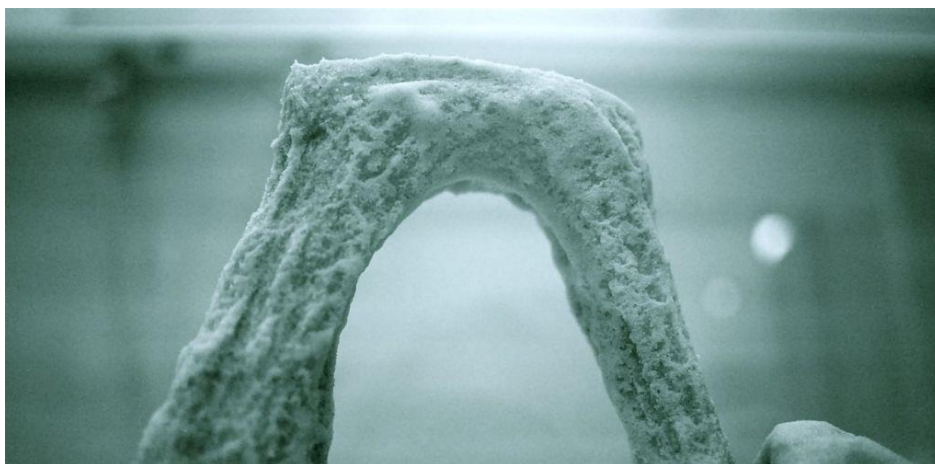


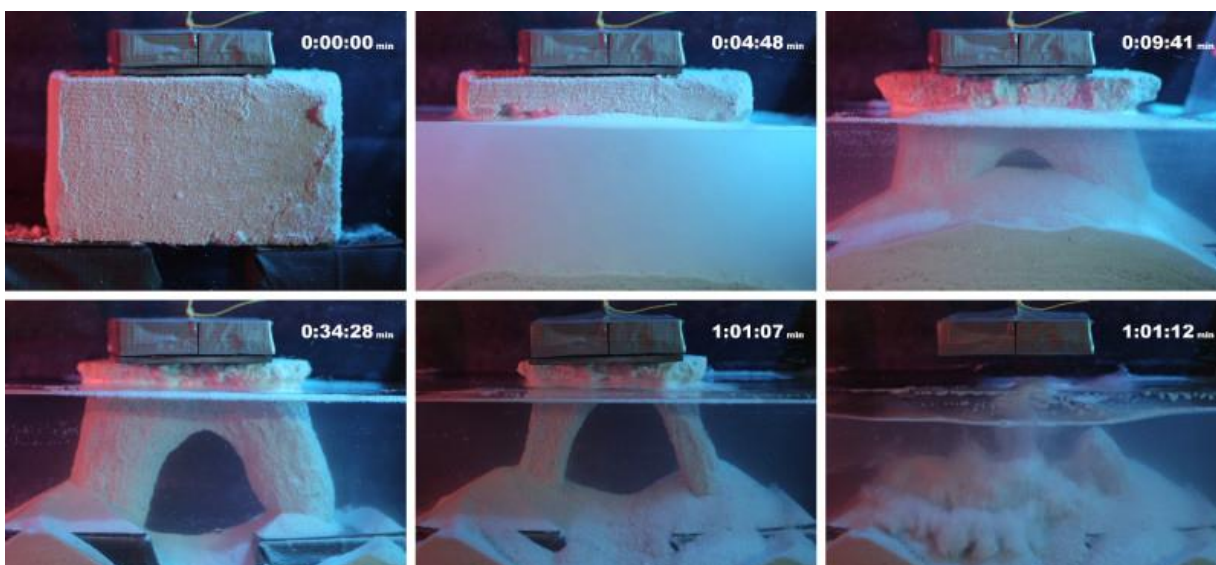
vesmír



Celých 150 let na své odhalení čekalo tajemství, které marně luštily generace geologů a

geomorfologů – jaká síla dala vzniknout majestátní nádheře skalních pískovcových měst? Postup, který příroda úspěšně používá na mnoha místech světa, poprvé uspokojivě vysvětlují až geologové Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy, Geologického ústavu Akademie věd, Ústavu struktury a mechaniky hornin Akademie věd a americké Brigham Young University v Utahu.

Pískovce tvoří v mnoha oblastech světa zvláštní krajinu, plnou skalních útesů, věží a bohatou na převisy, sloupy a skalní brány a různé dutiny. Všechny tyto tvary spojuje vnitřní krása a elegance. Základem tvarů jsou ladné křivky, oblouky a vykroužení. Jako by erozi při své práci vedlo mocné kouzlo. Jako by někdo inteligentní tyto tvary promyslel a naplánoval. Některé skalní brány jsou tak dlouhé a přitom tak tenké, že se podivujeme, jak je možné že ještě stojí ([Landscape Arch](#), USA). Jak to, že eroze postupovala tak, že zde zbyly jen nosné prvky a zmizel veškerý zbytečný materiál? Skalní brány často trčí ze skalního masivu, jako by byly z pevnějšího materiálu než okolní pískovec (Delicate Arch a Rainbow Bridge, USA ale i Pravčická brána). Co jim dává větší odolnost vůči povětrnostním vlivům, že zůstávají jako poslední zbytek původní skály i dlouho poté, co je široké okolí smeteno erozí do moře? Co chrání mohutné věže a sloupy před erozí z boků? Vždyť v některých skalních městech v Česku je pískovec tak měkký, že ho lze rozdrobit na písek nehtem a odpadlé kusy skal se rychle rozpadají, až z nich zbude jen hrst sypkých zrněk.



Sekvence obrázků dokumentující „výrobu“ experimentální brány. Je vytvořena položením pískovcového kvádrů ze Střelče na dvě podložky, položením závaží na jeho svrchní plochu a následným zaplavením kvádrů vodou.

Postupné nadlehčování zátěže v průběhu experimentu má za následek zužování nosných ramen brány. Po úplném odstranění zátěže pak v tomto případě došlo k destabilizaci brány a jejímu okamžitému rozpadu na kupičku písku. Časové údaje ukazují délku experimentu. (Foto: Marek Janáč)

Pro svou tajemnou krásu se staly pískovcové krajiny kulisou nesčetných filmů. Vědci však již půl druhého století tápou. Žádná z teorií nedokázala vznik těchto ladných tvarů plně vysvětlit. Dokonce ani experimentálně se tyto tvary nikdy nepodařilo vytvořit. Jeden z vědců zabývajících se pískovcem (P. A. Warke) jej nazval záhadným kamenem (enigmatic stone), protože často reaguje při pokusech jinak, než bychom čekali.

Jde o nesmírně jednoduchý, přitom dokonalý a velmi mocný mechanismus.

A tak se celé týmy badatelů intenzivně snažily posunout hranici poznání s nadějí, že pískovec své tajemství pustí až se na něj zaměří nejmodernějšími mikroskopy. Zkoumali krystalizaci solí, mrznutí vody, dopad dešťových kapek i tekoucí vody, tedy děje působící v nepatrném prostoru mezi zrny. Jsou to však jevy bezduché, tak jak mohou vytvořit skalní bránu s obloukem padesát metrů dlouhým a dokonale vykrouženým? Co je koordinuje? Ani léta dřiny na tyto otázky nepřinášela jednoznačně platnou odpověď. Až do doby, kdy se výše zmíněný tým vědců začal zabývat kamenem jednoho zdánlivě obyčejného českého pískovcového lomu.



Bude jim fungovat to, co nikomu jinému na světě? Jan Soukup a Jiří Bruthans sledují v laboratoři s napětím výsledek jedné ze zkoušek. (Foto: Marek Janáč)

V Českém ráji, tři kilometry jižně od hradu Trosky se nachází pískovna **Střeleč**. Zdejší kámen je stejný jako ten, který v okolí tvoří věže skalních měst. Některé partie lomového pískovce ale mají podivné vlastnosti. Je tak měkký, že ho lze brousit bříškem prstu, ale přitom tak pevný, že jeho krychle o straně 10 cm unese hmotnost základní verze Škody Superb, tedy 1,5 tuny. Když tutéž kostku pískovce ponoříte do vody, okamžitě se rozpadne na hromádku písku, ale pokud na ni před zaplavením položíte závaží nebo kostku stlačíte ve svěráku, úplnému rozpadnutí zabráníte.

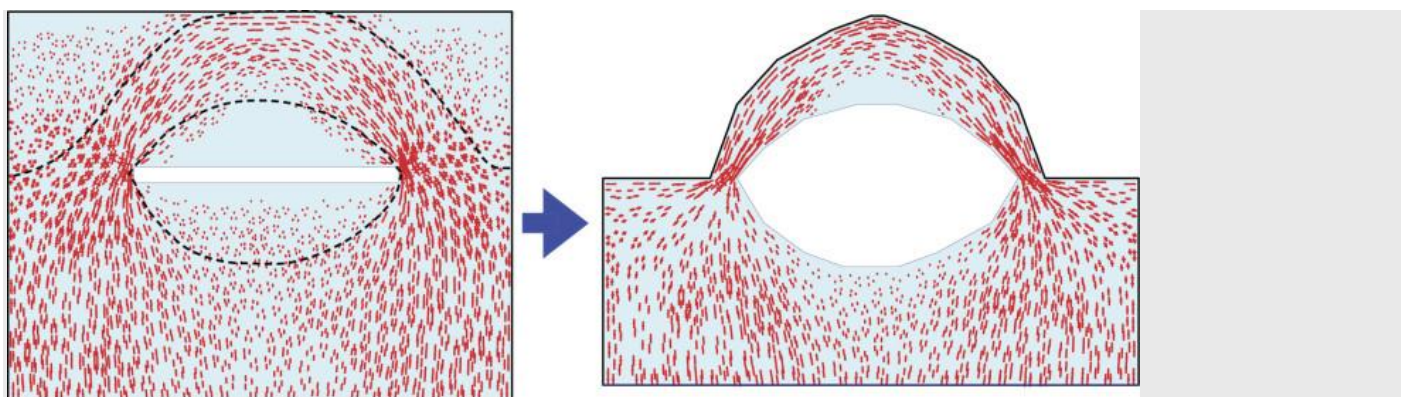
Vysvětlení zvláštních vlastností je skryto ve struktuře tohoto pískovce. Neobsahuje totiž žádný tmel, jako pevnější pískovec. Materiál drží pohromadě díky zrnům, která do sebe zapadají téměř jako zámková dlažba novodobých chodníků (odborně se tento pískovec nazývá zalokovaný/uzamčený písek). Takto vytvořená vazba mezi zrny způsobuje, že když pískovec stlačíme, zaklíněná zrna přenesou i velkou váhu. Uvolnit je pak z pískovce bývá mnohem těžší. Kámen se tak chová podobně jako suchá zeď z volně položených cihel nespojených maltou. Cihlu z vrchní části takové zdi snadno vyjmete, ale ze spodní části to již nejde, tlak nadložních cihel zvyšuje tření nad sílu, kterou může vyvinout člověk. Právě tlak je tedy tím co drží střelečský pískovec pohromadě! Stejný tlak, který dobře známe a využíváme při nošení knih. Pokud několik knih stlačíme k sobě rukama z boků, můžeme je přenést z police do police bez nebezpečí, že nám vypadnou. Jakmile bychom ale tlak rukou uvolnili, knihy se sesypou.

A právě díky této vlastnosti můžeme z podivného pískovce pouhým zaplavením vodou vyrobit skalní brány, převisy, sloupy i hříbovitě skalní útvary. Voda vstupující do pískovce je přitahována na stěny zrn (kapilární sání). Jak se voda tlačí díky těmto silám do pórů, stlačuje v nich vzduch, jehož tlak následně roztrhá zaklíněnou strukturu pískovce. Z původně pevného kamene se stává obyčejný sypký písek. To se ale děje jen když pískovec není dostatečně stlačený. Pokud jej zatížíme, vzduch stlačený vodou již takto zpevněnou strukturu pískovce roztrhat nedokáže a kámen i pod vodou zůstává stát. Přesněji řečeno: rozpadají se jen ty části pískovce, ve kterých je tlak příliš malý. Mnohokrát opakované pokusy ukázaly, že ve vodě záhy mizí ostré hrany, výčnělky a pokusný kvádr se rychle mění na přírodě blízké tvary.

Experimenty názorně ukazují, jak je pro vznik pískovcových věží a bran důležité zatížení horniny. Bez tohoto zatížení by se zkoumaný pískovec (z lomu Střeleč) okamžitě sesul na hromádku písku. Je to patrné z průběhu experimentu, kdy vědci postupně závaží na horní ploše původního kvádrů odlehčují. Po odlehčení destrukce vždy pokračuje až do té chvíle, kdy dojde k vnitřní rovnováze mezi tlakem a erozí. Proces se zastaví a pokračuje až s dalším odlehčením závaží. (Autor: Časopis Vesmír)

A zde je plné vysvětlení kouzla, které vytváří věže a brány skalních měst. Pískovcová skála není ve skutečnosti bezduchá tupá hmota, ale spíše obrovský shluk pískových zrn, jež se vzájemně dotýkají a tlačí na sebe díky své vlastní váze a působení gravitace. Jakmile v některé části skály odpadne blok či se vytvoří trhlinka, tlak se změní v celém tělese. Celá pískovcová skála je tedy propojena tlakovým polem do jediného „organismu“. Eroze je nerychlejší tam, kde je pískovec stlačený málo. Zato tam, kde je tlak vysoký, je eroze příliš slabá, aby mohla skálu poškodit. Tlakové pole tak vlastně erozi řídí. Nechává ji odstranit zbytečnou zátěž, která nepřenáší žádnou váhu a jen ohrožuje stabilitu skalního tvaru. Přitom vysoký tlak drží pohromadě nosné prvky a brání tak erozi, aby je odstranila.

Jde o nesmírně jednoduchý, přitom dokonalý a velmi mocný mechanismus. Vědeckými slovy jde o negativní zpětnou vazbu mezi tlakem a erozí. Jak eroze postupuje, roste tlak, čímž se eroze zpomaluje, až se může v některých případech úplně zastavit. Skalní brány, pilíře a do hladka vykroužené převisy tedy nejsou žádnou hříčkou přírody. Jde o dokonalé a finální útvary, na nichž eroze zotročená tlakovým polem vykonala své dílo a teď jen bezzubě hledí, protože blíže k tělu si ji již skála nepustí.



Matematický model tvaru tlakového pole uvnitř bloku pískovce, porušeného vodorovnou puklinou (bíla úsečka). Místa zvýšeného tlaku jsou soudržnější, tedy odolnější proti erozi, o čemž svědčí brána, která následně v pískovcovém bloku skutečně vznikne. (zdroj: Jaroslav Řihošek a Michal Filippi)

Jak ukazují matematické modely tlaku ve skalním masivu, již od počátku je rozhodnuto, k jakému tvaru bude skála směřovat. Tlakové pole, duch skály, to na rozdíl od nás „ví“. Tupá skála poráží myslícího člověka na plné čáře. Pro vznik brány stačí, aby vprostřed skalního masivu byla vodorovná otevřená puklina. Tlak se může šířit jen mezi zrny a puklinu musí zeširoka obloukovitě obtékat.



Pískovcová brána vytvořená experimentálně v laboratoři (Foto: Marek Janáč)

Je to stejné, jako když potok obtéká plochou deskou položenou napříč tokem. Nad puklinou i pod ní bude tlak nízký a eroze tu bude rychle postupovat. Ve skále je tu již od začátku schovaný oblouk, stačí ho jen vypreparovat. Pískovcové sloupky vznikají tam, kde je skalní masiv rozčleněn svislými puklinami. Z nich se eroze šíří do stran, dokud tlak v pískovci dostatečně nenaroste, aby úbytek materiálu zbrzdil. Skály na tenké patce vznikají tak, že eroze postupující z boků se postupně zpomaluje, jak roste tlak v zužujícím se sloupku. Skalní věže mají u své paty takový tlak, že je vůči nim boční eroze bezzubá. Eroze rychle postupuje pouze na puklinových pásech, které věže oddělují.

Velké množství jevů v pískovcích a některých dalších horninách (zvětralá žula) lze pomocí tohoto mechanismu vysvětlit. Ale příroda, jak už to bývá, je komplikovanější. V běžných pískovcích je tmel, který drží zrna pevně při sobě. Pískovec v takovém případě musí nejprve zvětrat, aby se tvořivá role tlaku mohla projevit. Na povrchu skal existuje řada dalších procesů, vytvářejících jiné tvary. Některé zvětrávací procesy účinkují takovou silou, že je žádný tlak nezastaví. Například solné či mrazové zvětrání lze sice tlakem zpomalit, ale nikoliv zastavit. Eroze tedy ve skutečnosti v přírodě, na rozdíl od laboratoře, nakonec zvítězí a skálu smete i s jejím duchem. Ale i tak tu skalní brány budou mnohem déle, než by se nám na první pohled mohlo zdát.

Hlavní přínosy a klíčové výsledky studie

- Vysvětlila vznik skalních útvarů v pískovci, který byl neúspěšně studován po 150 let. Na rozdíl od předchozích prací jsou výsledky doloženy experimentálně vytvořenými skalními útvary (skalní brány, okna, převisy, sloupky atd.) za použití pískovce z lomu v Českém Ráji a běžných erozních procesů. Vliv tlaku je tak jasně doložen.
- Oproti starším představám se jedná o velmi jednoduchý mechanismus (negativní zpětná vazba mezi tlakem a erozí). Různé skalní tvary v pískovci se od sebe neliší mechanismem vzniku, ale jen počáteční situací ve skalním masivu (orientace puklin a tím i tlakového pole).
- Vliv tlaku na erozní procesy dosud nebyl intenzivněji studován, studie tak otvírá nové směry výzkumu.



Unikátní pískovec (respektive uzamčený písek) ze Střelče, závaží, a záměrně vytvořená porucha (kamenný kvádr je podložen jen na krajích) mají společně za následek „spuštění“ článkem popisovaného procesu a tedy vznik skalní brány. (Foto: Marek Janáč)

Studie, zveřejněná v časopisu *Nature Geoscience*, přesahuje do dalších vědních oborů a praxe. Ukázalo se, že přílišné soustředění na detaily může být na škodu. Vědci studující pískovce se v posledních desetiletích soustředili na detailní studium zvětrávacích procesů (zejména solné zvětrání), aniž by si uvědomili, že procesy musí něco koordinovat a že je tedy nelze studovat odděleně od vlivu tlaku. V inženýrské geologii vědci přehlíželi možnost, že tlak (přesněji stres) může zpomalovat destrukční procesy. To je zásadní důvod, proč tento fenomén nebyl popsán mnohem dříve. Tlak ovlivňuje erozní procesy i v pískovcových kulturních památkách (např. skalní město Petra v Jordánsku). Pochopení jeho vlivu tak umožní lepší ochranu těchto dokladů dávné kultury našich předků.

Autoři výzkumu

Jiří Bruthans, Jan Soukup, Jana Vaculíková, David Mašín, Gunther Kletetschka a Jaroslav Řihošek –
Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy

Michal Filippi – *Geologický ústav Akademie věd*

Jana Schweigstilllová – *Ústav struktury a mechaniky hornin Akademie věd*

Alan L. Mayo – *Brigham Young University, USA*



Část týmu v laboratoři: Jana Schweigstilllová, Jiří Bruthans, Jan Soukup a Jaroslav Řihošek. (Foto: Marek Janáč)

Výzkum byl mimo jiné podpořen projekty: GAUK č. 380511 a GAČR č. 13-28040S.

Poděkování autorů

Ing. **Petru Hübnerovi**, řediteli společnosti Sklopísek Střeleč, a.s., za umožnění výzkumu v lomu a odběr vzorků

panu **Lukášovi Horákovi** za technickou podporu v provozu