely oblouk nad tímto zářezem. Nejnižší hodnoty σ_1 byly naopak situovány mezi zářezem a zónou zvýšených hodnot σ_1 tvořícího oblouk. Zde hodnoty dosahovaly až záporných hodnot, značících podmínky tahu (Obr. 4-10 A).

Model konečného tvaru fyzikálního modelu s již vypreparovanou bránou byl tvořen obloukem pískovce, ve kterém převažovaly zvýšené hodnoty σ_1 . Rozložení napětí v tomto modelu bylo shodné s rozložení napětí v modelu Landscape Arch (Obr. 4-10 B a C). Nejvyšší úrovně tlaku a tlakové gradienty byly situovány kromě míst, kde oblouk přechází v okolní skalní masiv, v nejtenčích částech obou bran. Oba modely se lišily velikostí σ_1 (u Landscape Arch byla jeho hodnota 333 krát vyšší), což odráží především značně odlišnou velikost obou útvarů (rozpětí modelované brány bylo 0,35 m a rozpětí brány Landscape arch je 93 m). Dalším rozdílem bylo 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 σ_1 , zde dosahovalo nejvyšších hodnot, zatímco v mocnějším jihovýchodním křídle bylo σ_1 nižší (Řihošek et al., 2018).



Obr. 4-10 Rozložení velikostí maximálního hlavního napětí σ_1 a jeho směrů: A) počáteční tvar modelu skalní brány, B) tvar modelu skalní brány těsně před zřícením, C) skalní brána Landscape Arch, USA. Upraveno podle Řihošek et al. (2018).

Eroze oblouku kontrovaná mocností jeho báze a přesun eroze vzhůru podél oblouku souhlasí s pozorováním rozšiřováním sklaních bran podél obloukových puklin vzhůru v důsledku tahových sil, které dominují v oblouku, 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 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 asociovaná s výskytem vertikálních paralelních puklin, které vytvářejí úzké hřbety a puklinových zón, které místy tyto hřbety horizontálně protínají. Popis vývoje našeho neznámějšího 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 na materiálu tvořeného střeleckým pískovcem dokládá užitečnost tohoto materiálu pro fyzikální modelování skalních útvarů.

Průběh ztenčování oblouku brány je ovlivněn dříve popsáním efektem negativní zpětné vazby mezi napětím a erozí (Bruthans et al., 2014), což jsem na numerických modelech doložil průběžným přesunem nejvyšších hodnot σ_1 do oblouku, který během eroze zůstává zachován, zatímco eroze více postihuje ty části povrchu, které mají nižší hodnoty σ_1 .

K hlubšímu pochopení procesů vzniku, vývoje a zániku skalních bran by bylo vhodné monitorovat tyto jevy na litologiích snadno podléhajících erozi s vlastnostmi podobnými SLS. Dobrým příkladem je rychlý vznik, vývoj a zánik skalní brány La Damme Blanche v blízkosti města Dieulefit ve Francii, kde celý proces vzniku, vývoje a zániku v jílovitých pískovcích trval cca 5 let. Budoucí výzkum by se také mohl zaměřit na specifické vlastnosti pískovců, ve kterých je častý výskyt skalních bran. Rychlost a charakter rozpadu daného pískovcového útvaru by přitom byly nejdůležitějšími sledovanými faktory, přičemž by byl brán ohled i na distribuci napětí v daném útvaru. Numerická analýza napětí se osvědčila jako vhodná metoda pro zhodnocení stability a stupně vývoje skalní brány. Přítomnost zvýšených gradientů a snížených napětí v bráně mohou ukazovat na místa minulého nebo potenciálního budoucího skalního řícení.

V práci Ostanin et al. (2017) byly vytvořeny numerické simulace vzniku skalních bran, které využívaly efektu 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 (viz. výše), a hodnotu kritického napětí, nad kterou již nedochází k erozi. Z výsledků Rihosek et al. (2016) nicméně plyne, že rychlost zvětrávání klesá spojitě se vzrůstajícím napětím podle určité funkce a že neexistuje jedna hodnota, nad kterou již k erozi nedochází. Navíc při vysokých tlacích dochází k porušování struktury pískovce a při překročení pevnostní obálky materiálu k jeho porušení. Z toho plyne, že numerickým simulacím napětím řízené eroze do této chvíle chybí schopnost věrně zohledňovat spojitost funkce mezi napětím a rychlostí eroze, a porušování 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 projevovat i na architektonických památkách vytesaných v pískovci. Znázornění napětěového 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 kroupení. 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 stádia 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 σ_1) a mechanickými vlastnostmi materiálu, z nichž pro proces vzniku bylo nejdůležitější tzv. kritické napětí.

Exponované části tvořící model (elementy), jejichž σ_1 bylo nižší než kritické napětí, byly postupně odstraněny. U konečného tvaru splňovaly všechny exponované elementy podmínku, že jejich σ_1 bylo vyšší než kritické napětí.

1. Introduction

The doctoral thesis "Influence of the stress field on weathering and erosion of sandstones" consists of an annotated summary of 4 published peer-reviewed articles that were created during my doctoral studies. The articles are thematically focused on the processes of weathering and erosion of sandstones and the formation of characteristic shapes of sandstone landforms.

Sandstone landforms such as overhangs, rock towers, rock arches and tafoni are the results of exogenous processes on the sandstone massif broken by either primary (interlayer areas, layers of contrast lithology) or secondary discontinuities (cracks or fractures). The specific exogenous processes that are responsible for their formation are weathering and erosion. The participation of these processes and slope movements results in surface denudation and they are usually responsible for the formation of the characteristic relief of the landscape in sandstone areas. Weathering is generally considered to be a process that results in a mechanical deterioration of the rock surface structure and changes of its mineralogical composition by exogenous processes at or near the earth's surface (Reiche, 1950; Whalley and Warke, 2005). The physical, chemical and biological components of weathering are traditionally distinguished.

Erosion processes are closely related to weathering processes when the rock is additionally exposed to a flowing medium such as air or water, which can carry away loosened particles or when the particles can fall off the rock surface under their own weight. Such removal can also be caused by wind or water abrasion, when particles hit the surface of the rock and damage its structure.

The abundance of sandstone landforms of a wide range of sizes (mesoforms together with various microforms) in sandstone areas is considered to be a consequence of the lithological and structural diversity of sandstones. Some of these landforms are known only from sandstones (Migoń, 2021). The formation of weathering landforms in sandstone is controlled by internal and external weathering factors and their mutual interaction.

1.1. *Internal factors of weathering and erosion of sandstones*

Internal factors include, for example, grain size, porosity and permeability associated with porosity. Fine-grained sandstones are generally more prone to weathering than coarse-grained ones (Warke et al., 2006; Smith et al., 2002). Weathering is facilitated by the presence of large pores, allowing the intrusion of moisture and, conversely, small pores (micropores), which reduce the resistance to frost and salt weathering. Mineralogical composition of sandstones also plays an important role. In particular, the presence of clay minerals, which are a common component of sandstone matrix, greatly reduces resistance to weathering processes (i.e. McGreevy and Smith, 1984). Internal factors include structure and structural elements of the sandstone massif, which can affect the location of weathering and erosion within the outcrop. Character of fracture systems is a controlling factor of weathering and erosion of many sandstone areas in the Czech Republic and in the world and is the reason for the distinctive character of the sandstone landscape of Central Europe, which is dominated by rock towers and sandstone walls (Pánek and Hradecký, 2016).

1.2. *External factors of weathering and erosion of sandstones*

Manifestations of *frost weathering* due to repeated freezing and melting of water are found in sandstones of temperate zone and cold areas (Palmer and Radley, 1961).

Salt weathering occurs due to crystallization of salts from supersaturated solution in pore spaces of sandstone. The location of crystallization determines whether the crystallization occurs below the surface, which results in a damage to the material, or whether relatively less damaging salt efflorescence occurs on the surface of the material (Rodríguez-Navarro and Doehne, 1999).

Salt weathering is influenced by climate and is caused by the transport of moisture and salts under the sandstone surface. Accumulation of salts below the surface of sandstone causes flaking and scaling,

for example in sandstone overhangs (Mol and Viles, 2010). The transport of dissolved salts due to water evaporation is also attributed to the phenomenon of tafoni (Huinink et al., 2004).

A purely mechanical action of *groundwater flow* in porous sandstone due to hydraulic gradient can cause accelerated erosion and undercutting of a sandstone massif at a spring below a cliff of a sandstone cuesta. The origin and development of river network thus in some cases reflects feedback between the hydraulic field of groundwater and shape of relief - this process is called sapping (Laity and Malin, 1985). Piping is an analogous process, but due to the hydraulic gradient and thus the underground flow field, underground tunnels are created, which was observed, for example, in the Hrubá Skála sandstones of the Střeleč quarry in Český Ráj (Bruthans et al., 2012).

Case hardening is formed due to migration of water with dissolved minerals towards a surface, where these substances are deposited after evaporation of water. Case hardening leads to increased variability of weathering rate within sandstone outcrop (Robinson and Williams, 1994; Turkington and Paradise; 2005).

Lithologies dominated by quartz have been traditionally considered to be virtually immune to chemical weathering (Tricart and Cailleux, 1972, p. 152). However, in specific cases, quartz may dissolve (Martini, 1979; Young, 1986; Young, 1987; Wray, 1997; Wray, 2013; Grimes et al., 2009; Wray and Sauro, 2017), and thanks to this process - partial *dissolution of quartz* grains along their boundaries and disruption sandstone integrity (arenization) - various karst manifestations arise in sandstones, such as rock pots and drainage canals or even caves and abysses (Young et al., 2009). However, the arenization process is expected in areas built of rocks with a high quartz content, with a very high total precipitation of humid tropical or subtropical climate and long exposure of rock surfaces to climate in the areas that have been geologically stable for a long time. However, such conditions cannot currently be expected in temperate areas of the Central Europe or the Colorado Plateau in the USA (Migoń, 2021).

Weathering due to *thermal expansion* is a result of a temperature gradient in surface parts of the sandstone induced by sun exposure alternating with night cold. As a result the sandstone surface is affected by scaling and flaking. Such conditions can be expected especially in desert climate, for example, at Mount Uluru in central Australia (Ollier and Tuddenham, 1961).

Exfoliation is manifested by formation of cracks copying existing topography. It causes curved cracks and surfaces on slopes of a sandstone massifs. While one group of authors assumes that exfoliation is due to denudation-induced stress relaxation (Bradley, 1963; Ollier and Tuddenham, 1961), others assume the effect of uneven stress distribution in the rock due to the current topography of irregular terrain (Yatsu, 1988; Carlsson and Olsson, 1982; Martel, 2011). Young et al. (2009) are inclined to believe that exfoliation may be a consequence of both, on a case-by-case basis.

1.3. Influence of stress field on weathering and erosion of sandstones

The influence of mechanical stress caused by overburden pressure on morphology of landforms was mostly presumed to be a factor enhancing erosion and weathering. This situation can occur due to concentration of stress at a foot of a rock wall and in mountain valleys. The stress state of material intersects or lays outside of strength envelope of given rock, which results in fracturing of the material, which is thus more easily eroded. (Gerber and Scheidegger; 1969, Gerber and Scheidegger, 1973). Young et al. (2009) have previously described the role of the stress field for increased stability and development of rock arches.

However, previous studies, apart from the article by Mikuláš (1997), do not usually explain the mechanism by which mechanical stress affects the weathering process.

According to Bruthans et al. (2014) there is a negative feedback between pressure and erosion. A shape of a landform in the gravitational field determines stress field and the stress field in turn determines in which part of the landform erosion will occur.

2. Aims of the study

The dissertation aims to summarize the most important findings from the published articles that are part of its text. The common topic of the articles is the influence of mechanical stress on processes of sandstone weathering and erosion. This topic reflects main idea of article "Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion" (Bruthans et al., 2014), which I co-authored.

I have defined the following scientific issues and tasks:

- Verification of the principles of negative feedback between stress and weathering on long-term exposed architectural monuments carved into sandstone, for which it is possible to estimate their original shape and which have undergone a significant degree of weathering since their construction.
- Finding the relationship between rate of decay and uniaxial compression magnitude of a sandstone samples whose decay is controlled by stress.
- Verification of the use of watering (using watering can or hose with sprinkler) of erodible sandstone in Střeleč quarry for erosion experiments, so that watering of such sandstone can be used as an universal natural analogue to simulate weathering and erosion of cemented sandstones.
- Utilization of the principle of negative feedback between stress and erosion and new methods to explain and describe formation and development of other sandstone forms, such as rock overhangs, small lined cavities and columns at planar discontinuities in sandstones ("sandstone arcades"; Fig. 2-1) and rock arches.
- Construction and testing of a numerical model using stress distribution determining location of erosion (mathematical model in a computer), which would be able to predict gradual development of shape of a sandstone form from initial shape.

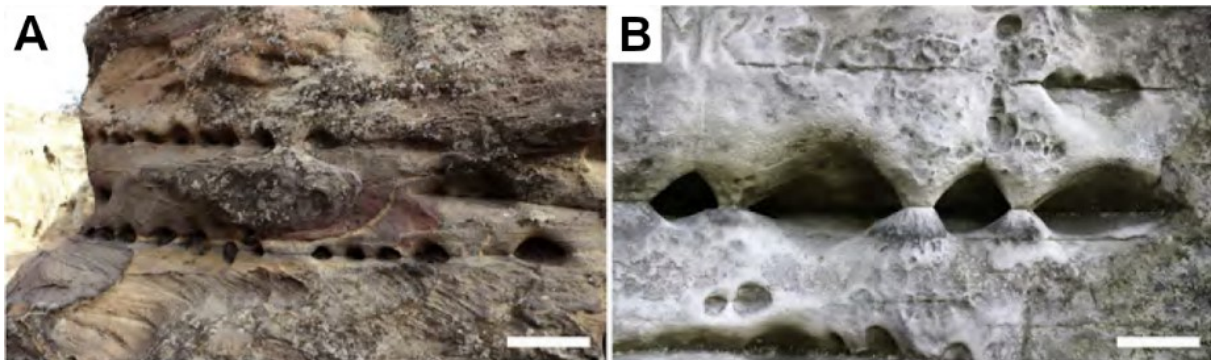


Fig. 2-1 Examples of arcades (adapted from Filippi et al., 2018). Sandstone arcades are a newly described surface phenomenon of sandstone walls and sloping surfaces with presence of planar discontinuities. They have form of cavities lined up on the surface of a sandstone massif along a significant area of stratification or fracture. The individual cavities may be partially interconnected and, if so, they are separated by sandstone columns in form of rock clocks. They are a manifestation of cavernous weathering similar to honeycombs or taphoni, but differ in their close relation to the planar discontinuity (Filippi et al., 2018).

3. Material and methods

I used several consecutive methods to solve the above issues. These are *salt weathering experiments*, *construction of physical models*, *analysis of stress distribution in a sandstone landform or physical model*, and *numerical simulation of weathering/erosion of a sandstone landform*.

3.1. Salt weathering experiments

Salt weathering tests are used to determine the resistance of rocks (usually building materials of a historical monument) to destructive effects of salt crystallization. These tests can also be used for laboratory verification of effect of mechanical stress on weathering rate. To verify the effect of

different compression levels on the weathering rate of sandstones, I performed salt weathering experiments on sandstone samples of the Umm Ishrin Formation, in which rock tombs and other Hellenic architectural objects of Nabataean culture are carved in the city of Petra in Jordan. The Umm Ishrin Formation is composed of Cambrian-Ordovician medium-grained well-sorted sandstones with a matrix of autogenous kaolinite and cement of hematite, goethite and subordinate calcite (Delmonaco et al., 2013). Porosity of the sandstone is in the range of 4 to 21 % and the cement content of 7 to 50 % (Heinrichs, 2008).

I performed salt weathering tests on six sandstone samples in the form of cubes with an edge length of 4 cm. I left two samples uncompressed as a control, other 2 samples were uniaxially loaded with weights of 5.9 and 11.5 kg (Fig. 3-1 A), and two samples were loaded in steel cages using threaded rods and tightened by bolts with a torque wrench to 0.3 and 0.7 Nm (Fig. 3-1 B) similarly as in Bruthans et al. (2014). This resulted in a set of samples where two samples were not loaded, and the other four samples were compressed with a uniaxial stress of 36 kPa, 70 kPa, 250 kPa and 680 kPa. The stress in all compressed samples was transferred to the sandstone by steel plates coated with several layers of PE food foil. All samples were then subjected to repeated 24-hour cycles, where I always saturated the samples by immersion in a 16% Na_2SO_4 solution, then dried in a laboratory oven for 20 hours and then removed from the laboratory oven to cool before further saturation with Na_2SO_4 solution. I weighed the samples after each cycle and I also measured weight of the released material - sand - on laboratory scales. I performed the whole process repeatedly until the samples were completely disintegrated due to crystallization of mirabilite $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (Rihosek et al., 2016).

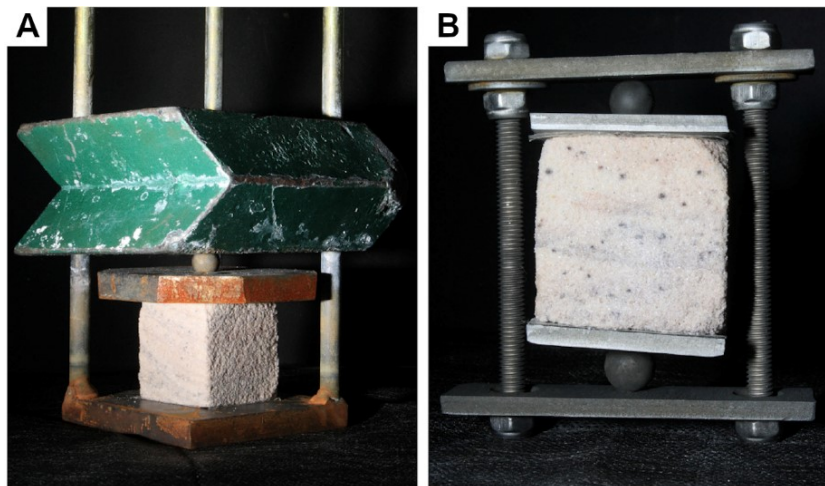


Fig. 3-1 Compressed cubic samples of sandstone of the Umm Ishrin Formation: A) sample loaded by weight, B) sample loaded in steel cage. Adapted from Rihosek et al. (2016).

3.2. Construction of physical models

One of the basic methods of my study of origin and development of sandstone rock formations was the construction of physical models of erosion using watering (using watering can or hose with sprinkler) of Střeleč sandstone.

Střeleč sandstone or according to the work of Bruthans et al. (2014) Střeleč Locked Sand (SLS) is a variety of the Hrubá Skála sandstone mined in the Střeleč quarry near Mladějov in the Bohemian Paradise. The body of the Hrubá Skála sandstone was deposited in the environment of marine coarse-grained sand deltas in Upper Turonian to Lower Coniacian and belongs to the Teplice Formation of the Czech Cretaceous Basin (Uličný, 2001). SLS has a white-gray color at the site in the Střeleč quarry, in contrast to the overlying yellow sandstone. It forms several decimetres thick isoclinally inclined foresets. It is a medium-grained to coarse-grained pure quartz sandstone with a low content of kaolinite - around 1.2 % (Schweigstillová et al., 2013). It has no cement and porosity is around 22 %. Quartz grains forming this sandstone are angular with a rough surface and manifestations of epitaxial growth of quartz.

From a material mechanics point of view, this sandstone has a high internal friction angle (72°). Uniaxial compressive strength of SLS is up to 3 MPa, which is a relatively high value compared to its low tensile strength (Bruthans et al., 2014). If dry, the sandstone is quite brittle and is easily crushed and abraded by fingertips. Bare SLS surface is easily eroded by flowing water and rain. When submerged in a water, the unloaded sandstone is disintegrated by slaking. If, on the other hand, the sandstone is subjected to compression of 0.5-2.6 kPa (minimum critical stress), after immersion in water there is no significant destruction of the structure due to slaking (Bruthans et al., 2014).

According to characteristics of so-called locked sands in Dusseault and Morgenstern (1979), SLS can be assigned as such. Locked sands are generally brittle, cohesionless due to absence of cement, have lower porosity than maximally compacted sand, generally high internal friction angle, and high compressive strength compared to its low tensile strength. These properties are caused by interlocking of the angular grains from which the locked sands are formed.

The constructed physical models simulating erosion are in the form of a sandstone landform replica of reduced or real scale. I created the initial form from a homogeneous block of SLS *in situ* in the Střeleč quarry, to which the erosion process was subsequently applied. In Rihosek et al. (2016), Filippi et al. (2018) and Řihošek et al. (2018) I simulated the erosion process by sprinkling with water, where energy of the incident droplets from the sprinkler disrupted those parts of the physical model that do not transmit gravity-induced mechanical stress (not compressed or in tension). Water erosion didn't affected those parts of the physical model that transmit the stress.

In the SLS using a cordless drill, chisels and a hand saw I constructed:

- Two small-scale idealized models (model A and model B) of Nabataean rock architecture in Petra, Jordan, representing a rock dwelling with a window and a group of block cavities in a sloping quarry wall
- Smooth vertical wall to show development of sandstone arcades on natural horizontal discontinuities in the sandstone as a result of water sprinkling
- Models of initial shapes in the form of intermittent or continuous horizontal notches in vertical rock wall to simulate the formation of sandstone arcades
- Initial shape formed by a horizontal incision that cut through a narrow block of sandstone to simulate the formation and development of a rock arch

I then sprinkled these initial models with water, either continuously using a submersible pump with a connected hose and sprinkler, or in individual steps using a gardening can with sprinkler. I recorded the process of erosion using a digital camera placed on a tripod, always after a constant amount of applied water (same potential erosion intensity). Subsequently, I compiled time-lapse records of the development of the shapes of these eroding objects from the acquired images (Rihosek et al., 2016; Filippi et al., 2018; Řihošek et al., 2018).

3.3. Analysis of stress distribution in a sandstone rock formation or physical model

To understand the effect of stress on the weathering or erosion process of a sandstone massif, it was necessary to determine the stress distribution within a given sandstone landform or physical model. For this purpose, I used software for stress distribution analysis, which is commonly used in geotechnics for the analysis of deformation and stability in geotechnical engineering and mechanics of rocks and soils (Herle, 2003).

In Rihosek et al. (2016) and Filippi et al. (2018) I created the input 3D shapes in a program for creating 3D computer graphics and imported them into the geotechnical program Plaxis 3D (Brinkgreve et al., 2013). In Bruthans et al. (2017) and Rihosek et al. (2018) I took pictures, from which I then compiled 3D photogrammetric models using photogrammetric software. To simplify their geometry and correct geometry errors, I used a program for creating 3D computer graphics Blender (Community, 2018). I then imported the 3D input shapes created in this way into the Plaxis 3D program (Brinkgreve et al., 2013).

I solved the problems using Mohr-Coulomb material model of plasticity with parameters reflecting the behavior of SLS (Rihosek et al., 2016; Řihošek et al., 2018) or linear elastic isotropic material model based on published sandstone parameters (Filippi et al., 2018; Bruthans et al., 2017; Rihosek et al., 2018).

The parameters of the Mohr-Coulomb material model consist of Young's modulus, Poisson's ratio, cohesion, and dilatancy angle. These parameters for SLS have been based on various tests. Based on ultrasonic wave velocity tests, I determined the Young's modulus $E = 606.3$ MPa (Rihosek et al., 2016). The internal friction angle $\phi = 72^\circ$ was taken from the results of triaxial tests (Bruthans et al., 2014). I derived the cohesion value from the results of triaxial tests and uniaxial compressive strength tests reported in Bruthans et al. (2014) as $c = 238$ kPa (Rihosek et al., 2016). The dilatancy angle value $\psi = 24^\circ$ and the Poisson ratio $\nu = 0.25$ were estimated (Rihosek et al., 2016).

The effect of gravity was subsequently applied in several steps to the models with the prescribed boundary conditions, which caused an external load on the nodes of the elements. According to the external load, the values of the internal forces of the elements were iteratively equalized using the material model and balance equations, thus calculating the mechanical stress in the models.

Sections of 3D models showing the magnitudes and directions of the maximum principal stress σ_1 show those parts of the sandstone massif or physical model that are, according to stress-controlled weathering or erosion theory, least prone to erosion - with higher σ_1 values, and most prone to erosion - with lower σ_1 values.

3.4. Numerical simulation of sandstone rock form development

To verify the use of stress-controlled weathering or erosion to simulate the formation of characteristic elements of sandstone rock landforms with the expected effect of mechanical stress, I compiled a numerical simulation of the formation of sandstone arcades.

I used geotechnical software Tochnog (Roddeman, 2017) to create the numerical simulation. The simulation in the Tochnog program was divided into calculation phases, where in each phase the mechanical stress distribution in the model was first calculated by the finite element method and then a subroutine was enabled to change the geometry of the model based on prescribed rules.

I defined the input 3D shape as a prism with a thin horizontal semicircular notch simulating the present horizontal discontinuity. I regularly divided (discretized) this shape into cube-shaped elements, which will be removed by the subroutine during the erosion simulation. The element removal performed by the subroutine took the form of a condition in which all elements that are exposed on the surface of the model and at the same time at which the maximum principal stress $\sigma_1 < 2$ kPa are removed. As the material model, I used the Mohr-Coulomb plasticity model with estimated mechanical parameters for weathered sandstone.

The effect of gravity and additional vertical load acting on the upper part of the model was subsequently applied to the model in several steps, which corresponded to the load caused by about 5 m of overburden. This caused an external load on the element nodes and the mechanical stress in the model was calculated. Then the first run of the subroutine removing insufficiently compressed cubic elements from the exposed parts of the model was performed. In the next phases, the calculation of the mechanical stress in the modified model geometry and the removal of insufficiently loaded elements was always repeated until the model shape stabilized at a state where σ_1 was > 2 kPa for all model elements and the simulation of erosion stopped (Filippi et al., 2018).

4. Results and discussion

4.1. Salt weathering tests

To determine if there is a relationship between uniaxial compression magnitude and sandstone decay rate and what form it takes, I performed a series of salt weathering tests on loaded cubic samples of partially weathered Umm Ishrin sandstone in the laboratory, observing the decay rate of these samples.

Based on these experiments, I proved that there is an inverse relationship between the compression and the decay rate of the sandstone.

Uncompressed samples completely disintegrated within 9 and 13 cycles. The cubes loaded at the beginning of the experiment by compressive stress of 36, 70, 250 and 680 kPa disintegrated during 15, 26, 49 and 44 cycles respectively (Fig. 4-1 A). For samples compressed at the beginning of the experiment with 250 and 680 kPa in steel cages using threaded rods and tightened by screws with a torque wrench, it was not possible to guarantee a constant load during weathering cycles because the cage construction had high rigidity which could lead to a significant change in compression. In contrast, for samples initially compressed with 36 and 70 kPa using weights, it was possible to determine the increase in stress as the column formed by the sample narrowed during the experiment. At the end of the experiment, the compressive stress of the samples reached approximately 150 kPa (for the sample initially compressed to 36 kPa) and about 350 kPa (for the sample initially compressed to 70 kPa).

Thanks to the measurement of the weight of loosened sand, I was able to determine the average thickness of the layer of the sample that fell off the columns in individual cycles. After plotting the reduction of thickness against the compression level, the groups of points for the two experiments partially overlapped, suggesting that there was an empirical relationship between compression and decay rate (Fig. 4-1 B). This relationship is negative exponential and has a form

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

, where V_i is the volume of sand released in the given weathering cycle i , A_i is the exposed area of the sample (surface of cylinder shell of the sample). Therefore $\frac{dV_i}{A_i}$ corresponds to the thickness of the decayed sandstone zone in cm in the given weathering cycle i , R_0 is the decay rate per weathering cycle i when compressed by 0 kPa which is 0.22 cm, α is the coefficient of the exponent of value 0.006 kPa^{-1} and σ_i is the compressive stress in kPa in the given weathering cycle i .

Using this formula, it is possible to imply what thickness of sandstone disintegrates in one weathering step of salt weathering using Na_2SO_4 according to the method inspired by the standard EN12370 (1999) for a given level of compression. The formula and the measured values indicate that the decay rate increases sharply at a lower compression levels and decreases to a constant value or zero at a higher compression levels. It was not possible to determine the specific weathering rate at loads higher than 350 kPa during this experiment (Rihosek et al., 2016).

Follow-up unpublished salt weathering tests using the same method as in Rihosek et al. (2016), which I performed on different types of sandstones and which are still ongoing, show a similar relationship between stress and salt weathering rate. Further research could take the form of experiments using a different weathering process or different approach to field measurements to verify that this relationship is universally valid. The aim of such research would also be to find real parameters for a given weathering or erosion process, environment and lithology, which would better define the rate of decay expressed in the rate of rock wall retreat per unit time. Weathering speeds in the range of $0\text{-}0.350 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$ have been determined for the façades of Nabataean tombs and other architectural elements (Paradise, 1995; Paradise, 2002; Paradise, 2013; Heinrichs, 2008), where salt weathering, water erosion during rainfalls, swelling due to moisture, and insolation were considered as weathering processes (Wedekind and Ruederich, 2013; Paradise, 2002; Heinrichs, 2008). There is a very unevenly distributed cavernous weathering, while the properties (i.e. porosity) and composition of the sandstone are also important factors (Paradise, 1995; Heinrichs, 2008). To study the effect of stress on the decay rate in the field, it would be necessary to find a location where, as in Petra, it is possible to estimate the original shape of the rock formation in the past and where decay would be caused by single evenly distributed process stable in time.

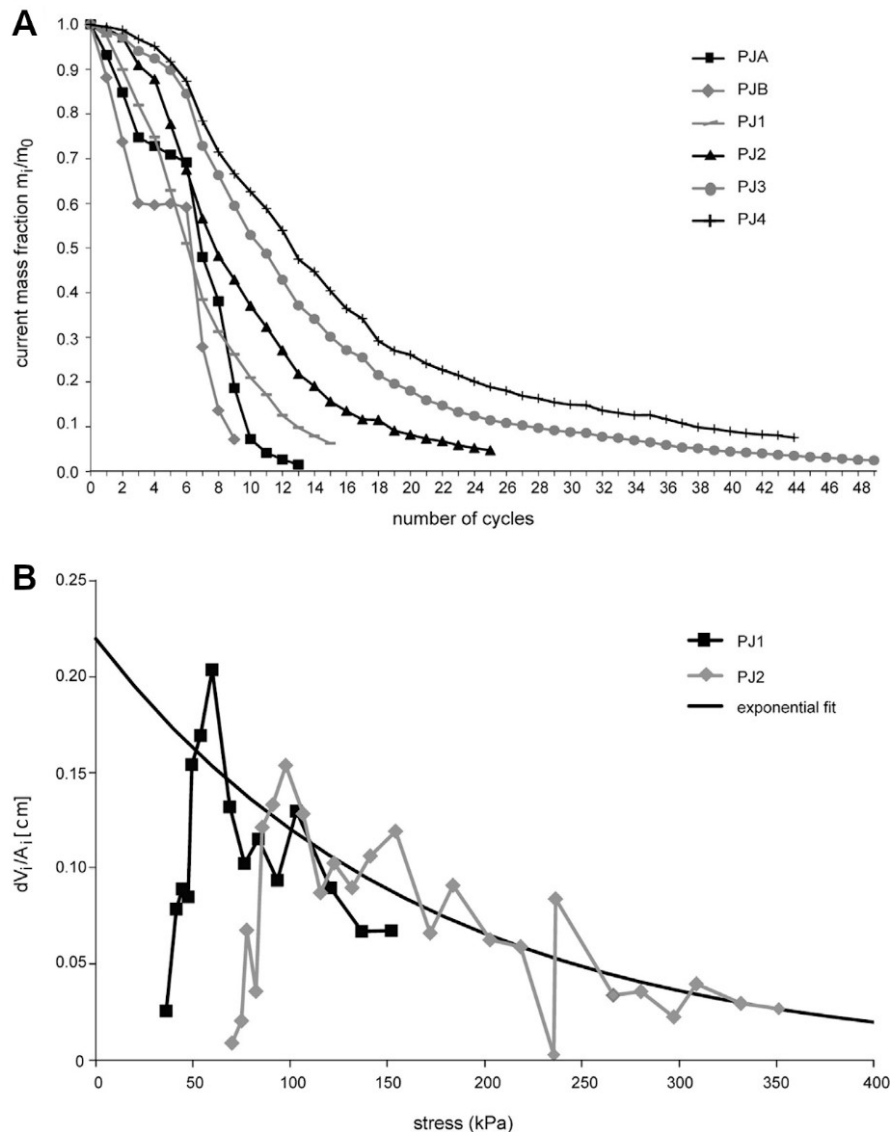


Fig. 4-1 Results of salt weathering experiments on the Umm Ishrin sandstone samples. Samples PJ1 to PJ4 are uniaxially compressed with increasing pressure, samples PJA and PJB are free: A) graph of weight loss during salt weathering cycles, B) graph showing decrease of sample radius per weathering cycle depending on increasing value of uniaxial compression of the sample. Adapted from Řihošek et al. (2016).

4.2. Construction of physical models and numerical analysis of stress

I combined the results of the physical simulation of erosion of landform formed from SLS by the sprinkling method with the results of numerical analysis of the stress distribution in these formations in order to verify the assumptions presented in Bruthans et al. (2014), namely that erosion occurs preferentially where the sandstone is not compressed by the action of gravity on the sandstone mass. Thus, if a physical model with irregular distribution of mechanical stress due to its shape is eroded, erosion will preferentially occur in the zones of lower stress, while the higher stressed zones will be more resistant to erosion. Only in the work of Bruthans et al. (2017) I did not constructed a physical model, since at the given overhang in Pilsen (Plzeň), which is formed by arkoses, the erosion rate on selected profiles was directly recorded.

4.2.1. Weathering and erosion of Nabataean rock architecture

To find out how the erosion of small-scale models of Nabataean rock architecture manifests and whether it is possible to simulate erosion processes affecting real historical sandstone monuments by this way, I carved two models of Nabataean structures in the sloping sandstone wall of the Střeleč quarry, which I subsequently eroded by sprinkling with water. The models took the form of a rock

dwelling with a window (Fig. 4-2) and a rock dwelling formed by two square cavities, each of which covered an area in the order of several square decimetres of sandstone surface. The obtained documentation of the decaying shape of physical models of Nabataean rock architecture sprinkled by water helped me to identify structures and shapes that are prone to erosion.

In general, it can be stated that after the application of sprinkling, the exposed edges of the models were first rounded relatively quickly. This applied in particular for the pillars of square cross-section, which changed to the form of columns of oval cross-section. The middle parts of the lintels and edges of rectangular and square openings (e.g. "windows" and "doors") were also rapidly eroded, so that the openings changed to oval shape. After the erosive removal of the columns, the accelerated erosion of those parts of the model that were supported by these columns occurred. The thickness of the columns supporting the parts ("ceiling") above them, reacted to the loss of mass in their overburden. After the rapid rounding of the pillars of square cross-section, their erosion temporarily slowed down and was not accelerated until the mass of the rock that was loading these pillars was eroded.

The evolving and final shapes of the models made of SLS correspond well to the observed shapes of rock architecture in Petra, Jordan. They are particularly close to the weathering patterns of rock dwellings and tombs, which have been exposed to progressive weathering and erosion due to their exposure at the rims of the massifs (Fig. 4-3 D and E; Rihosek et al., 2016).

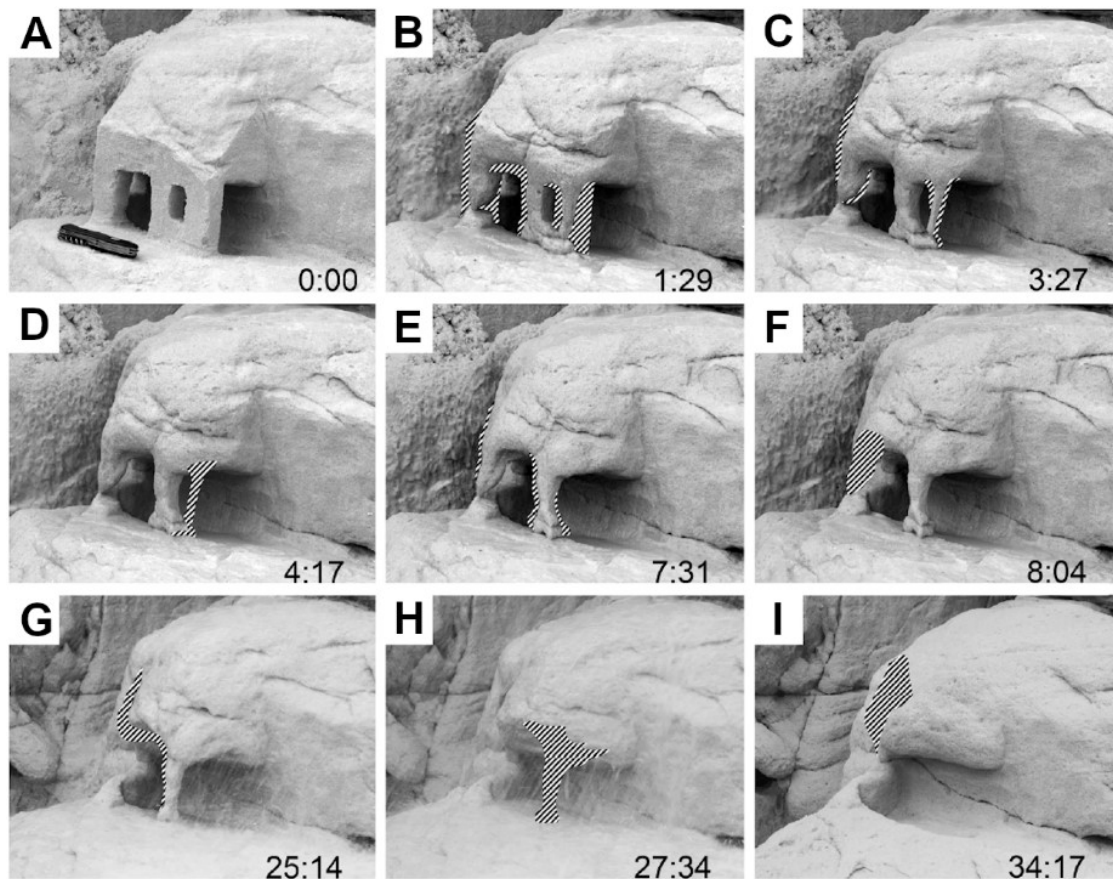


Fig. 4-2 Gradual development of the physical model of the rock dwelling with a window. I simulated erosion by sprinkling water using a submersible pump with a connected sprinkler. The photos show the sprinkling time. The hatch indicates the location of erosion. Adapted from Rihosek et al. (2016).

Numerical analyses provided the distribution of mechanical stress in the initial shapes of physical models of Nabataean rock architecture in Petra, Jordan (Fig. 4-3). The zones of increased maximum principal stress σ_1 were located at the concave corners and edges of the models, such as the corners of rectangular holes. On the contrary, the lowest values of σ_1 were observed in the upper parts of the models ("roof"), especially where convex corners and edges protruded, and in the spaces above the rectangular holes, where the "pressure shadow" had the shape of an arc (Fig. 4-3 A). The location of the most intensive erosion which lead to rounding of geometry was spatially closely correlated with

the lower values of σ_1 . The parts of the model representing square pillars which showed higher resistance to erosion after their rounding to the form of columns, had elevated values of σ_1 (Rihosek et al., 2016).

Numerical stress calculations in the initial shapes of the physical models have provided a prediction of parts of the physical models which will be removed in the first stages of the erosion process, and this prediction agreed well with the observed remnants of Nabataean architecture (Fig. 4-3 C, D and E). This can be assumed as a relatively robust proof of the correct identification of the factor that determines which parts of a given geometry will be eroded - the magnitude of the mechanical stress and its distribution. However, the vast majority of Nabataean monuments are affected by selective and cavernous weathering, which is also controlled by salt content, moisture accumulation, degree of sun exposure or lithological variability of the monument (Wedekind and Ruederich, 2013; Paradise, 2002, Heinrichs, 2008). The nature of the damage, which was simulated by water sprinkling the physical models, was observed only on the most exposed architectural objects, and it is not always possible to determine with certainty what their original shape was.

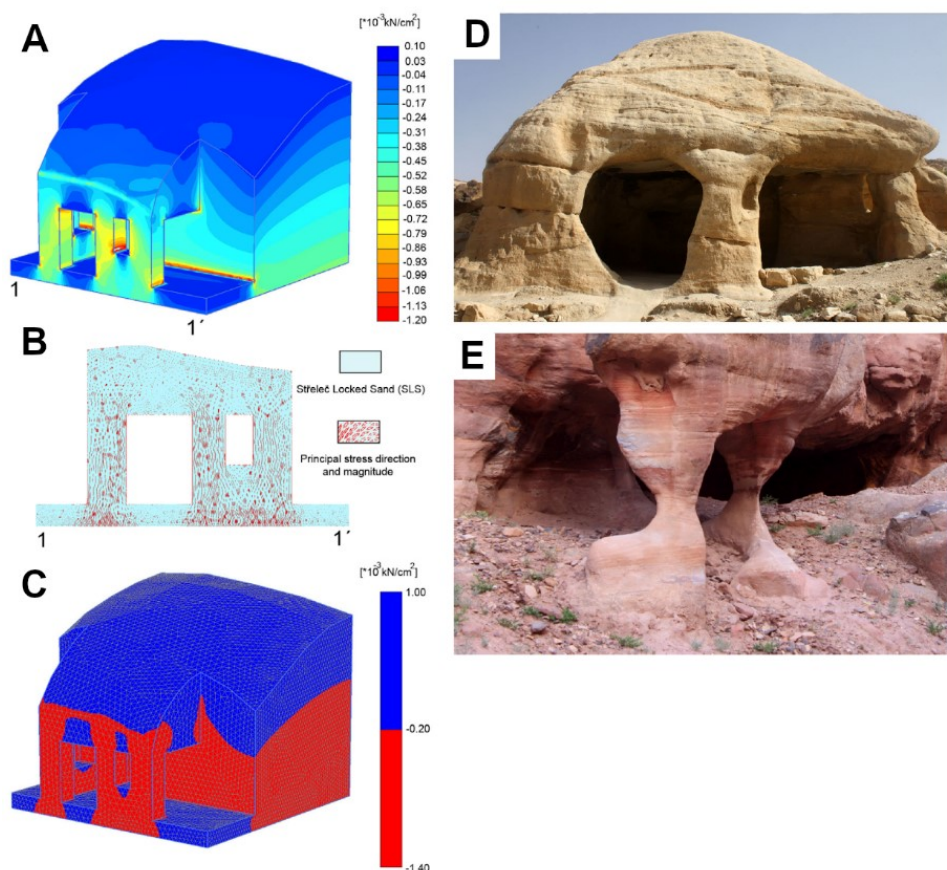


Fig. 4-3 Stress analysis in the physical model: A) distribution of the maximum principal stress σ_1 in the rock dwelling model with window; B) directions of σ_1 in the front wall of the rock dwelling model with window, C) identification of parts in the rock dwelling model in which erosion will occur (blue); positive values indicate tensile stress. Examples of advanced weathering of Nabataean architecture: D) rock dwelling or tomb, E) example of the appearance of Nabataean architecture severely damaged by weathering. Adapted from Řihošek et al. (2016).

4.2.2. Rapidly recessing wall of arcose overhang (Pilsen)

The Devil's Pulpit (Čertova kazatelna) overhang in carbonaceous arkoses is located in the Plzeň 7 - Radčice district. This overhang is significant by very rapid decay due to seeping water from the sewer. The fallout of a large amount of material occurs mainly in the winter months. Accelerated decay has been occurring here for approximately 35 years, and its rate has been monitored for approximately 27 months between December 2012 and March 2015. It has been found that the rate of wall retreat at this outcrop ranges from the first millimeters per year to 31 mm per year, the erosion rate is therefore

approximately 2000 times higher due to anthropogenic conditions compared to outcrops without anthropogenic influence. The rate can therefore be directly measured and compared with the stress distribution within the outcrop.

In contrast to the analyses of stress distribution in small-scale physical models, in the case of overhang in Pilsen an analysis of the distributed stress was applied to real landform. Such analysis serves to understand why certain parts of the sandstone outcrop decay faster than others. I used the method of photogrammetry to obtain a true geometry of a complicated overhang shape for the numerical analysis of stress distribution.

Cross sections of the numerical model of the stress distribution in the arkose overhang in Pilsen showed that the highest values of σ_1 (> 150 kPa) are located in the rear part of the overhang, while the lowest values of σ_1 corresponding even to tensile conditions (-10 to +50 kPa), were tracked in the most protruding part of the overhang. Relatively low wall retreat rates (approx. $4 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$) were measured in the rear part of the overhang, while the fastest erosion (up to $31 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$) was observed in the most protruding part, where the rock is affected by tension (Bruthans et al., 2016). Comparison of σ_1 distribution along profile in overhang and in the wall next to the overhang and measured erosion rate on the surface of both profiles is depicted on Fig. 4-4.

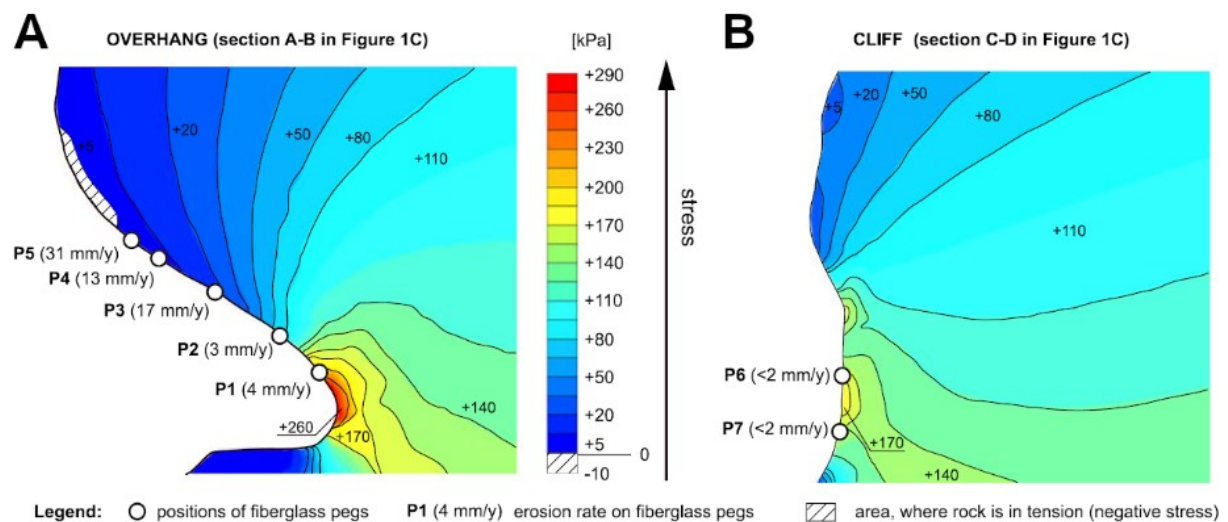


Fig. 4-4 Comparison of maximum principal stress σ_1 distribution along profile in the overhang (A) and in the wall next to the overhang (B) and measured rates of wall recess on the surfaces of the overhang and the wall. Compressive stress corresponds to positive stress values, tension corresponds to negative stress values. Adapted from Bruthans et al. (2017).

4.2.3. Origin and evolution of sandstone arcades

In the work focused on the description of a new form of cavernous weathering of sandstone walls - sandstone arcades - I created physical models in the Střeleč quarry simulating the phenomenon to confirm its structural link to planar discontinuities and stress influence, which controls the shape and size of the individual arcade caverns.

In the first version of the simulation of the formation of sandstone arcades, I sprinkled a vertical wall with the presence of natural sub-horizontal layering. The result was rapid erosion of the wall surface, with several tens of crescent-shaped depressions along the interlayer surfaces within minutes of sprinkling. After that, the erosion practically stopped, although the sprinkling continued. Such observation suggests that the formation of sandstone arcades can be very rapid, but the resulting shapes can persist for a considerable time.

In other versions of the simulation, an artificially created continuous and intermittent notch (Fig. 4-5) in the rock wall was sprinkled with water. The result was a group of aligned depressions in place of the original notches. These depressions were separated from each other by half-columns. At first, the erosion producing arcades was quite rapid, after which it slowed down. Sprinkling erosion mainly affected the parts of the massif with the stress shadow (parts of the massif that did not transmit loads) and those parts of the massif where stress was continuously concentrated during surface erosion were

preserved (Filippi et al., 2018). The interlayer surface forms a natural mechanical interruption of the homogeneous massif and at its intersection with the vertical rock wall there is a redistribution of stress.

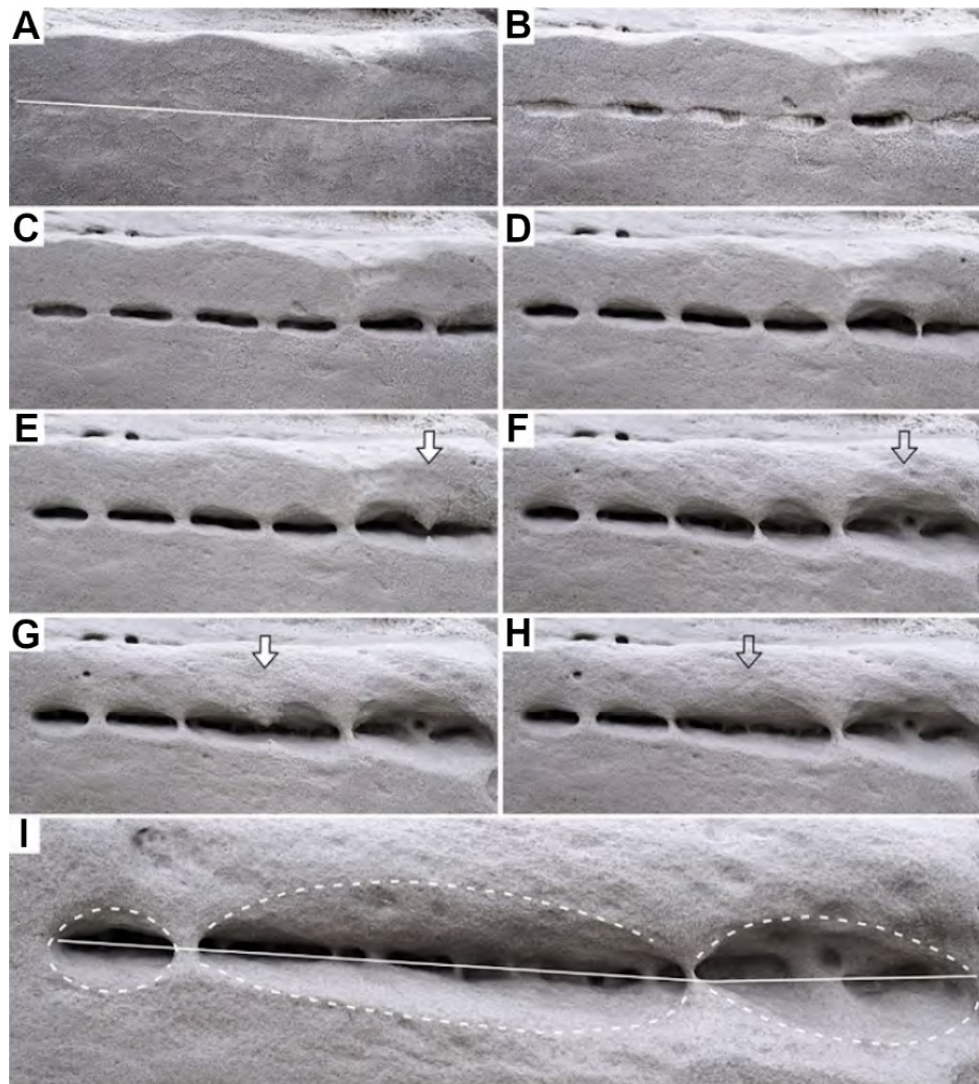


Fig. 4-5 Physical model of arcades and its gradual development over time at the outcrop with an intermittent notch in the Střeleč quarry. I simulated the erosion of the physical model by sprinkling it with water. Adapted from Filippi et al. (2018).

Numerical analyses of stress distribution in several types of sandstone arcades showed the location of increased σ_1 and decreased σ_1 . While increased σ_1 occurred in the middle parts of the half-columns of the rock arcades and in their back walls, the lowest σ_1 was observed in the form of protruding arcs of "pressure shadows" above and below the notch in the intermittent horizontal discontinuity model (Fig. 4-6 A) and above and below horizontally elongated caverns. Exceptions were the model with vertically elongated caverns, where the extent of the "pressure shadow" above and below the depression was considerably limited (Fig. 4-6 B), and the model of horizontally elongated caverns with flat bottoms, where the "pressure shadow" above the depression was significantly smaller than the pressure shadow developed below the flat bottom. Thus, the analysis of stress distribution on the model with narrow notch and on several types of arcades (caverns) have shown that the presence of horizontal discontinuity leads to such a stress redistribution that promotes the formation of relatively resistant half-columns. The wasting of material is situated above and below discontinuities. Such weathering thus produces caverns which are aligned along given discontinuity. The most stable arcade type are arcades with vertically extended caverns (Filippi et al., 2018).

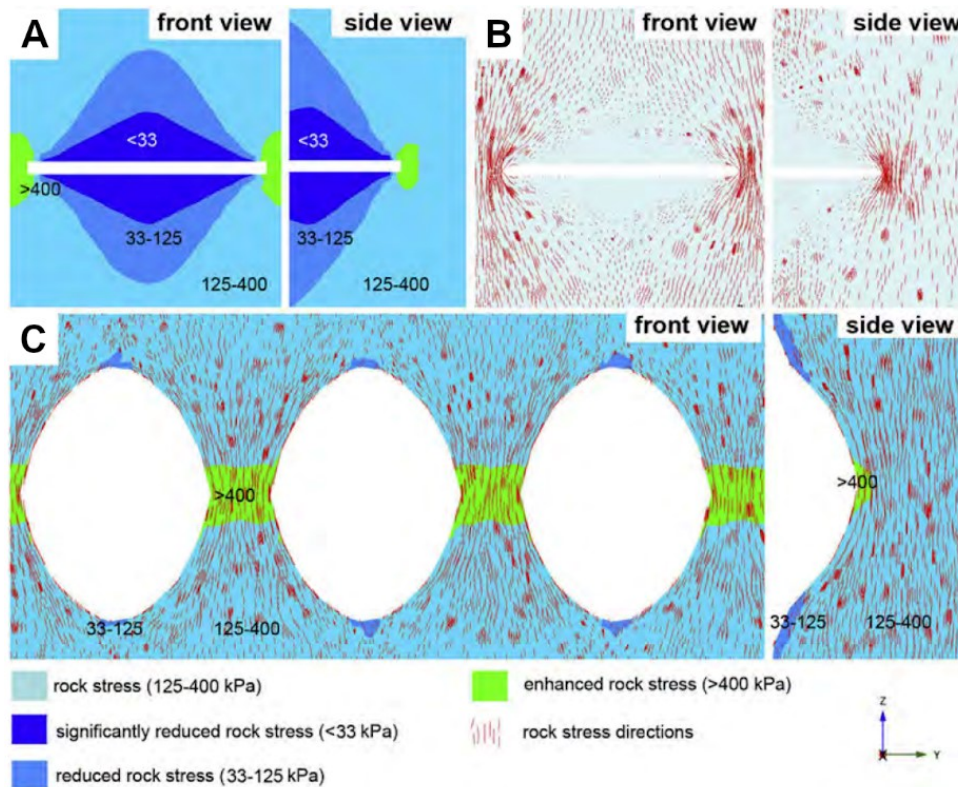


Fig. 4-6 Numerical analysis of stress distribution around arcades: A) magnitude of maximum principal stress σ_1 around horizontal notch, B) directions of σ_1 round horizontal notch, C) magnitude and directions of σ_1 around vertically elongated arcades. Adapted from Filippi et al. (2018).

In addition to the numerical analysis of the stress distribution, I also performed a numerical simulation of the arcade cavern formation, which confirmed the assumptions of the propagation of the original horizontal notch upwards and downwards, where the vaults were formed. This is an evolutionary model, because after removing all unloaded cubic elements from the surface of the model, the stress in the whole model is recalculated. As a result, the stress distribution between the individual steps changes, as can be seen from the cross-sections of the model in the individual steps. The removal of elements in the model stopped spontaneously as soon as the value of σ_1 reached the prescribed level in all exposed elements (after ten steps). Initially, the highest value of σ_1 was concentrated in the rear wall of the notch and the lowest values of σ_1 (<2 kPa) were situated in the zones above and below the notch (this is the same result as in the numerical calculation of the distribution in the physical model with horizontal notch). The result of the last step of the calculation was a cavern developed above and below the notch – thus zones of reduced values of σ_1 were no longer present (Fig. 4-7; Filippi et al., 2018).

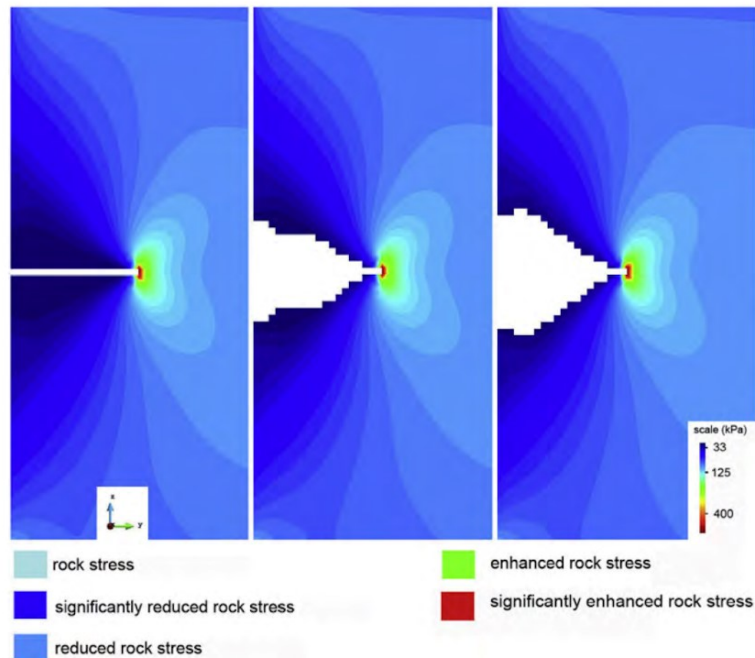


Fig. 4-7 Numerical simulation of arcade development showing the removal of surface elements for which the maximum principal stress σ_1 is lower than the critical stress. After each step, the stress is recalculated. Adapted from Filippi et al. (2018).

Numerical simulations of stress-controlled erosion were the first published by Ostanin et al. (2017). These simulations, which used the principle of negative feedback between stress and erosion (Bruthans et al., 2014), focused mainly on the formation of rock arches and rock towers. A numerical simulation published in (Filippi et al., 2018) explained the formation of a newly recognized form on vertical sandstone walls. Advanced software for geotechnical analysis was used for the simulation. Numerical simulation of sandstone arcades and columns in Safonov et al. (2020) improved previous simulations by prescribing a different level of critical stress for horizontal discontinuity (discontinuity is thus a thin and erodible planar structure in such a model), thus avoiding defining discontinuity as a void, but rather as a material of contrasting mechanical properties caused by for example a different lithology.

4.2.4. Formation and development of rock arches

In order to observe the formation and development of the rock arch by erosion and weathering, I used the method of sprinkling the initial shape modeled from sandstone in the Střeleč quarry with water. The initial shape was in the form of a narrow block (e.g. fin) of SLS with a horizontal incision that intersected this block transversely. By repeated sprinkling with water using a watering can with sprinkler, which caused erosion by falling drops and flowing water, I created a perfect miniature of the rock arch. The shape of this miniature corresponded to the well-developed rock arches that can be found in nature (Fig. 4-8).

The development of the arch was captured in 95 erosion steps (1 erosion step = 2 emptied watering can volumes). Based on the analysis of photographic documentation of shape changes, three developmental stages of the rock gate were determined - initial stage, mature stage and senile stage. During the initial stage lasting 40 erosion steps, the mass on the left and right of the future arch was eroded. The lintel of the future arch was also thinned – it is the place where the thinner arch was subsequently developed. The mature stage, which lasted 45 erosion steps, was characterized by a slowing down of erosion of arch (lintel), while erosion affected all surfaces of the model evenly. In the senile stage, which lasted 10 erosion steps, the erosion of the arch accelerated, the arch was rapidly thinned until it collapsed. The cross-sections constructed on the basis of photogrammetric 3D models showed that the arch was significantly eroded from its front side and the mass of the arch shifted towards the back of the model during erosion (Fig. 4-9). The erosion of the arch was controlled by the thickness of sandstone buttresses at the base of the arch. As a response of buttresses erosion, the

erosion also propagated upwards along the arch. While the arch itself eroded at a relatively constant rate during sprinkling and the rate increased only in the last 10 steps, the area around the arch was eroded faster, especially at the beginning of sprinkling and gradually slowed down (Řihošek et al., 2018).

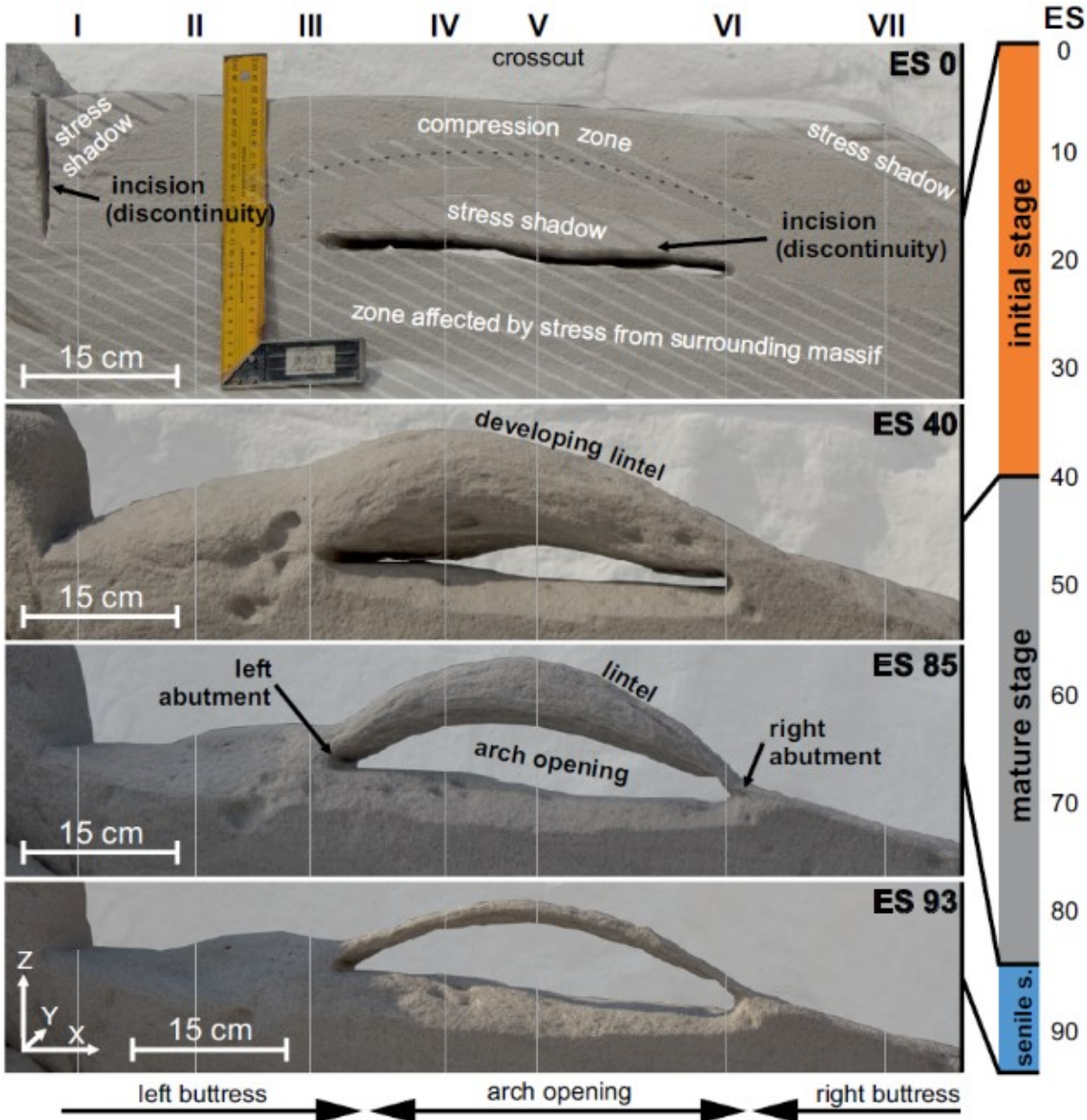


Fig. 4-8 Gradual development of the perfect rock arch on the physical model from the front view. ES - erosion steps. Modified field Řihošek et al. (2018).

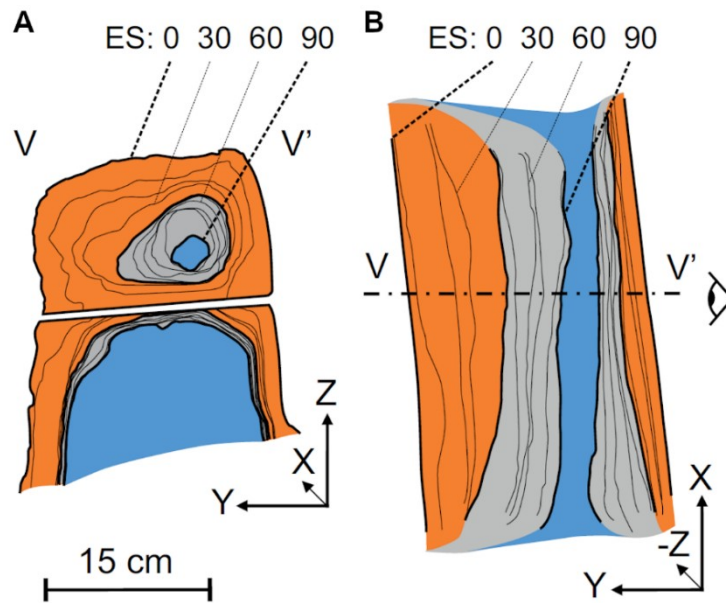


Fig. 4-9 Gradual development of a rock arch on the physical model in cross-section (A) and from the top view (B). The mass eroded in the initial stage is shown in orange, the mass eroded in the mature stage is shown in gray, and the mass eroded in the senile stage is shown in gray. ES - erosion steps. Adapted from Řihošek et al. (2018).

I created numerical models analyzing stress distribution for the initial shape and final shape (before the collapse of the arch) of the physical model of arch from the SLS and for the Landscape Arch in Arches National Park in the USA (Fig. 4-10). I used photogrammetry to create 3D model of both geometries. The acquired vertical longitudinal sections showed the distribution of the values of σ_1 in these objects and enabled their mutual comparison. In the stress distribution analysis in the initial shape of the physical model, the highest values of σ_1 were concentrated in the corners of the horizontal incision and increased values of σ_1 created an arc above this incision. On the contrary, the lowest values of σ_1 were situated between the incision and the zone of increased values of σ_1 forming the arc. Here, the stress reached negative values, indicating tensile conditions (Fig. 4-10 A).

In the numerical analysis of stress distribution of the final shape of the physical model, which was formed by an arch of sandstone, the increased values of σ_1 in the arch lintel prevailed. Spatial stress distribution in this model was identical to the stress distribution in the Landscape Arch model (Fig. 4-10 B and C). The highest compressive stress levels and stress gradients were situated, except in places where the arch buttresses, in the thinnest parts of both arches. Both models differed in the magnitude of σ_1 (for Landscape Arch its value is 333 times higher), which mainly reflects the significantly different size of both objects (the span of the Střeleč sandstone arch was 0.35 m and the span of the Landscape Arch is 93 m). Another difference is the less regular stress distribution in the Landscape Arch model, which results from its less regular geometry. The northwest wing of the Landscape Arch is thinned (this is the site of the recent collapse of sandstone blocks) and there is the highest value of σ_1 , while in the thicker southeast wing σ_1 is lower (Řihošek et al., 2018).

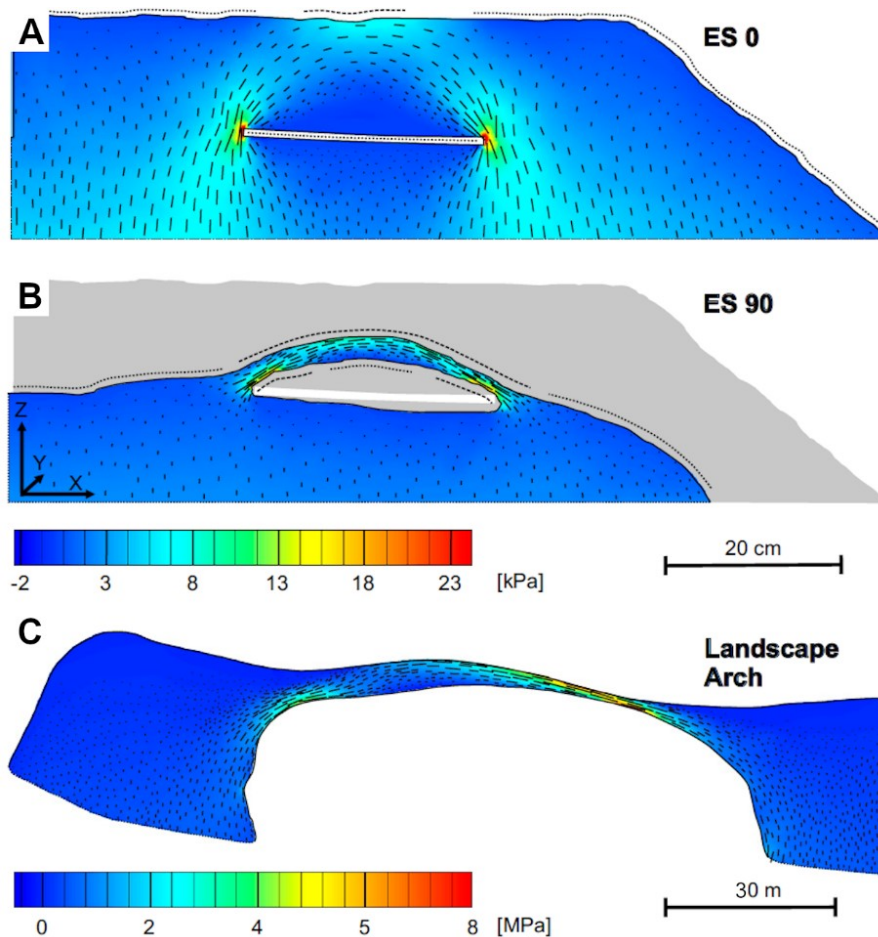


Fig. 4-10 Distribution of the maximum principal stress σ_1 and its directions: A) initial shape of the rock arch model, B) shape of the rock arch model just before the collapse, C) Landscape Arch, USA. Adapted from Řihošek et al. (2018).

Erosion of the arch was controlled by the thickness of the arch buttresses. The upward migration of erosion agree with the observation of erosion propagation along the arch cracks upwards due to tensile forces dominating the arch, which was observed in the Navajo sandstones in Zion National Park, USA (Robinson, 1970). The experiment proved that the material whose erosion is controlled by the mechanical stress field, the existence of a horizontal or inclined discontinuity and a thin block of exposed rock which this discontinuity is transecting is sufficient for the formation of the arch. According to Cruikshank and Aydin (1994), the abundance of rock arches in Arches National Park in the USA is associated with the occurrence of vertical parallel fissures that promote development of narrow ridges and fissure zones that intersect these ridges horizontally. Description of the development of our most famous rock arch – Pravčická brána – according to Vařilová et al. (2015) and Vařilová (2016) broadly correspond to the observed development of the physical model. The origin of the Pravčická brána arch is explained by the deepening of the overhangs developed on conglomerate horizon on the opposite walls of the narrow rib of sandstone. The processes of overhangs deepening are selective erosion and weathering. After the overhangs were connected, the arch opening was gradually widened along the arcuate cracks due to the distribution of mechanical stress in the arch. The identified developmental stages of the physical model also roughly correspond to the developmental stages of the Pravčická gate according to Vařilová et al. (2015; classification according to The Natural Arch and Bridge Society). The formation of a small-scale sandstone arch in a simple way by simulating the erosion process by sprinkling the physical model from SLS proves the usefulness of this material for physical modeling of sandstone landforms.

I demonstrated that thinning of the arch is affected by previously described effect of negative feedback of stress and erosion (Bruthans et al., 2014) – the highest values of σ_1 was concentrated in to the center

of the arch during course of erosion. The arch remains intact during erosion while parts of the surface that have lower values of σ_1 are wasted.

A deeper understanding of the process of formation and development of rock arches would be helped by monitoring the formation and destruction of arches in lithologies that are easily eroded with properties similar to SLS. A good example is the rapid formation, development and destruction of the La Damme Blanche rock arch near the town of Dieulefit in France, where the whole process of formation and destruction in clayey sandstones took about 5 years. Future research could also focus on the properties of sandstones in which rock arches are common. The crucial monitored factor would be the speed and nature of decay of surface induced by well described weathering or erosional process while the stress distribution of given landform is known. Numerical stress analysis has proven to be a suitable method for evaluating the stability and degree of development of a rock arch. The presence of increased gradients and reduced stresses in the arch may indicate locations of past or potential future rock falls or accelerated disintegration of surface.

In Ostanin et al. (2017) a numerical simulations of development of rock arch were presented. These simulation adopted the effect of negative feedback between stress and erosion (Bruthans et al., 2014). The simulations used the same kind of linearly elastic isotropic material (constitutional) model, as I used for the stress calculation in Landscape Arch, and a critical stress value above which erosion no longer occurs. The results of Rihosek et al. (2016), however, show that the decay rate decreases continuously with increasing stress according to a certain function and that there is no single value above which erosion no longer occurs. In addition, at high stresses, the structure of the sandstone is starting to be damaged and as the stress increases further, the strength envelope of the material is exceeded, and fracture occurs. Thus the numerical simulations of stress-controlled erosion so far lack the ability to accurately account for the effect of the stress and the rate of erosion, and the behavior of a material when its strength envelope is exceeded. These areas can therefore be described as promising for future research.

5. Conclusions

The influence of mechanical stress on decay rate can also manifest in decay of architectural monuments carved into sandstone. Representation of the stress field can help identify parts of such monument or landform that are threatened by higher rates of decay. These are the exposed parts that have low levels of compressive stress (even tension) compared to other parts of the geometry. However, those parts in which the stress is extremely increased to such an extent that the material is so stressed that fractures occur, are also endangered (i.e. in some places of the arches of very narrow rock arches).

There is a mathematical relation between the magnitude of the uniaxial compression of a sandstone sample and its rate of salt weathering in the form of a negative exponential function. It can be expected that such a relation of stress and rate of decay of sandstones may also be found for processes of weathering or erosion, which are caused by a factor other than salt crystallization - for example, frost weathering, piping or sapping.

The method of weathering/erosional simulation using water sprinkling was tested on physical models of Nabataean architecture, sandstone arcades and sandstone rock gates. The assumptions leading to their origin were verified for the sandstone arcades and rock arches. Sandstone arcades are formed due to the presence of mechanical inhomogeneity in sandstone wall. It seems that formation of sandstone arcades can be relatively rapid, after which their surface weathering/erosion can slow down and these shapes can be stabilized by the resulting redistribution of stress. The minimum conditions of formation were defined for sandstone arches – i.e. the existence of a narrow block of rock with a horizontal or inclined discontinuity or weakened layer. Such conditions result in an arc of higher compressive stresses emerging inside the massif, which prevents erosion, and tensile shadows in which the erosion is primarily localized. Thanks to the simulation of erosion, three stages of rock arch development were documented. These stages differ in the location and speed of weathering or erosion - the initial stage, the mature stage and the senile stage.

A 3D numerical model using the principles of stress-controlled erosion was used to simulate the formation and development of sandstone forms (sandstone arcades). This simulation led to a stable final shape. The shape was controlled by the stress distribution (maximum principal stress σ_1) and the mechanical properties of the material. The most important of material properties was the so-called critical stress for the given process and material. Exposed parts of 3D model (elements), whose σ_1 was lower than critical stress, were removed. On the final shape all exposed elements met the condition that their σ_1 was higher than the critical stress.

Použitá literatura / References

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.

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

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.

Carlsson, A., Olsson, T. (1982): Rock bursting phenomena in a superficial rock mass in southern central Sweden. *Rock Mechanics*, 15, 99–110.

Community, B. O. (2018): *Blender – a 3D modelling and rendering package*. Stichting Blender Foundation, Amsterdam. Dostupné z: <http://www.blender.org>

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.

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.

Dusseault, M. B., Morgenstern, N. R. (1979): Locked sands. *Quarterly Journal of Engineering Geology* 12, 117–131.

EN 12370 (1999): Natural stone test methods – Determination of resistance to salt crystallization. European standard EN12370:1999, European Committee for Standardization.

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.

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.

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.

Huinink, H. P., Pel, L., Kopinga, K. (2004): Simulating the growth of tafoni. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 1225–1233.

- 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.
- 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.
- McGreevy J. P., Smith B. J. (1984): The possible role of clay minerals in salt weathering, *Catena* 11(1), 169–175.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.**
- Řihošek, J., Slavík, M., Bruthans, J., Filippi, M. (2018): Evolution of natural rock arches: A realistic small-scale experiment. *Geology* 47(1), 71–74.**
- 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. (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.

- Roddeман, D. (2017): Tochnog professional. Finite element application technology. Dostupné z: 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.
- Safonov, A., Filippi, M., Mašín, D., Bruthans, J. (2020): Numerical modelling of arcades and rock pillars. *Geomorphology* 365, 107260.
- Schweigstilllová 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.
- 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.
- 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.
- 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., 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.
- 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., 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.
- 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.

Životopis / Curriculum vitae

Kontaktní údaje / Contact informations:

Jméno, Příjmení / Name, Surname: Jaroslav Řihošek
Adresa / Address: Závist 1173, Praha 5 – Zbraslav,
156 00, Česká republika
Telefonní číslo / Telephone: +420 777 786 738
E-mail: jaroslav.rihosek@gmail.com

Pracovní zkušenosti / Work experience:

Since 2-2017 / Od 2-2017 **Česká Geologická Služba / Czech Geological Survey**
vědecký pracovník, hydrogeolog / researcher, hydrogeologist

05/2012 – 12/2013 **Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v.v.i. /
Institute of Theoretical and Applied Mechanics AS CR,
v.v.i.**
částečný úvazek jako odborný pracovník výzkumu a vývoje /
part-time as a research and development specialist

Vzdělání / Education:

Since 9-2014 / Od 9-2014 **Ph.D. student na ÚHIGUG PřF UK v Praze / Ph.D. student at
Department of Hydrogeology, Engineering Geology and
Applied Geophysics, Faculty of Science, Charles University in
Prague**
Disertační práce / Doctoral thesis: Vliv napěťového pole a
nehomogenit na zvětrání a formy v pískovcích / Influence of stress
field and inhomogeneities on weathering and landforms in
sandstones

9-2009 – 6-2014 **Mgr. z petrologie, PřF UK v Praze / M.Sc. in petrology,
Faculty of Science, Charles University in Prague**
Diplomová práce / Master's thesis: Petrologie a geochemie
devonských vulkanitů v jižní části šternbersko-hornobenešovského
pásma / Petrology and geochemistry of Devonian volcanic rocks in
the southern part of the Šternberk-Horní Benešov Belt

9/2006-9/2009 **Bc. z geologie, PřF UK v Praze / B.Sc. in geology, Faculty of
Science, Charles University in Prague**
Bakalářská práce / Bachelor's thesis: Petrologická a
geochemická charakteristika bimodálních vulkanických sekvencí a
jejich geodynamická interpretace / Petrologic and geochemical
characteristic of bimodal volcanic suites and their geodynamic

interpretation

Výzkumné aktivity / Research activities:

Mé projekty / My Projects:

GAUK 386815 (2015-2018): Vliv napětového pole a přírodních nehomogenit na erozi pískovce v čase / Role of stress field and inhomogenities on sandstone erosion during time

Účast na konferencích / Conference attendances:

10.–13.3.2015, Role of Fieldwork in Geomorphology - Annual Conference of the Czech Association of Geomorphologists, Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni, poster: Effects of stress field on weathering of sandstone forms and monuments in Petra archaeological site. Řihošek, J., Bruthans, J

16. –19.9.2015, 13th International Symposium on Pseudokarst, Kunčice pod Ondřejníkem, Czech republic, poster: Sandstone landforms: Effects of loading stress on spatial distribution and rates of erosion. Bruthans, J., Řihošek, J.

17.-22.4 April, 2016, EGU General Assembly 2016, Vienna, Austria, poster: Decay of sandstone monuments in Petra (Jordan): Gravity-induced stress as a stabilizing factor. Řihošek J., Bruthans J., Mašín D., Filippi M., Schweigstillová J.

13.-17.6.2016, The 8th International Siberian Early Career GeoScientists Conference, Novosibirsk, Russia, poster: An Effect of gravity-induced stress on decay rate of sandstone monuments in Petra, Jordan. Řihošek J., Bruthans J., Masin D., Filippi M., Carling G. T., Schweigstillova J

7.-12.4.2019 EGU General Assembly, Vienna, Austria, oral: The life story of a natural arch. Řihošek J., Slavík M., Bruthans J., Filippi M.

23.-27.9.2018 Central European Conference on Geomorphology and Quaternary Sciences, Giessen, Germany, poster: Parallelization of numerical and physical modeling of erosion. Řihošek J., Mašín D., Bruthans J.

Seznam publikací / List of publications:

Bruthans, J., Soukup, J., Vaculíková, J., Filippi, M., Schweigstillova, J., Mayo, A., Mašín, D., Kletetschka, G., Řihošek, J. (2014): Sandstone landforms shaped by negative feedback between stress and erosion. *Nature Geoscience* 7, 597-601.

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.*

Slavík, M., Bruthans, J., Filippi, M., Schweigstillova, J., Falteisek, L., Řihošek, J. (2017) Biologically-initiated rock crust on sandstone: Mechanical and hydraulic properties and resistance to erosion. *Geomorphology* 278, 298-313.

Bruthans, J., Řihošek, J. (2017): Tlakově stabilizované písky v České republice a jejich zvláštní geomechanické vlastnosti. *Zprávy o geologických výzkumech* 50, 247–253.

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.*

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.*

Filippi M., Slavík M., Bruthans J., Weiss T., Řihošek J. (2021): Accelerated disintegration of in situ disconnected portions of sandstone outcrops. *Geomorphology* 391, 107897.

* publikace použité v disertační práci