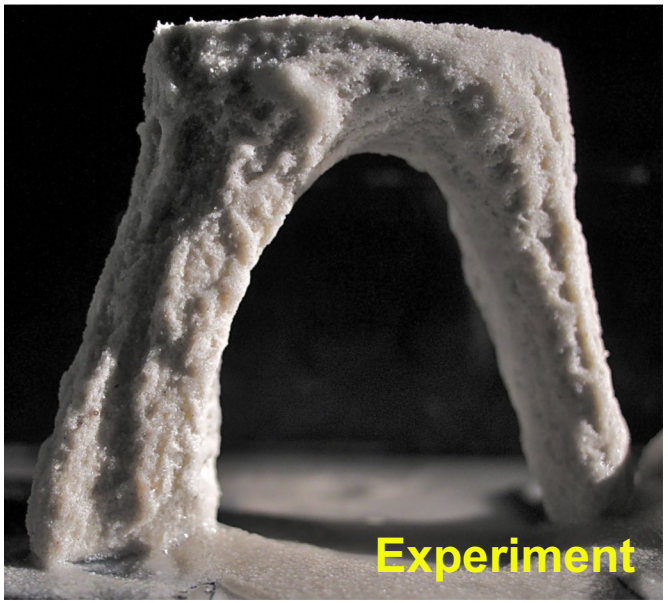
Jak je řízena eroze pískovcových útvarů

J. Bruthans [1], **J. Řihošek**[1], M. Slavík[1], D. Mašín [1], M. Filippi [2], J. Soukup [1], J. Vaculíková [1], J. Schweigstillová [3]

16 m





10 cm

[1] Přírodovědecká fakulta UK
[2] Geologický ústav AVČR
[3] Ústav struktury a mechaniky hornin AVČR

Pískovcové skalní útvary

- pískovce jsou řazeny pod **pseudokras**, ale tvoří **svébytné útvary**
- dosud neexistuje jiná definice pískovcového reliéfu, než výčtem forem
- vyskytují se zde skalní brány, převisy, oblouky, sloupky apod.

brána



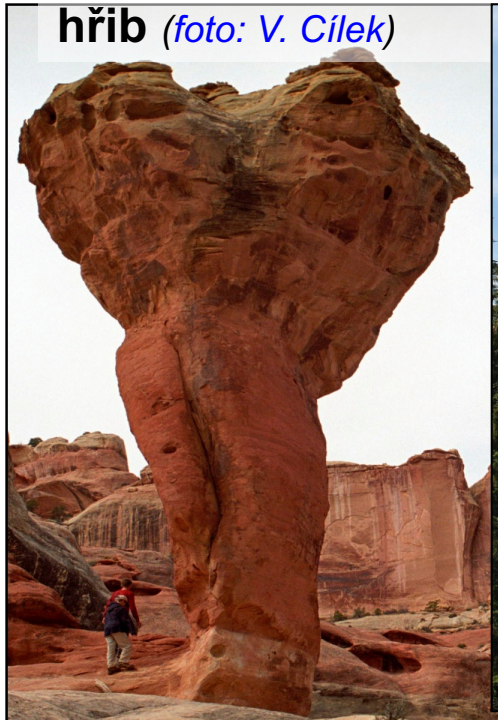
převis

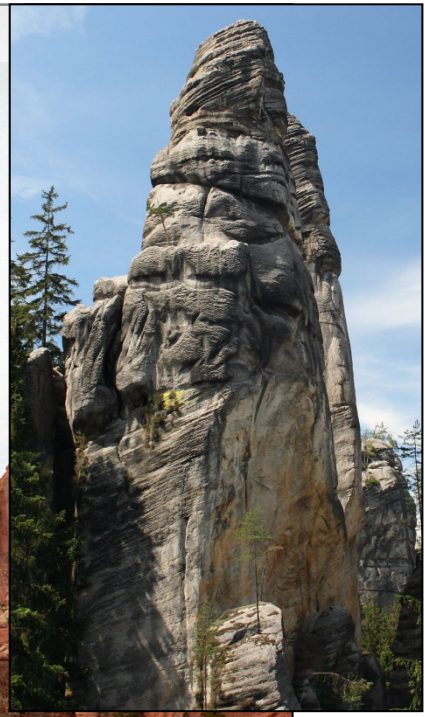


sloupky *(foto: M. Audy)*



hřib *(foto: V. Cílek)*





Jak tyto formy vznikají?

• pískovcové formy studovány 150 let *(Turkinkton a Paradise 2005)*

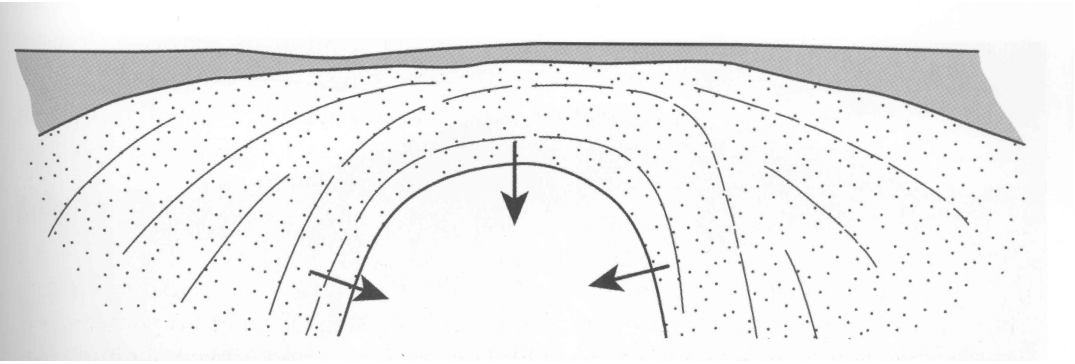
• většina autorů považuje **erozní procesy přímo odpovědné na vznik forem = „erozní formy reliéfu“**

• existuje **obrovské množství různých názorů**, obvykle opřených o pozorování morfologie a případně měření obsahu solí: **obrušování pískovými zrny** nesenými větrem (*Kettner 1955*), **sapping** (*Laity a Malin 1985*), **exfoliace** (*Migon 2010*), **rozpouštění** (*Young et al. 2009*), **solné** či **mrazové zvětrání**, tzv. **selektivní eroze**

• někteří autoři ale uvažují, že samotné erozní procesy nebudou stačit:

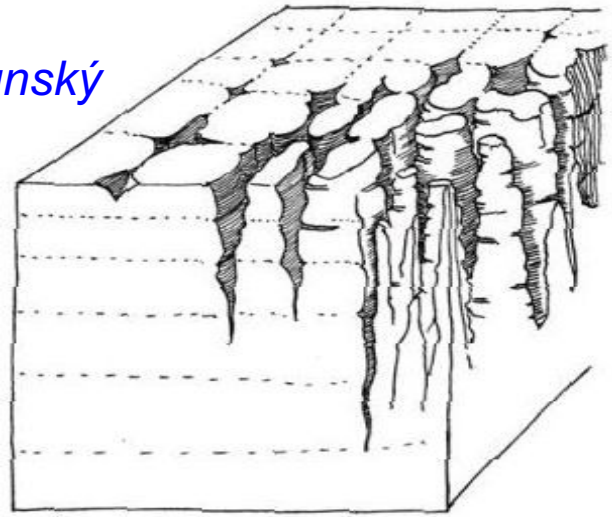
„I když bylo prokázáno že solné zvětrání je zodpovědné za rozpad horniny, jak vznikají dutiny zůstává nejasné“ (*Turkinkton a Paradise 2005*)

• na základě experimentů se ukázalo, že skalní brány mohou vznikat (odspoda) odlupováním bloků horniny podle zakřivených puklin



Cílek in Vařilová (2010)

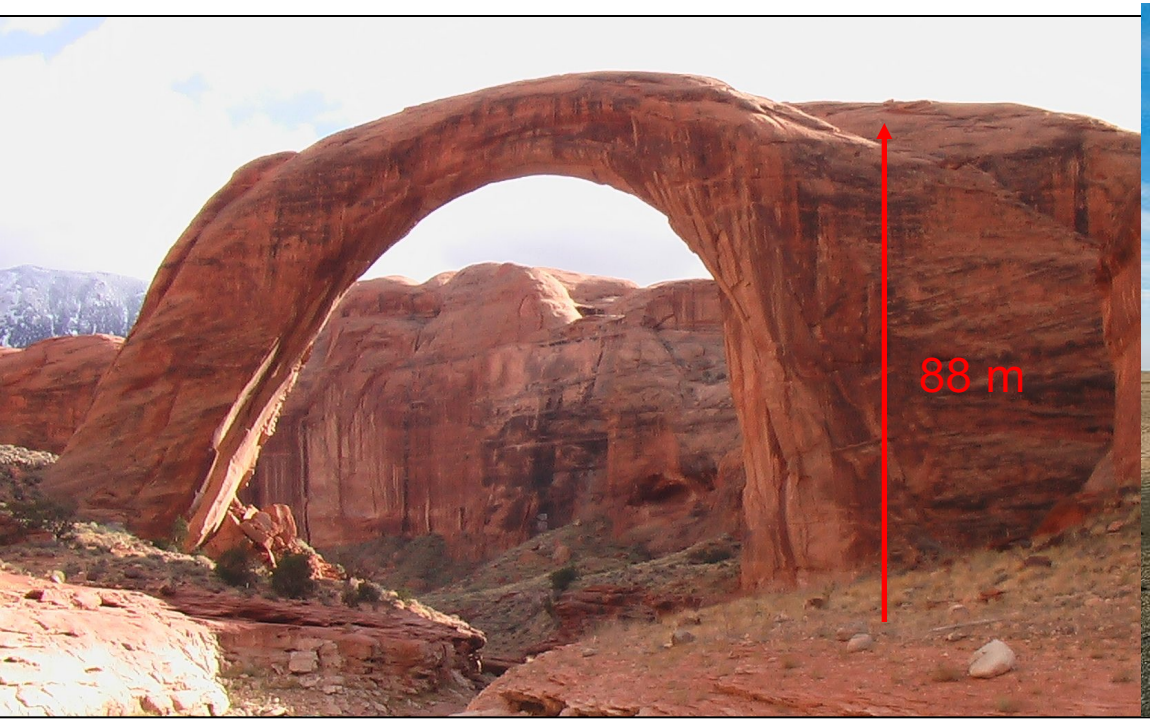
Kunský



Obr. 5-117 Vznik a vývoj pískovcového skalního města. Na křížení puklin vznikají pseudozávrty, které se dále prohlubují ve žleby. Ty rozdělují pískovcovou desku ve svislé kvádry a jsou dále modelovány podél puklin a spár podle odlišné odolnosti horniny v různých místech

Jak ale může samotná eroze vytvořit něco tak dokonalého?

- tvary mají podezřele dokonalou geometrii… **nevypadají jako dílo náhody**…
- jak mohou být pískovcové oblouky vykroužené na vzdálenosti desítek metrů, když eroze působí v několika cm masivu? **Co jí v celé formě koordinuje?**
- proč brány vyčnívají často nad okolní pískovec a co je chrání proti erozi více než okolí?



Duhový most, plošina Colorado, USA (*Wiki*); stáří oblouku lze odhadnout na **0.5 - 1 milion let** (zařezávání řeky 100-160 m/mil. let – *Crow et al. 2014*)



Skalní hřib (*foto G. Steinmetz, National Geographic*)

Eroze řízená napětím

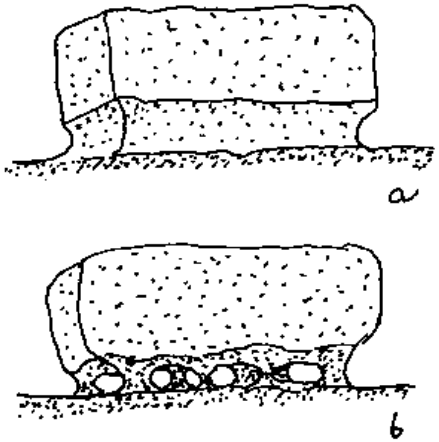
-Émilie Beaumont (1994): Ilustrovaná příroda (encyklopedie pro děti od 9 let): vznik zemních pyramid řízený zatížením nadloží



Zakleté komíny jsou vlastně sloupy z měkké horniny zakončené čapkou z horniny tvrdé, která sloup chrání. Váha tvrdé horniny stlačuje měkkou horninu sloupu a činí ji tak pevnější a odolnější proti erozi.

•*Radek Mikuláš (1997)* z pozorování v terénu odvodil že **napětí v hornině může ovlivňovat erozi** (*Plešivecká brána a skalní kanci, neboli pár poznámek k pískovcovému fenoménu Dubských skal. Speleo 25)*:

„**Pískovec vystavený značnému tlaku je** totiž (podobně jako předpjatý beton) pevnější než pískovec méně "stlačený", kromě bezprostředně exponované povrchové vrstvičky je **méně náchylný k solné a mrazové erozi** či k vytváření gravitačních či bioerozních puklin. **Dochází proto časem k jakémusi vypreparování nosných částí konstrukce** a skalní kanec, zaoblený kvádr stojící na nožičkách, je na světě (viz obr. 2)“



Obr. 2: Fáze vzniku skalního kance.

• v novějších pracích autora, kde jednotlivé formy popisuje, se tento názor již neobjevuje (např. *Adamovič a kol., 2010*)

• **tyto představy totiž kolidovaly s chápáním napětí v geomorfologii**: uvažovalo se, že napětí v hornině může jen urychlovat destrukci forem, nebo, že nemá vliv…

• v **mechanice zemin nebyly experimenty**, které by toto chování podporovaly

Lom Střeleč – přírodní laboratoř pro studium eroze

• v **lomu Střeleč** se těží hruboskalský pískovec a jsou zde i polohy tzv. „**uzamčených písků**“ což je materiál s pro horniny neobvyklými vlastnostmi: za sucha je třeba ho rozdružit trhavinami, ale přitom se dá snadno rozplavit vodou, malý úlomek ani nelze vzít do ruky, rozpadne se…

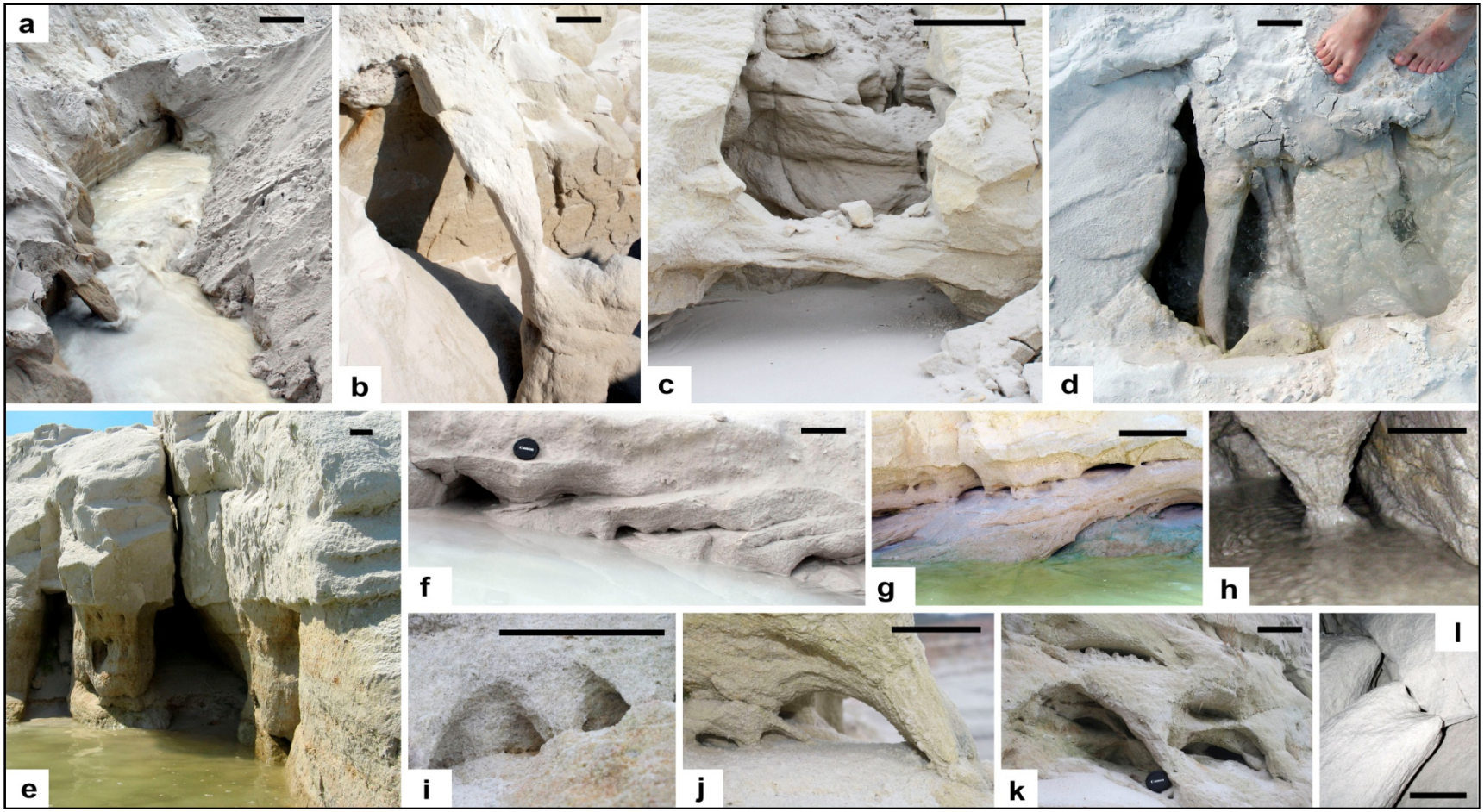


lom Střeleč, 3 km jjv. od hradu Trosky, Český ráj



Lom Střeleč jako klíč

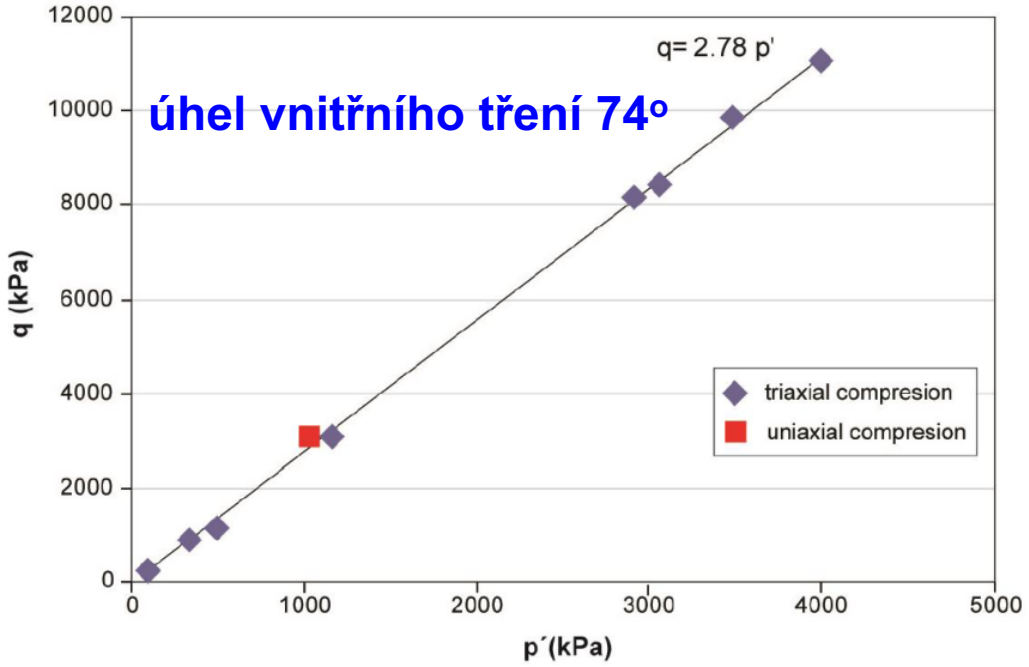
• v lomu se běžně vyskytují formy **morfologicky stejné jako ty na přírodních výchozech** kvádrových pískovců v okolí i jinde (úsečka = 10 cm)



• protože tyto formy vznikly na pár let či jen dnů starých stěnách, **vznikají současnými procesy, za současných podmínek = naděje přijít na to jak přesně vznikají**

Materiál pro experimenty – Střelečský uzamčený písek

- neobvyklé mechanické vlastnosti (ze stěny nelze těžit bagrem -> trhaviny pro těžbu, přitom křehký, ponořen do vody se rozpadá)
- vlastnosti lze dobře vysvětlit strukturou materiálu a nepřítomností tmelu
- křemenný uzamčený písek (**95-99% SiO_2**), křemenná zrna s nerovným povrchem, nemá **žádný tmel**
- při stlačení se **usmýkne až při rozdrcení zrn** (výčnělky zabraňují pohybu zrn), unese 150 m nadloží (pevnost v tlaku 3 MPa)
- nevydrží ani **malé tahové namáhání**, protože nemá tmel (tahová pevnost ~0.0005 MPa)



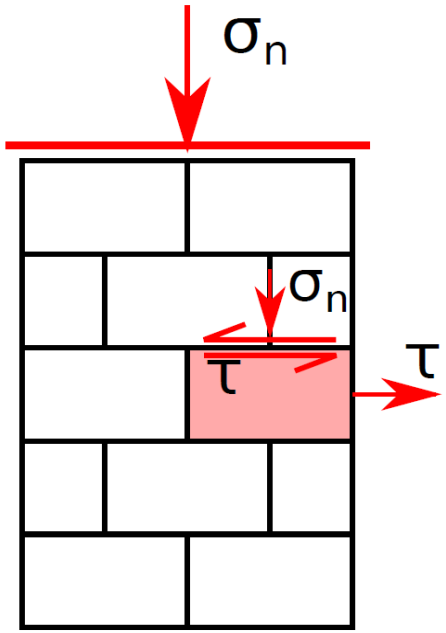
Uzamčený písek–10 cm krychle unese auto ale rozpadá se ve vodě

M. Janáč, časopis Vesmír

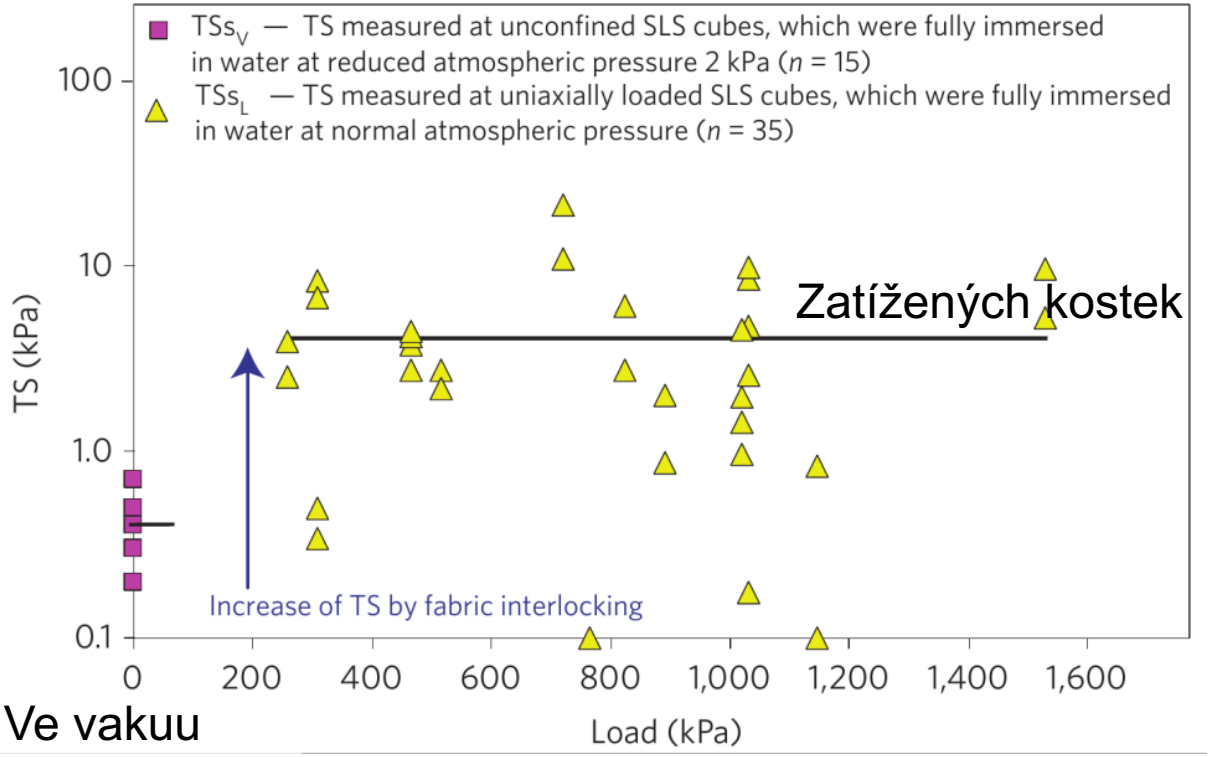
Střelečský uzamčený písek – rozpad ponořením ve vodě

- pokud není zatížen (váha nadloží, závaží), suchý uzamčený písek se rozpadá ve stojaté vodě (slaking)
- za erozi ve vodě je zodpovědný kapilárně stlačený vzduch a jím působené tahové namáhání, které roztrhá strukturu materiálu
- je erodován samozřejmě i proudící vodou a deštěm
- zatížení (nadložím mocným první dm) zabraňuje erozi vodou (zatížení zvyšuje tření podobně jako u **suché zdi**)

Slaking

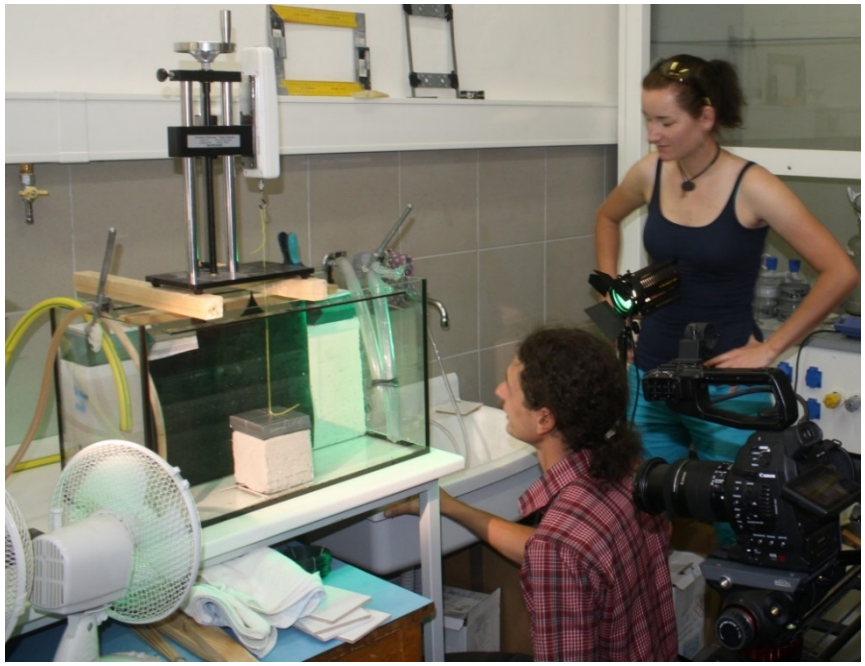


Tahová pevnost

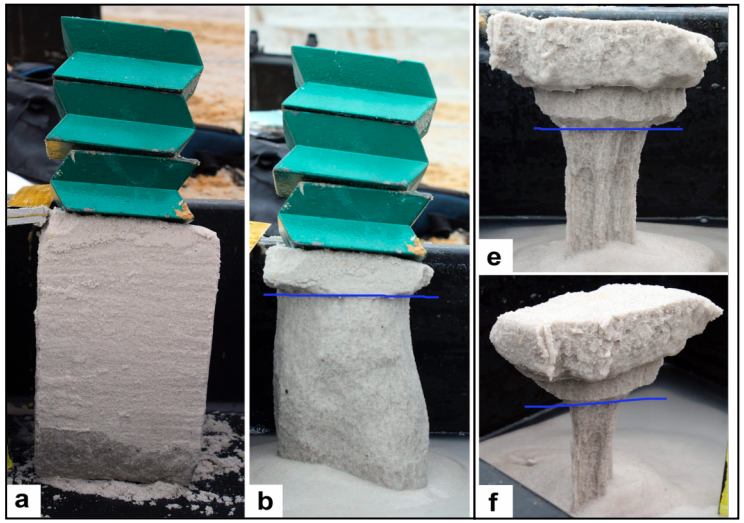


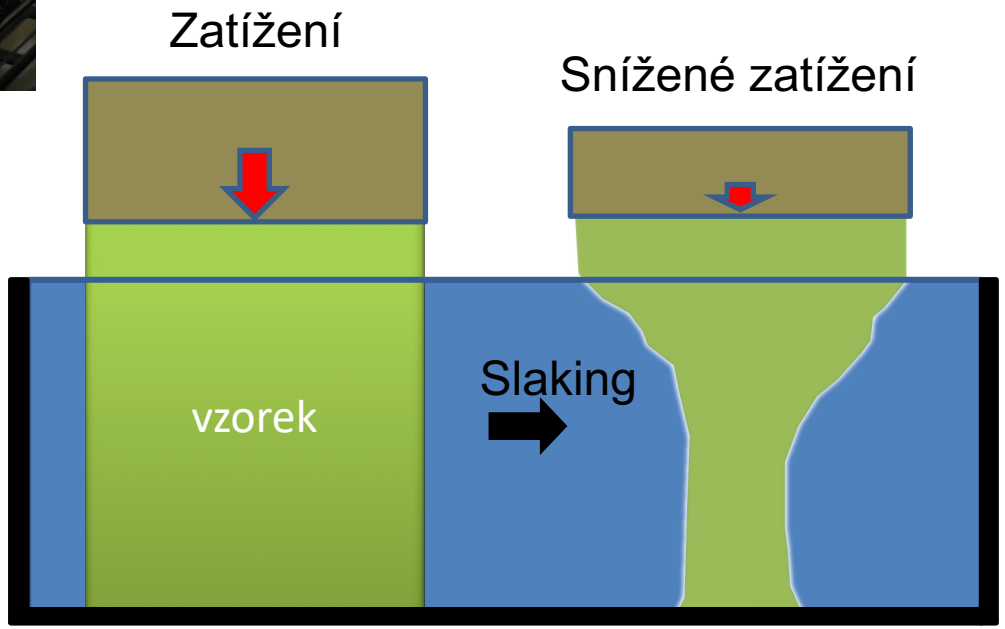
Ve vakuu

Využití slakingu v laboratorních experimentech

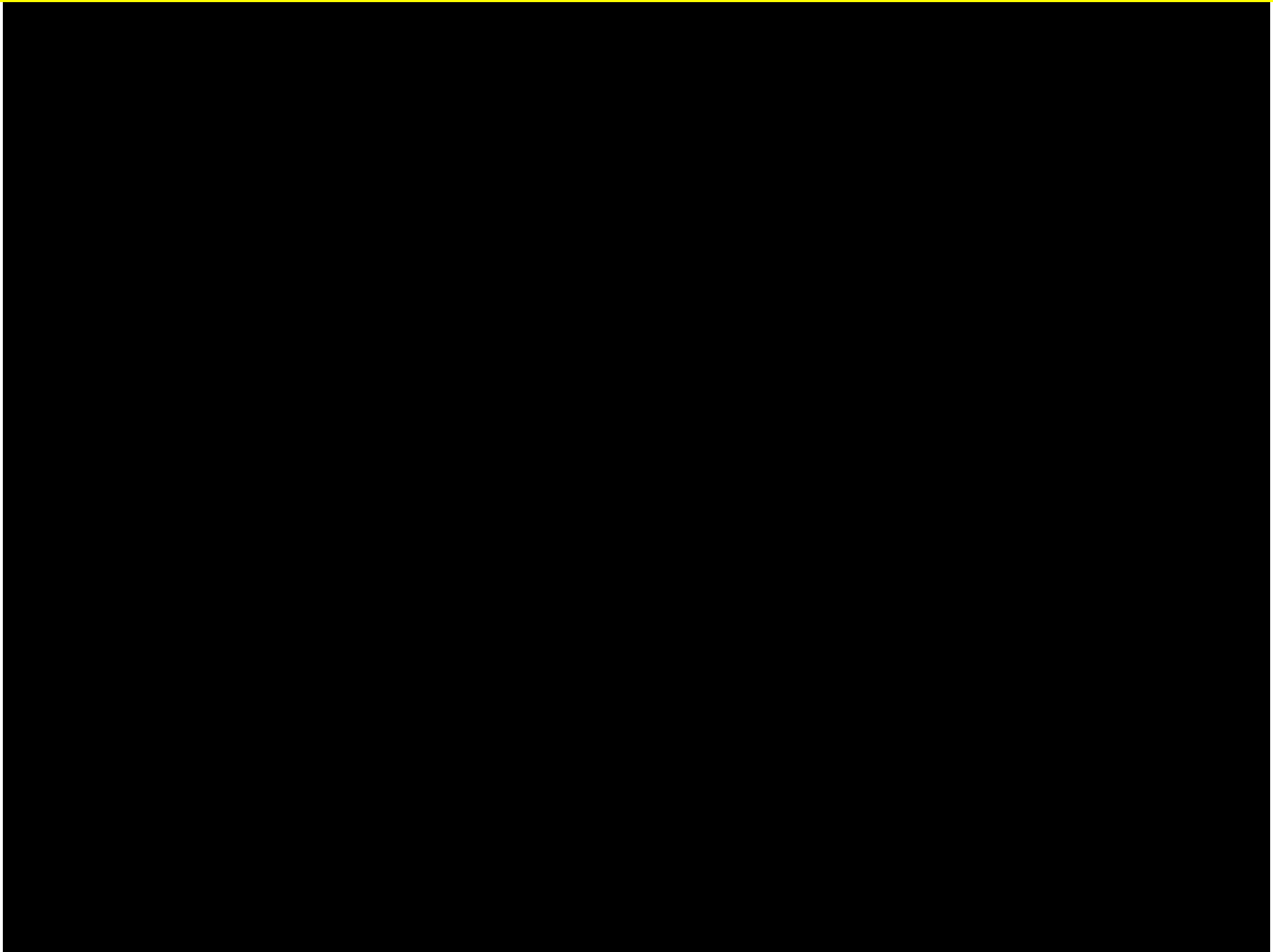


Experimenty se Střeleckým uzamčeným pískem

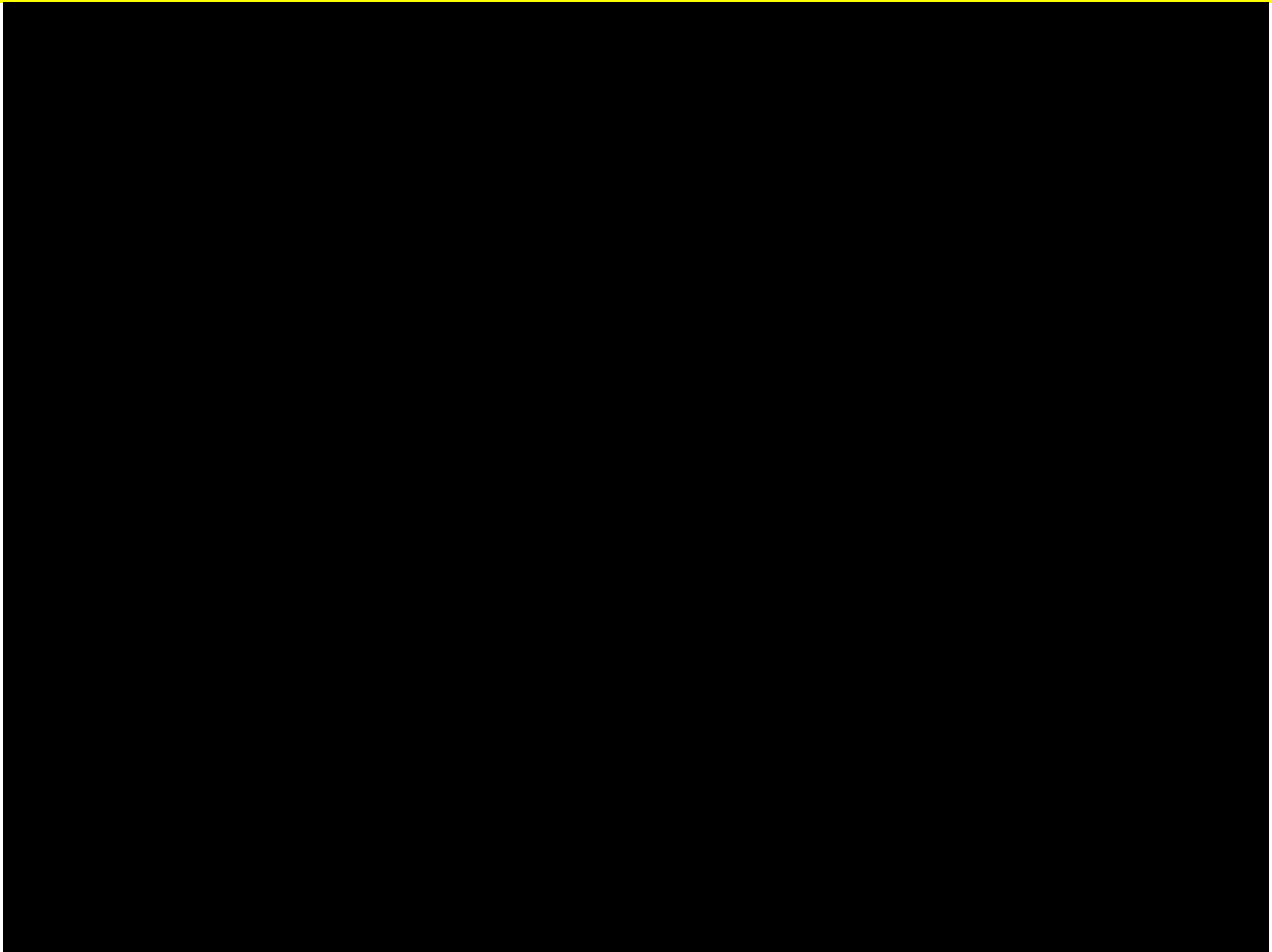




Fyzikální experimenty: sloup



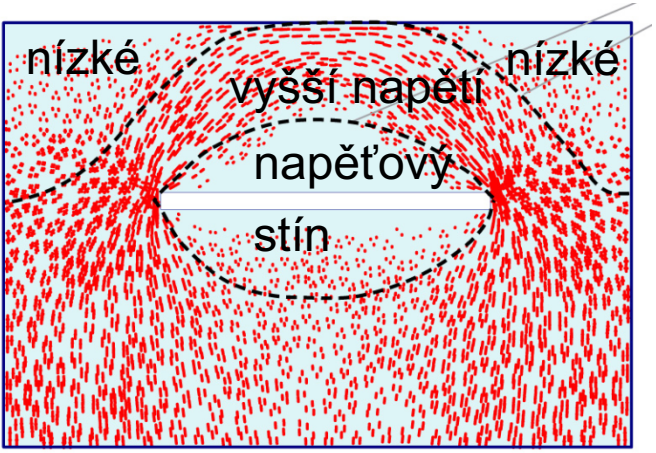
Fyzikální experimenty: brána



Fyzikální a numerické modelování: brány a převisy

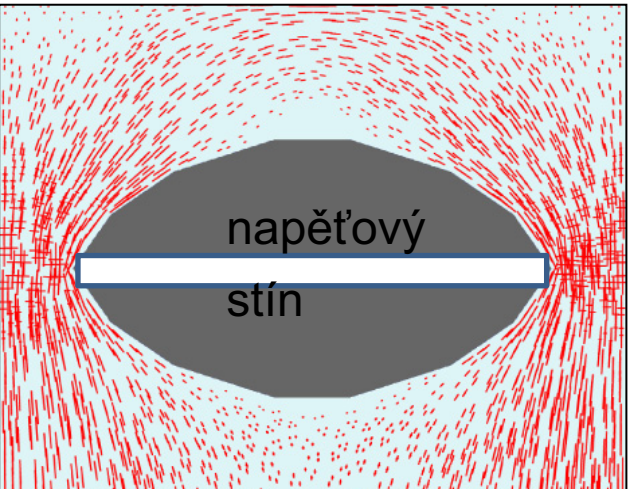
• Podmínkou pro vytvoření **brány** je aby byl pískovcový blok přerušen horizontální či ukloněnou diskontinuitou (puklina, jílová vrstvička, zvětrávající horizont), takže napětí musí tuto puklinu „obejít“; okolo diskontinuity se vytvoří tlakový stín (oblast nízkého tlaku)

• analogicky vzniká **převis,** pokud diskontinuita zasahuje do masivu jen z části





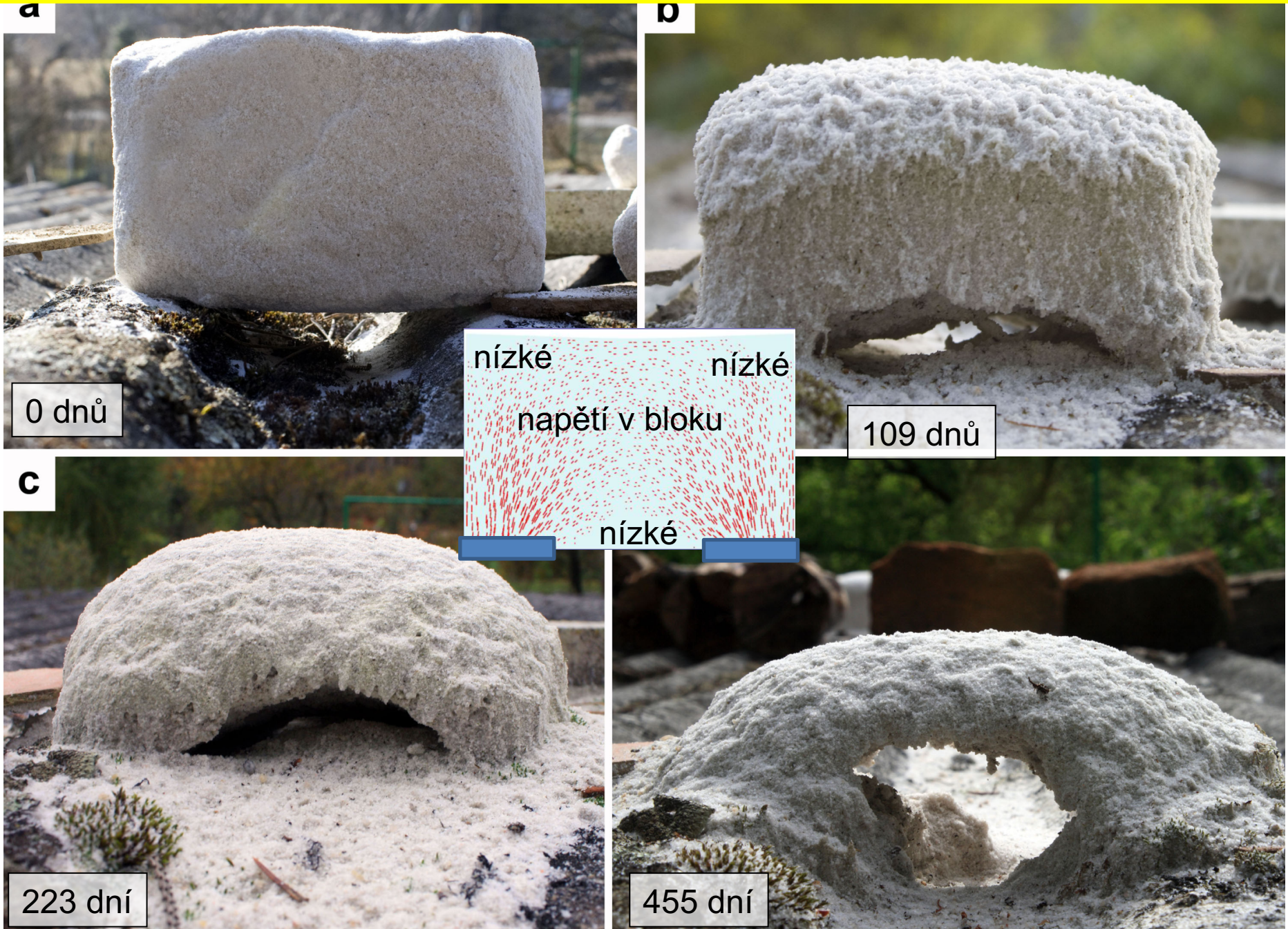








Studium mechanické eroze (již ne slaking)



Fyzikální modelování kropením konví: šikmá brána

- Ukloněná iniciální diskontinuita







Metody studia vzniku pískovcových bran

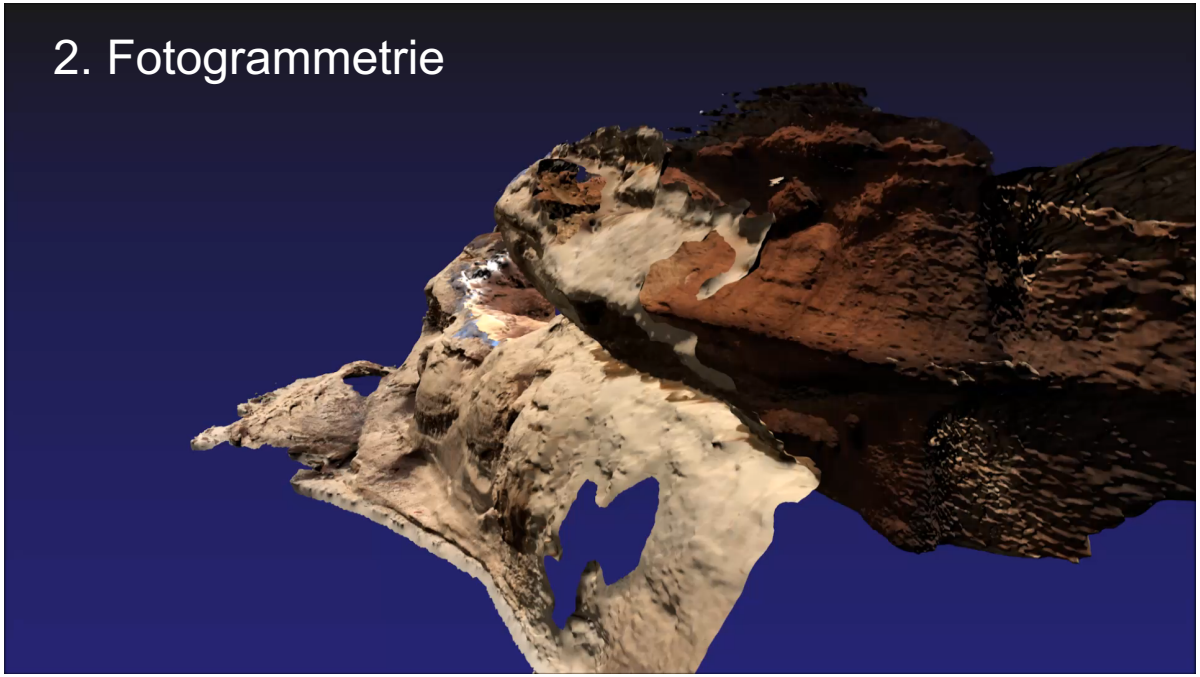
1. Fyzikální model eroze



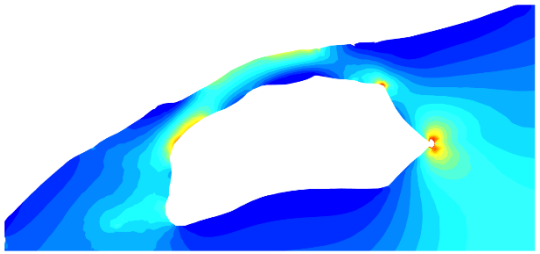
Eroze deštěm

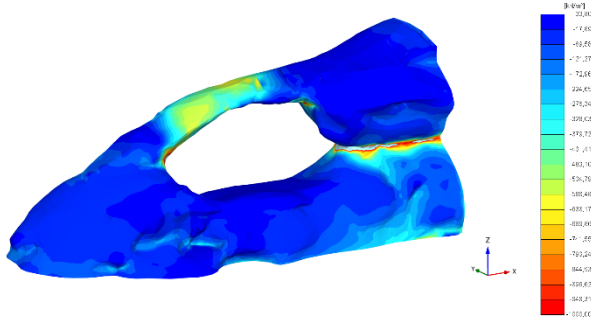


2. Fotogrammetrie



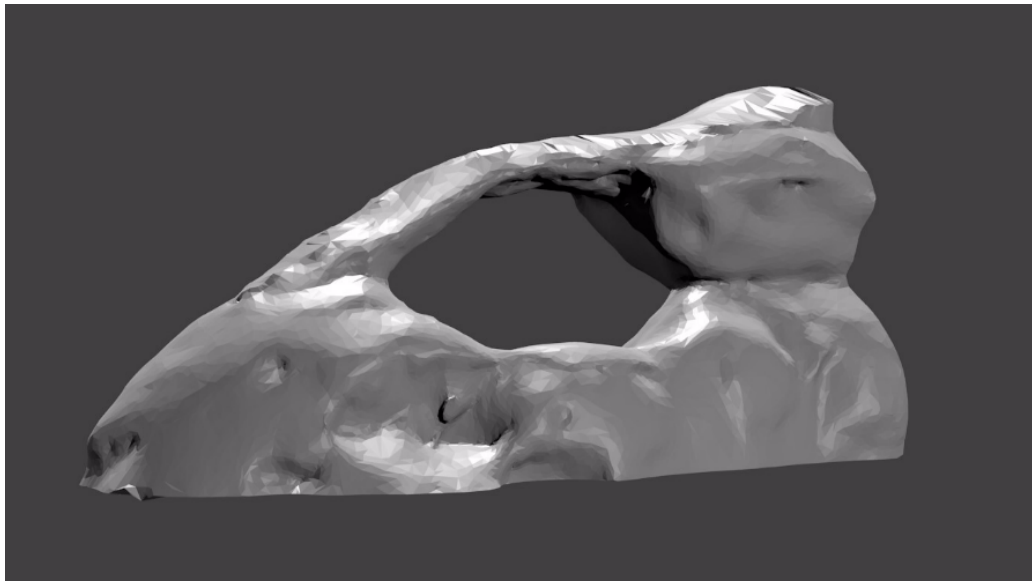
3. 3D analýza napěťového pole (Plaxis 3D) a numerické modelování





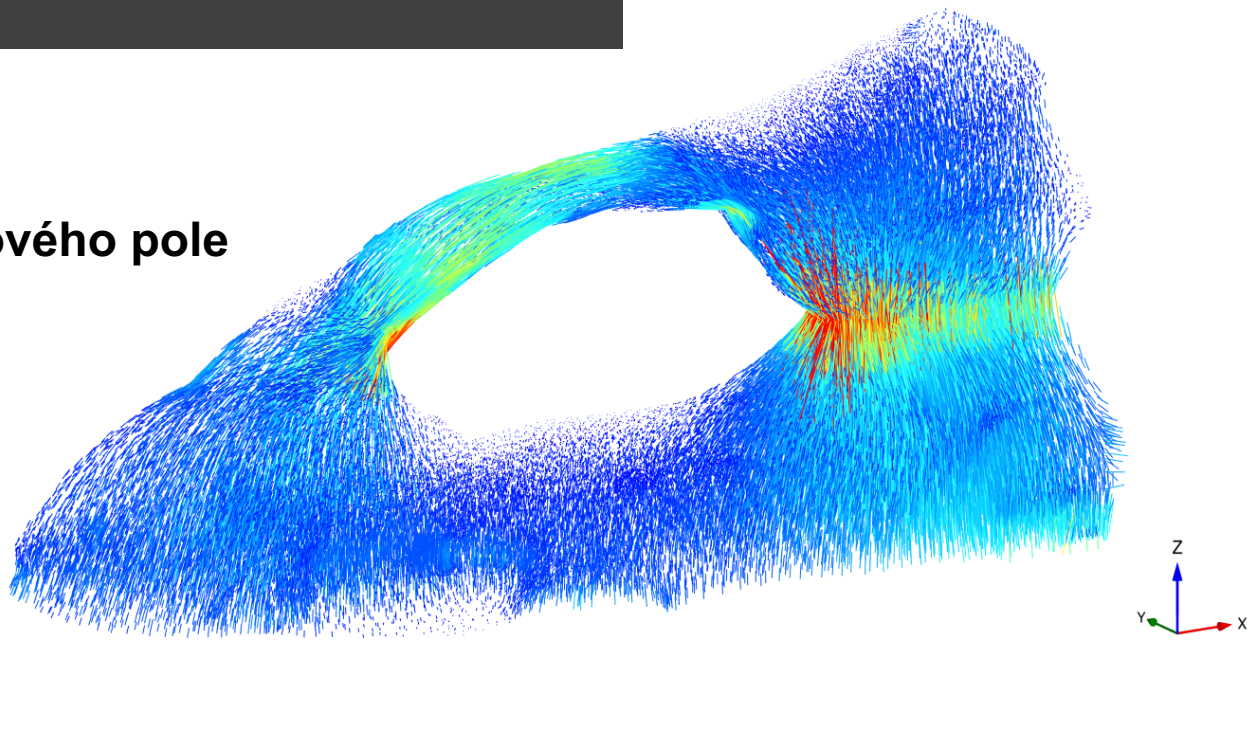
Materiál:
Uzamčený písek z lomu Střeleč
(in-situ experimenty)

Metody studia vzniku pískovcových bran



Fotogrammetrie

Analýza napěťového pole



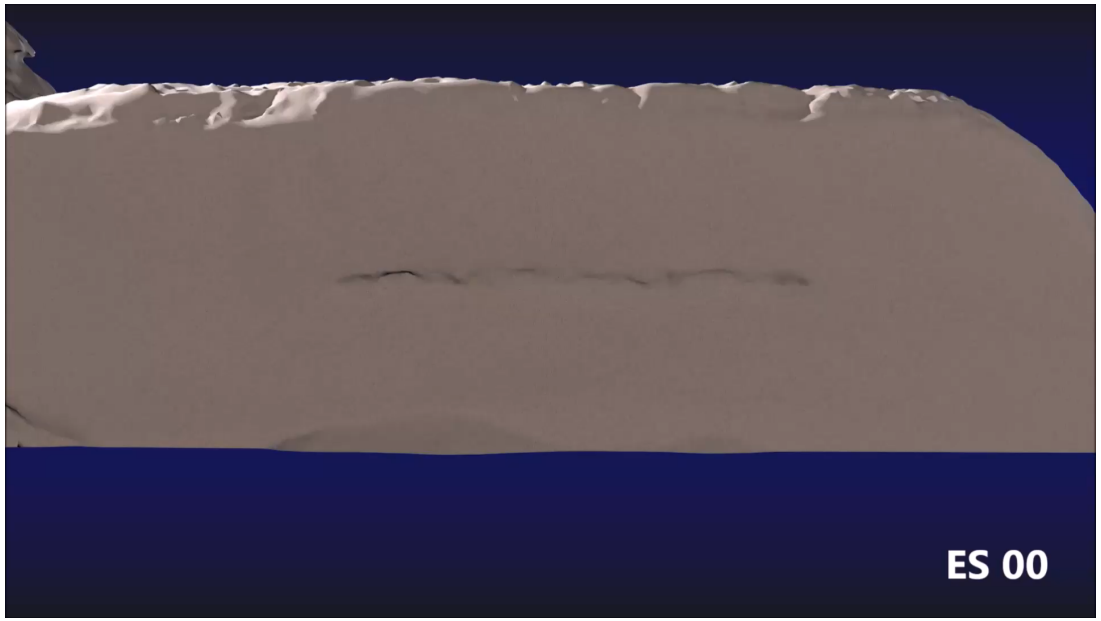
Fyzikální modelování: brána







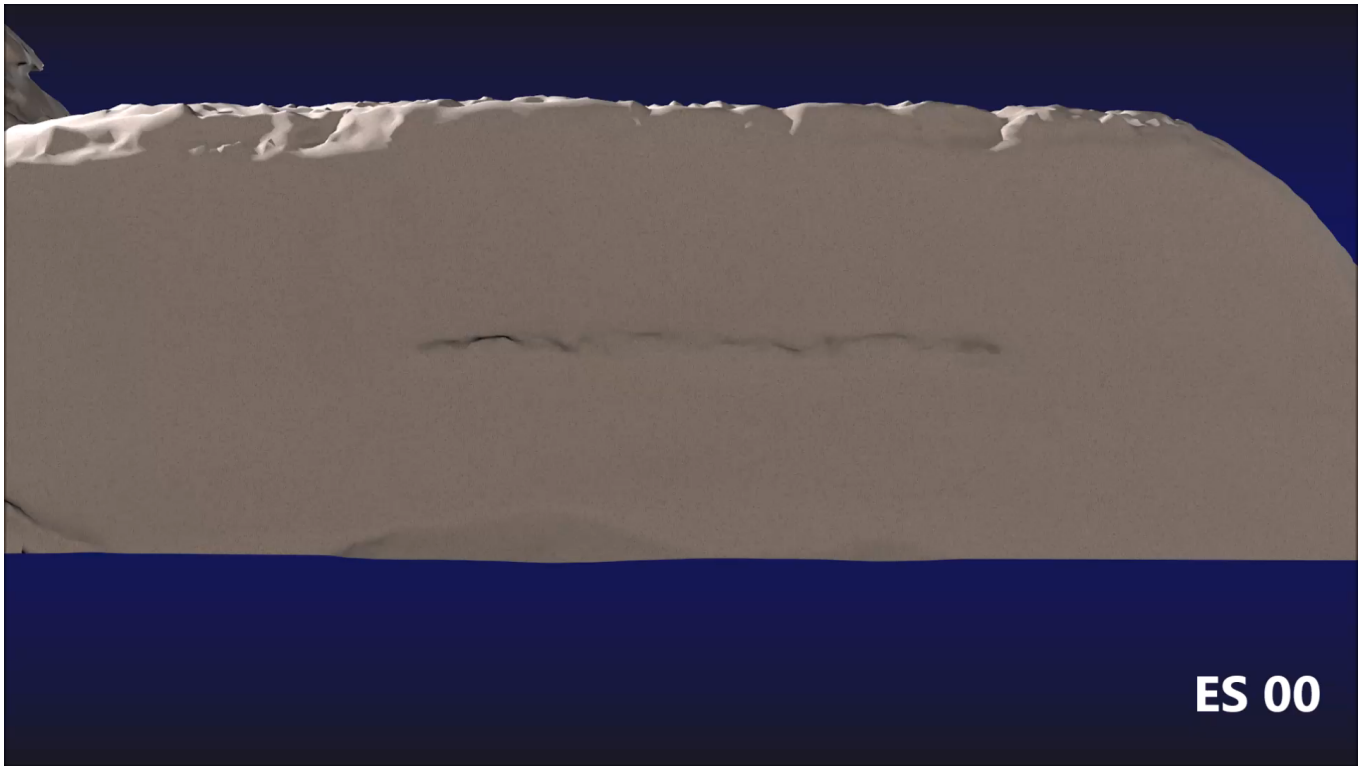
Využití fotogrammetrie pro 3D model vzniku brány

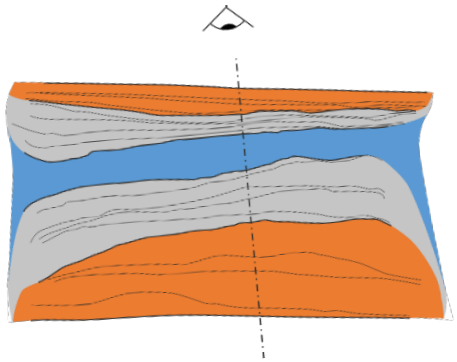






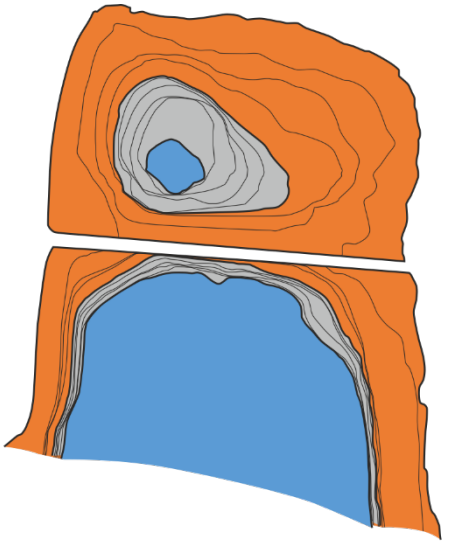
Řezy 3D modelu – pochopení vývoje tvaru brány





Pohled zvrchu:

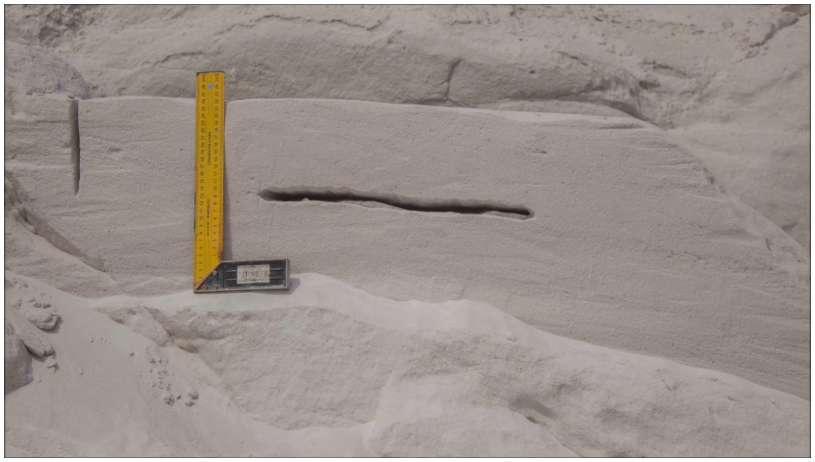
Příčný řez:



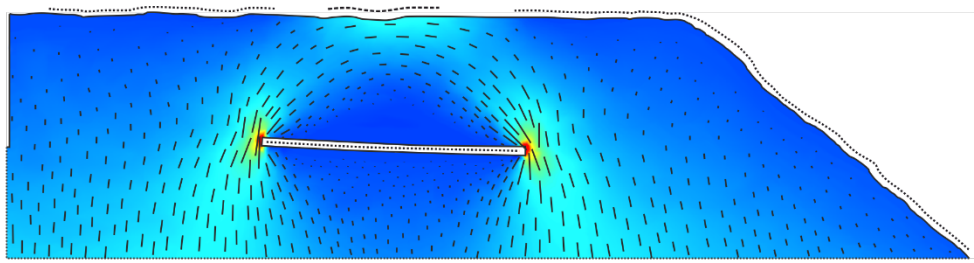
- Ztenčování bránového oblouku
- Boční přesun středu bránového oblouku

3D analýza tlakového pole

FEM Plaxis 3D

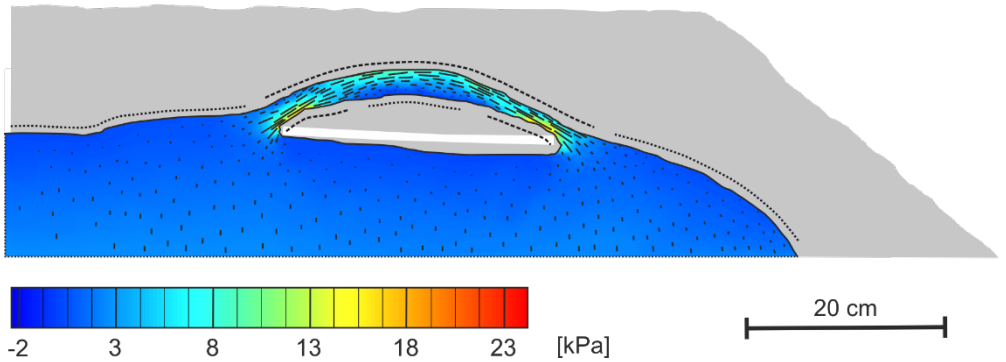


Původní tvar (ES 0)





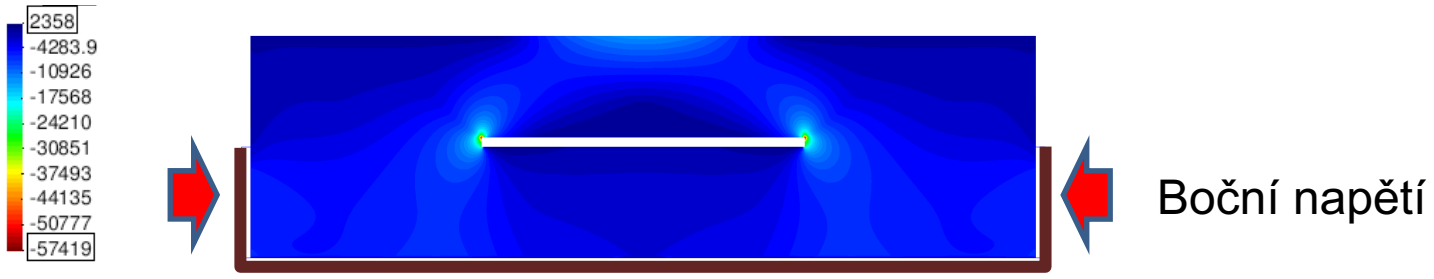
Výsledný tvar (ES 90)



Velikost maximálního hlavního napětí

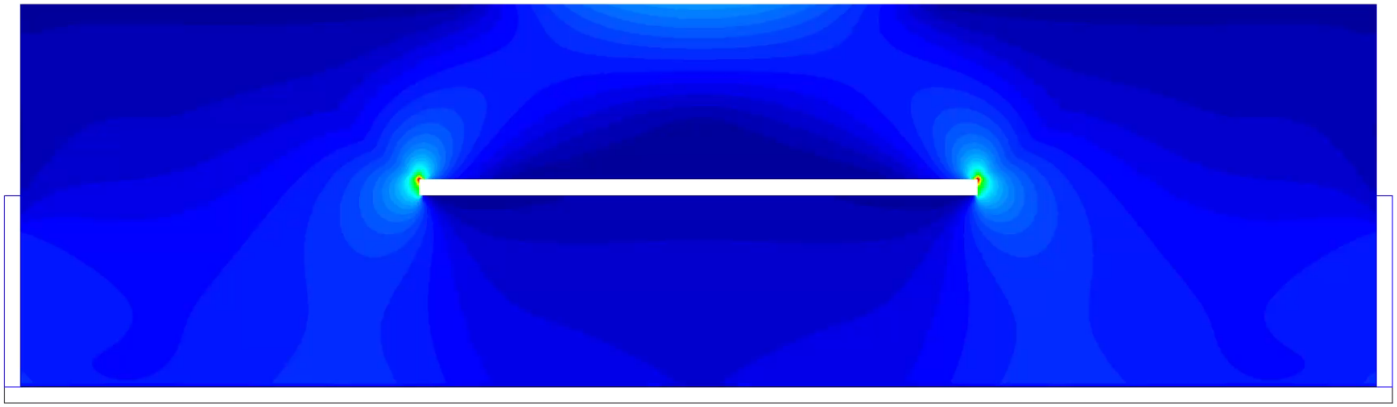
Koncept kritického napětí a numerické modely (2D)

- Abychom mohli vytvořit numerický model eroze závislý na napětí, musíme vycházet z **konceptu kritického napětí**
- Při napětí **nižším** než kritické napětí k **erozi bude docházet**, naopak při napětí **vyšším** k erozi docházet **nebude** (pro náš účel ignorujeme materiálovou pevnost a uvažujeme pouze elastický materiálový model)
- Napěťové pole - působení gravitace a boční napětí
- Model je rozdělen na **elementy**, které jsou po iniciálním zatížení **odstraňovány**, pokud je jejich **hlavní maximální napětí nižší než kritické napětí**



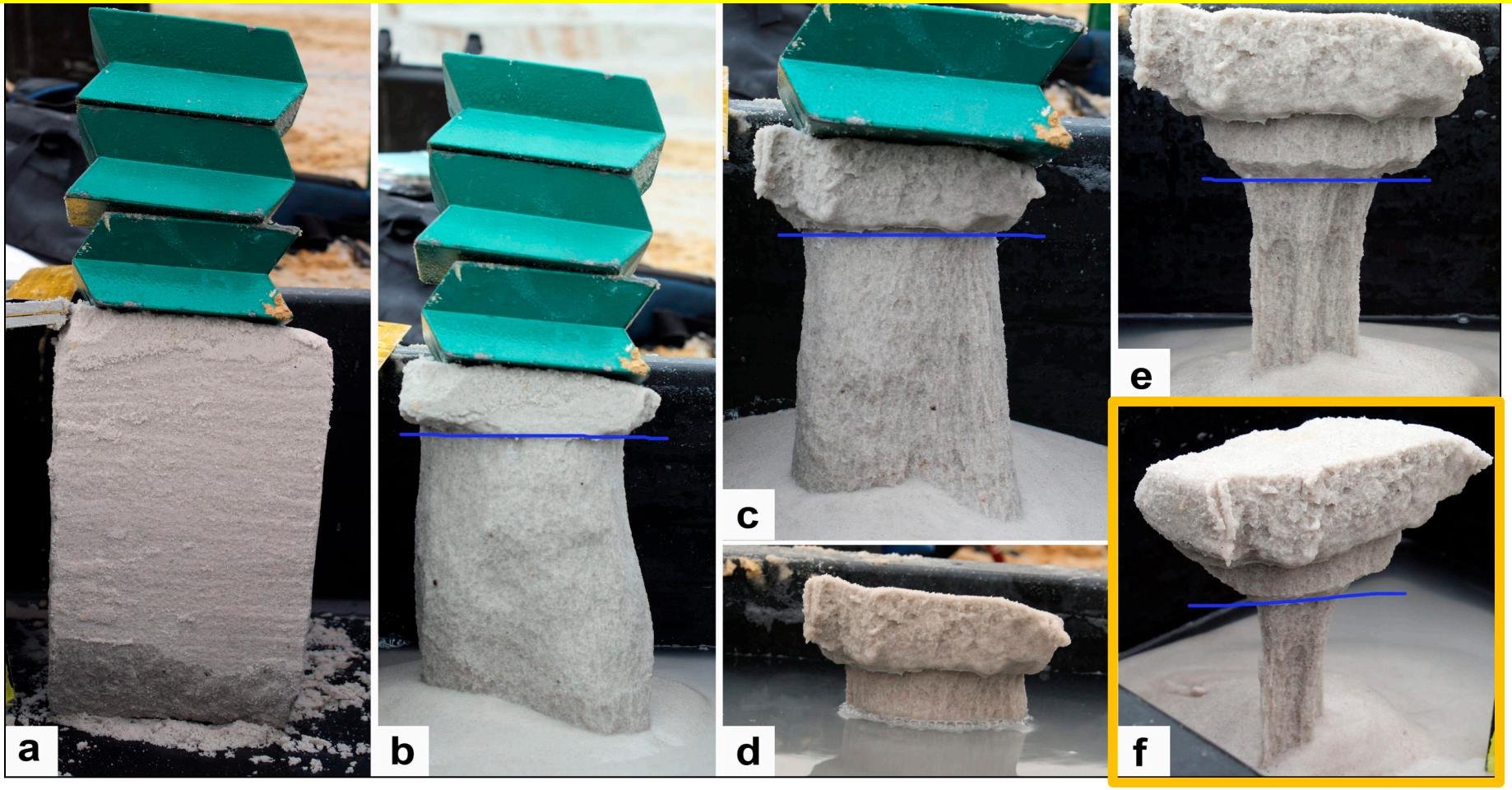
Numerický model vzniku brány (2D)

Kritické napětí dle experimentů cca 3,5 kPa





Simulace vzniku skalního hřibu: eroze regulovaná napětím



- **Napětí je schopno regulovat erozi tak dokonale že vytvoří „klobouk“ sedící na tenké noze, který se nezřítí**
- **Eroze vypreparuje nohu přesně pod těžištěm bloku** (15×10 cm na 4×2 cm noze)
- blok písku nejprve zatížen 18 kg olova, postupně snižováno zatížení, zaplavován po modrou linii

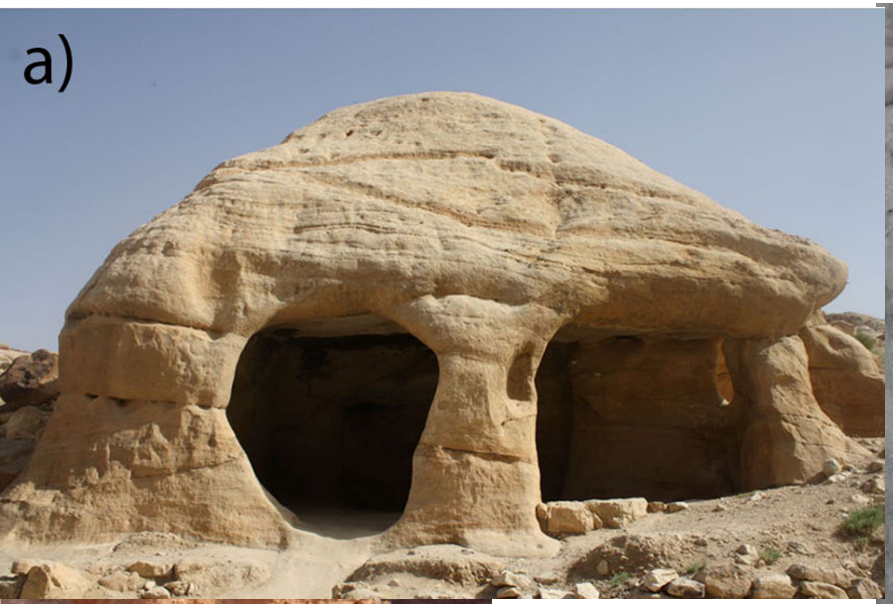


Simulace zvětrání hrobek v Petře: 2000 let eroze

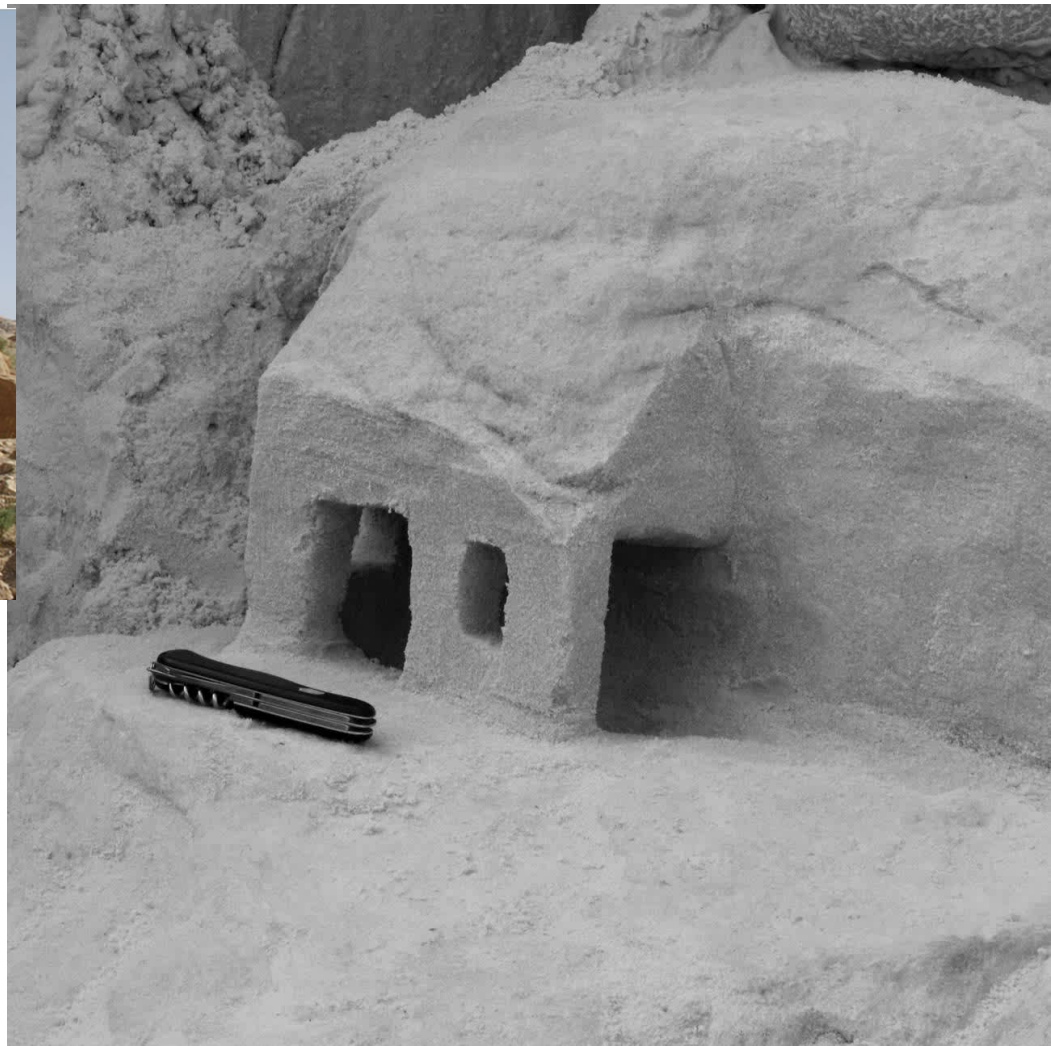
• vypreparování sloupků které dlouho odolávají erozi díky zatížení (stejně jako sloupky v jeskyních ve Venezuele)

• eroze je extrémně nevyrovnaná v čase a prostoru

•V Petře ani jinde není vliv napětí na erozi dosud vůbec uvažován



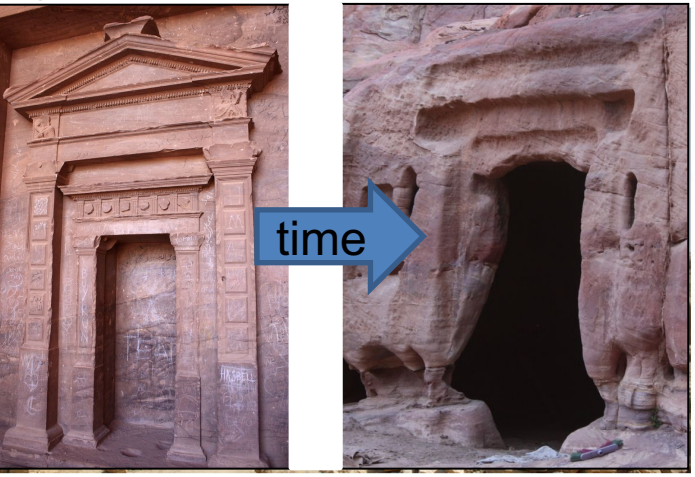


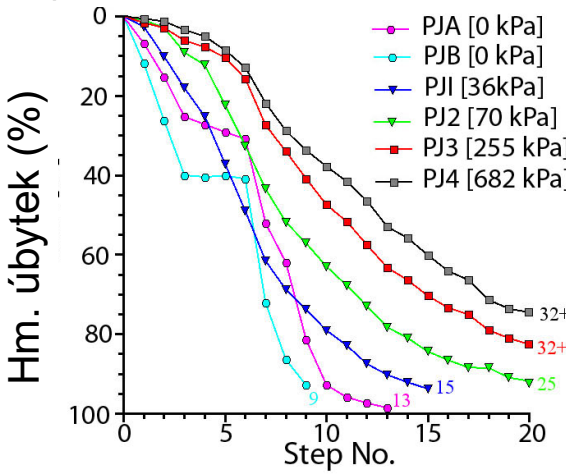


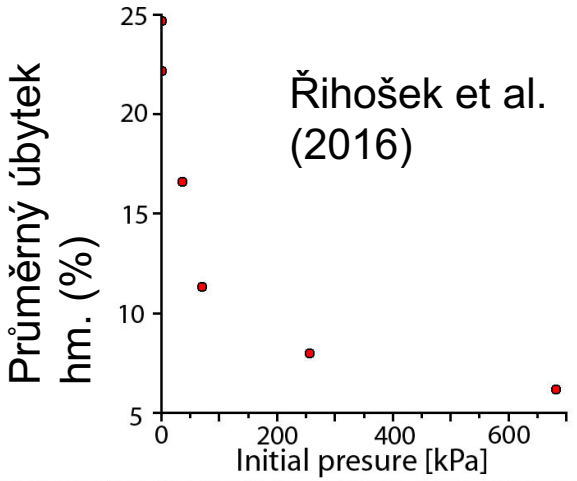
Řihošek et al. (2016)

Napětí ovlivňuje rozpad pískovce v mnoha dalších případech

• Napětí jednoznačně výrazně ovlivňuje rozpad pískovce starověkých hrobek v Petře (světové kulturní dědictví UNESCO), Jordánsko









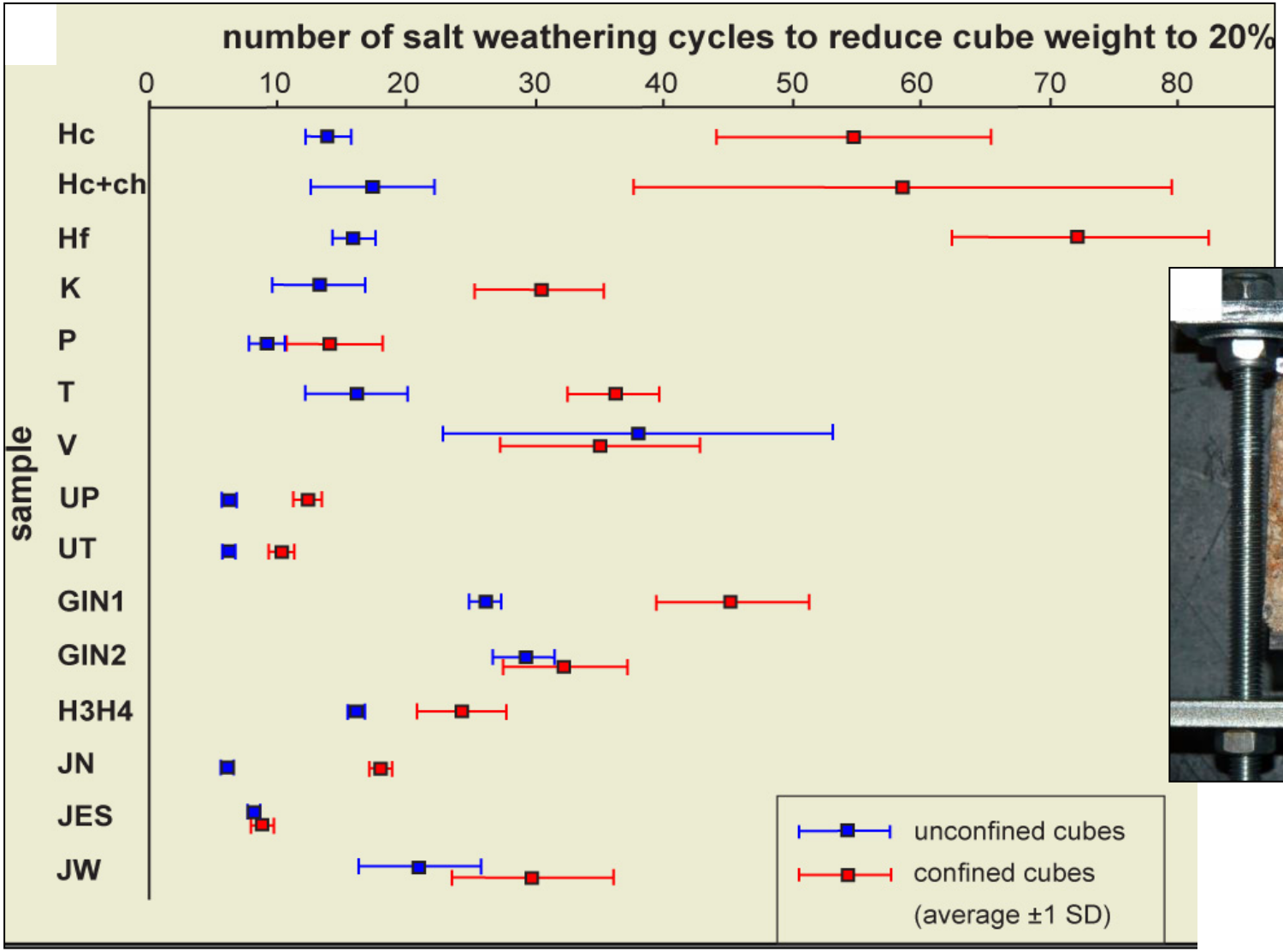
• Nepřímá závislost mezi napětím a intenzitou solného zvětrání pro pískovec Umm Ishrin v kterém jsou vytesány hrobky (Petra, Jordánsko)

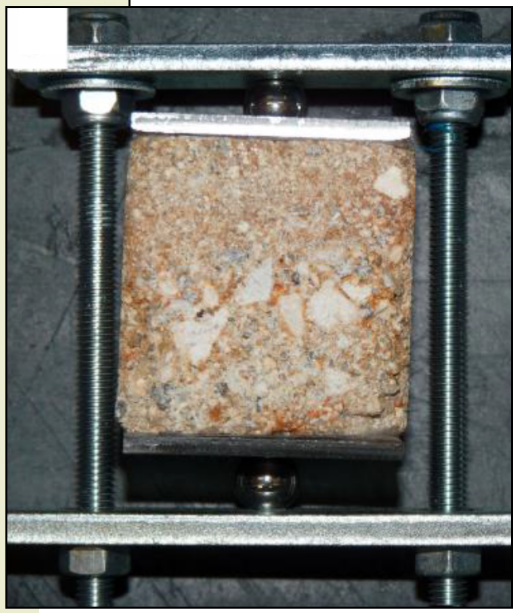
• Zvětrání hrobek se dá úspěšně replikovat modely ze střelečského uzamčeného písku

• **Vliv napětí je nutné uvažovat v pískovcích obecně, ne jen u vybraných forem**

Solné zvětrání cementovaných pískovců – vliv napětí

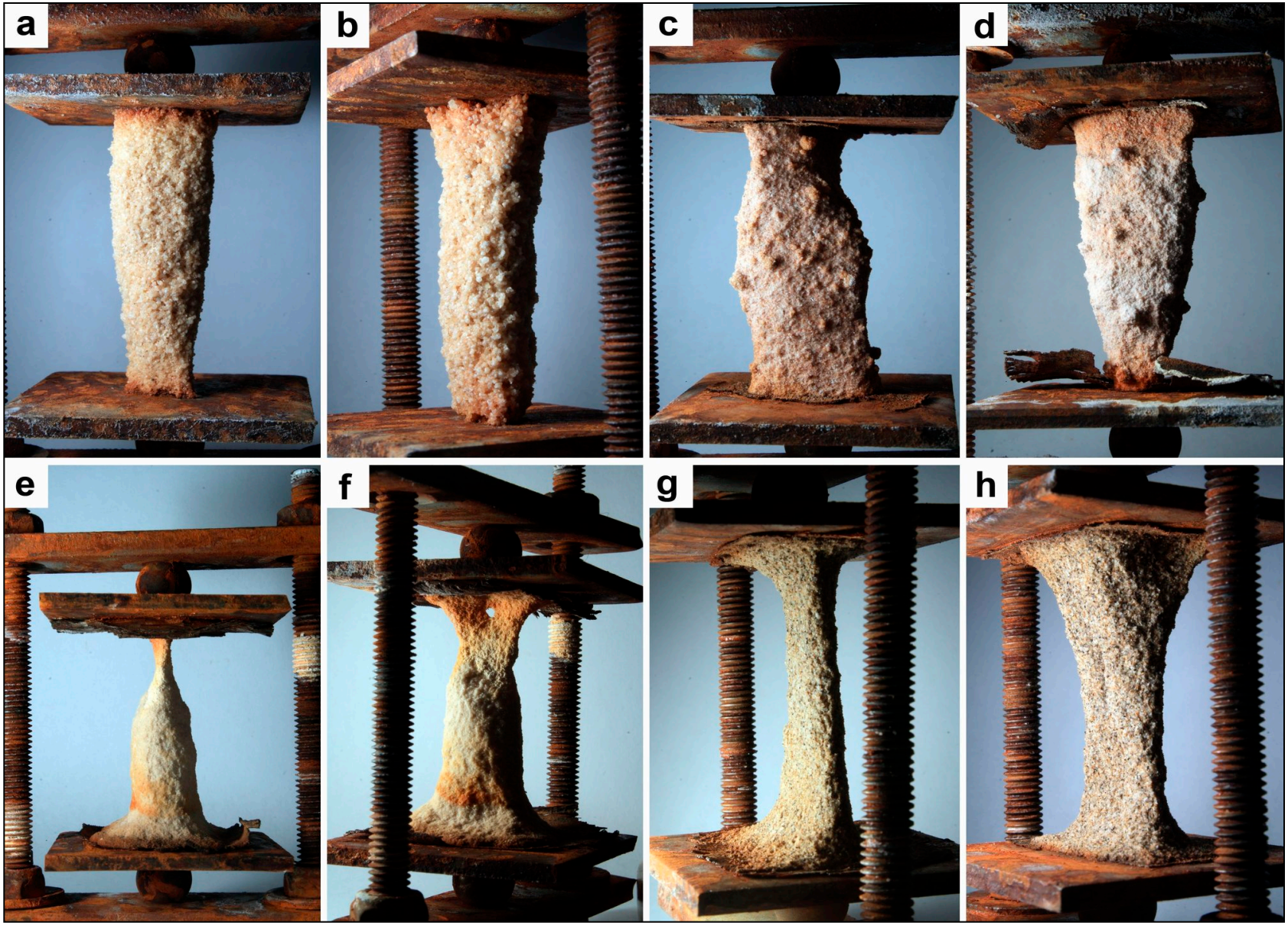
-krychličky 4 cm **cementovaných** pískovců, cyklicky máčených do Na_2SO_4
-rychlost zvětrání klesá se zatížením (modře nezatížené trojice kostek, červeně zatížené)





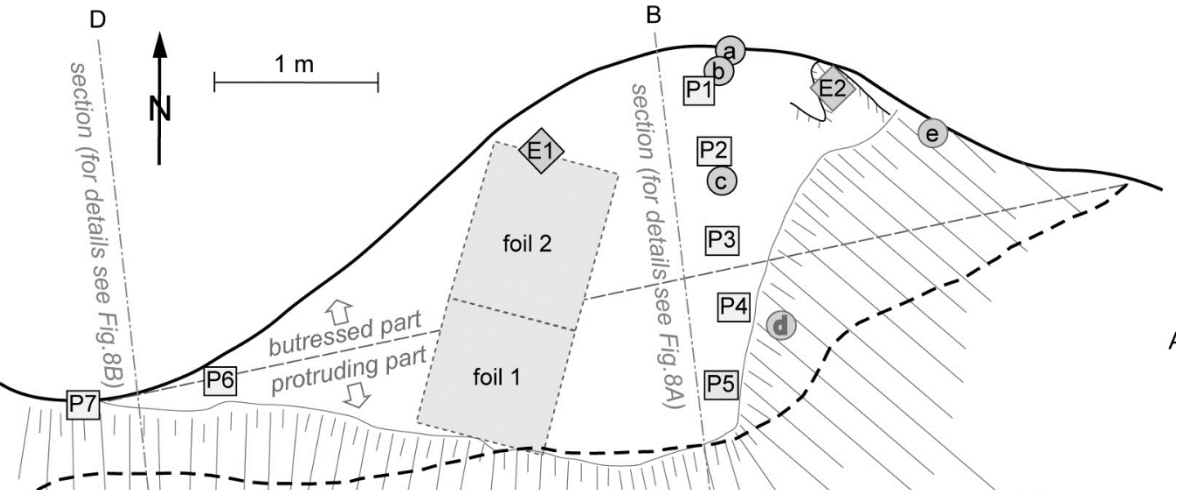
Solné zvětrání cementovaných pískovců

Výsledné tvary pro zatížené krychličky cementovaných pískovců

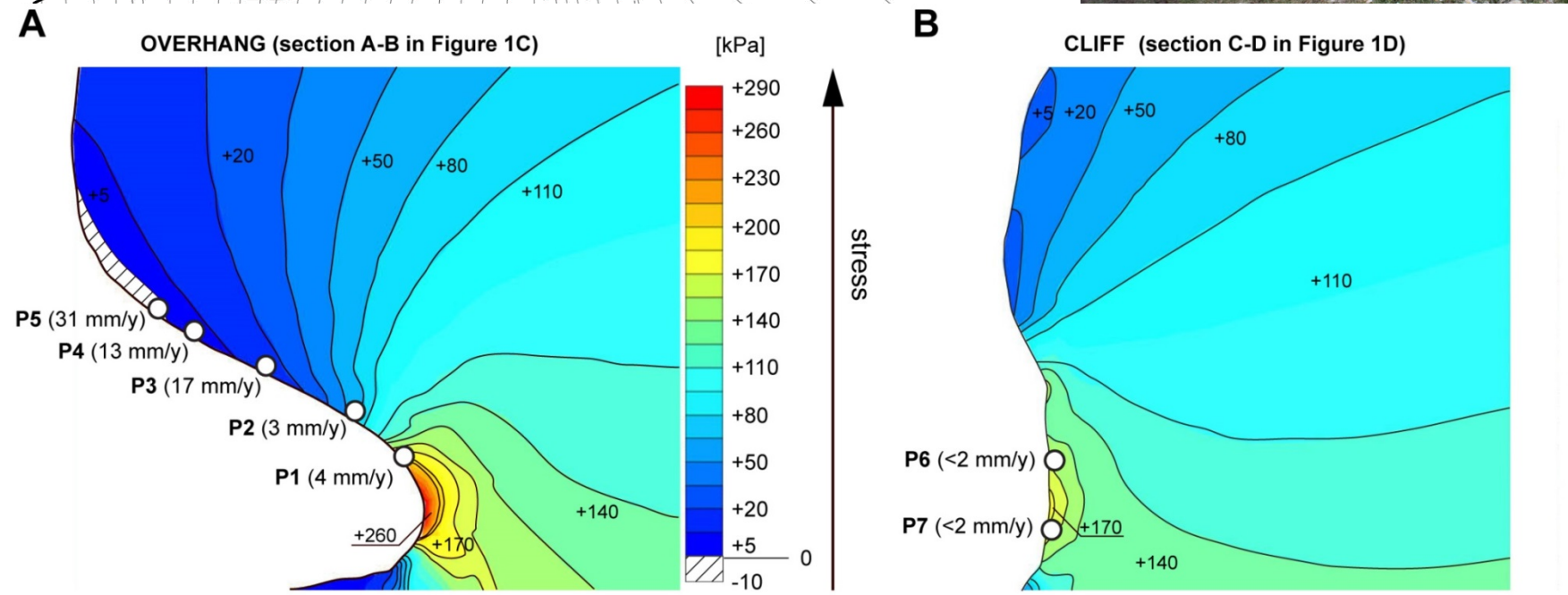


Rychlé a napětím kontrolované mrazové zvětrání

- Ústup stěny převisu je výrazně rychlejší tam, kde je u povrchu nízké napětí a naopak



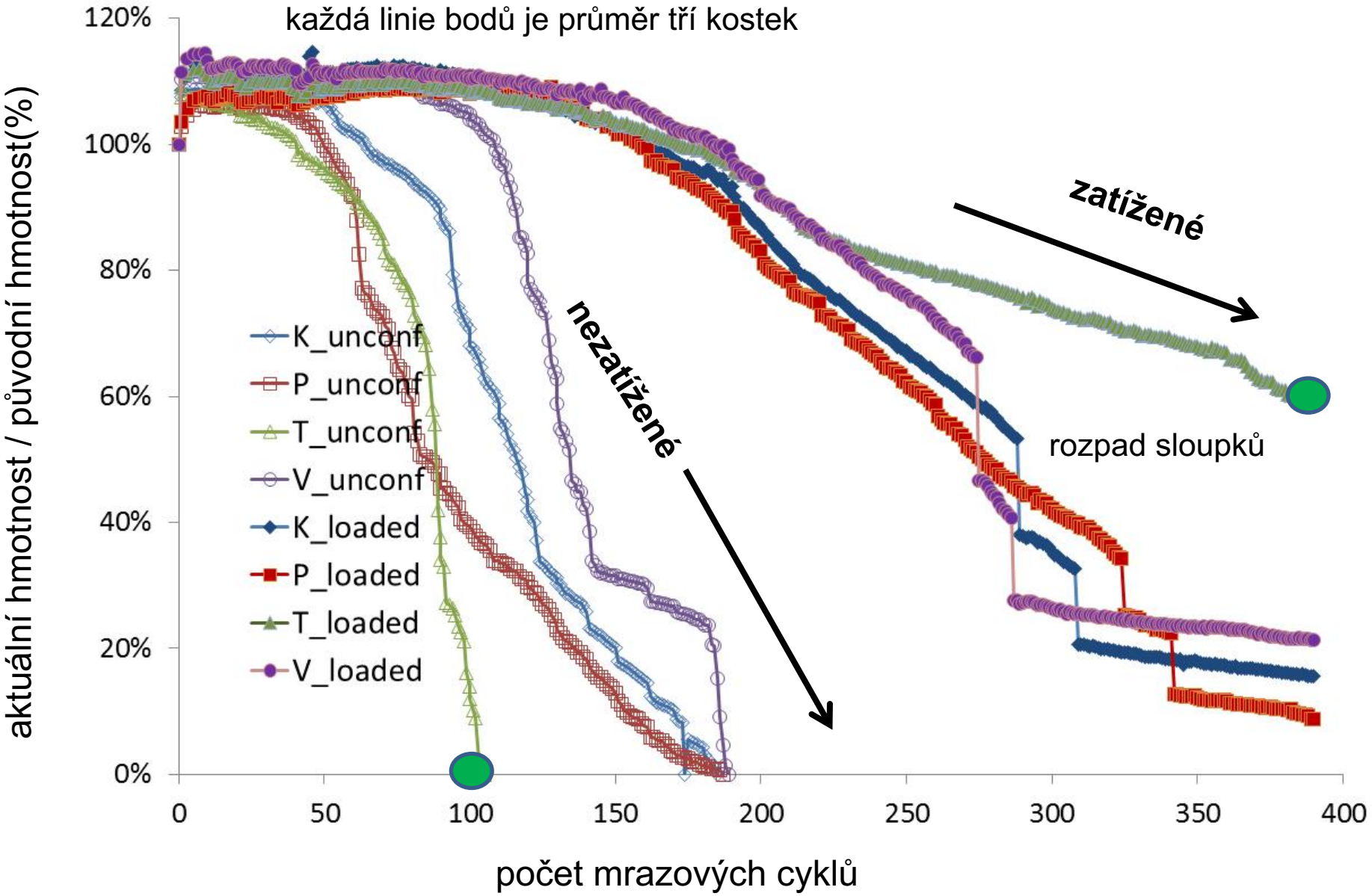




Legend: ○ positions of fiberglass pegs **P1** (4 mm/y) erosion rate on fiberglass pegs ▨ area, where rock is in tension (negative stress)

Mrazové zvětrání cementovaných pískovců

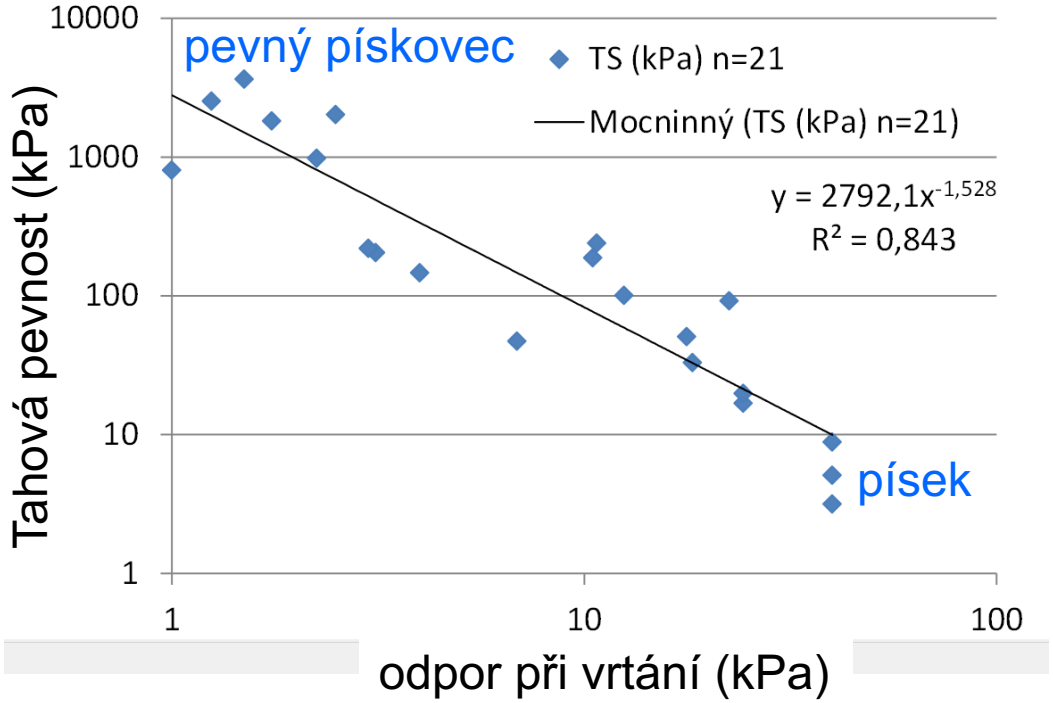
• Účinnost mrazového zvětrání klesá pokud jsou kostky zatížené



Jak se z pevného pískovce stane uzamčený písek?

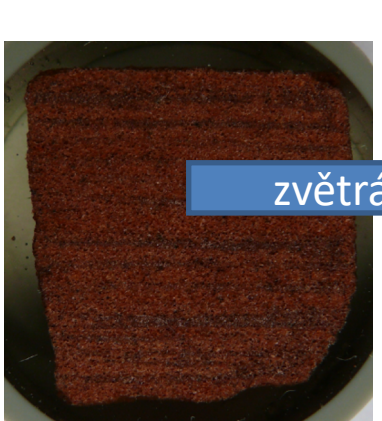
- pevnost hornin na povrchu klesá o 4 řády díky zvětrání

- cementované pískovce se rozpadají na povrchu na zrna a šupiny jejichž vlastnosti jsou podobné jako u uzamčeného písku

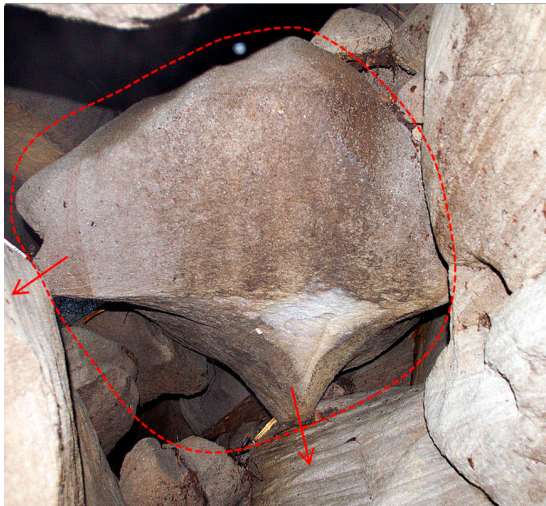




- nízké stlačení vysvětluje rychlý rozpad malých kamenů pískovce v řadě oblastí na světě

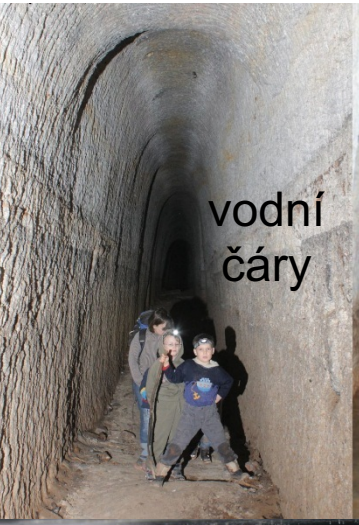






Hosín a Nevřeň, příklady dalších uzamčených písků (křída a permokarbon)

-jdou tesat motykou a na povrchu se rychle rozplavují ale v podzemí vydržely bez výztuhy přes 130 let a to i při úplném zatopení chodeb
-nestlačený písek se okamžitě ve vodě rozpadá ale stlačený drží věčně





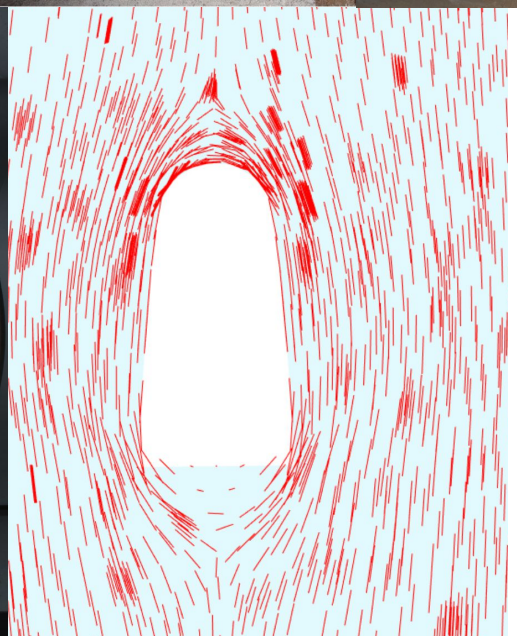












Uzamčená písek z Kaapsehoop, Jihoafrická republika



-uzamčené písky a měkké pískovce nejsou vzácné
-příklad Black Reef Quartzite (2,2-2,5 miliardy let staré)
-v uzamčeném písku přecházejícím do křemence se tvoří vyklenuté stropy
-uzamčení lze testovat v ruce





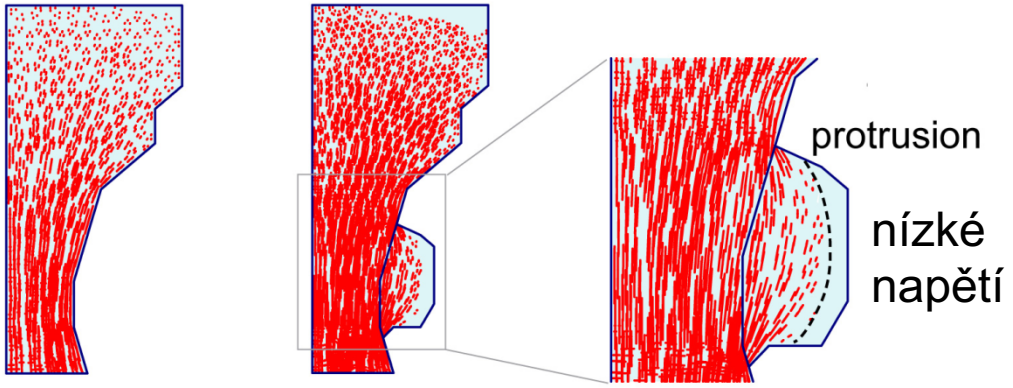


Jednotný mechanismus ale rozdílné počáteční anebo okrajové podmínky



- Negativní zpětná vazba mezi napětím a erozí znamená, že jak roste zatížení na jednotku plochy, klesá rychlost eroze

- Nosné prvky jsou zatížené a proto jsou erodovány velmi pomalu. Nenosné části (balast) jsou erodovány rychle. **Pískovcová forma se tak samovolně zbavuje balastu, který ohrožuje její stabilitu**



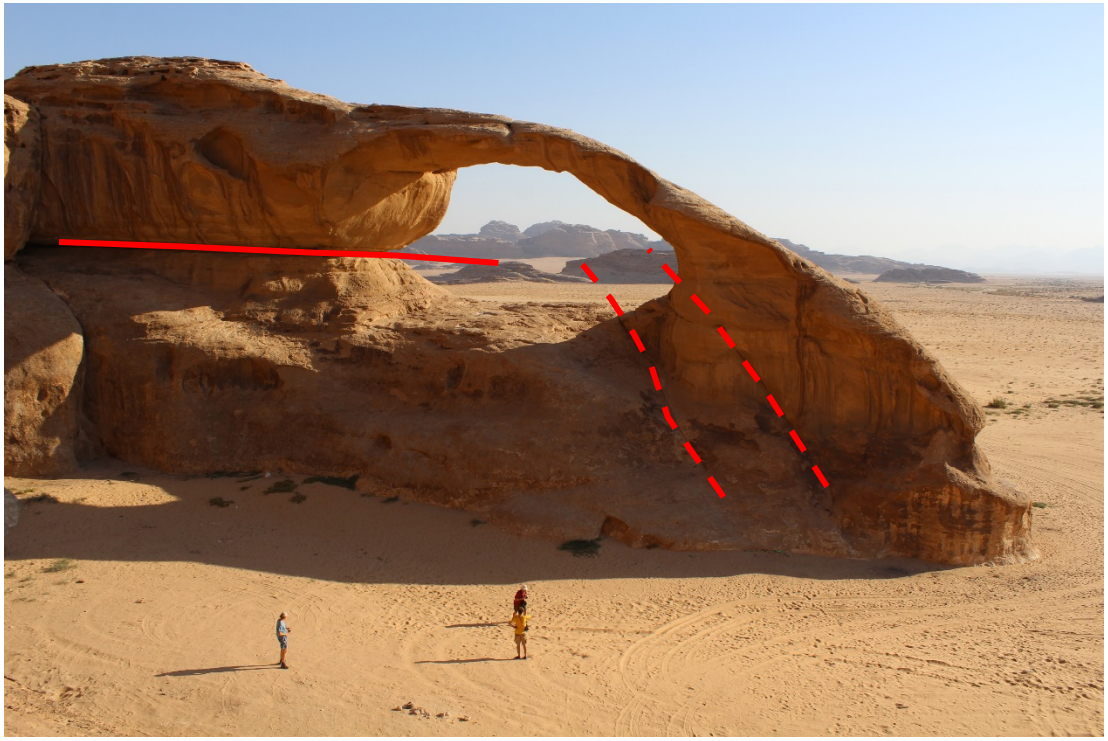
- Plošné diskontinuity (pukliny, jílové horizonty) deformují pole napětí do oblouků; proto klenbové tvary v pískovcích tak časté

- V každé pískovcové oblasti jsou diskontinuity specificky uspořádané, proto žádné dva pískovcové tvary nebývají zcela stejné

Vliv ukloněných puklin na vznik skalních bran

Příklad: Jordánsko

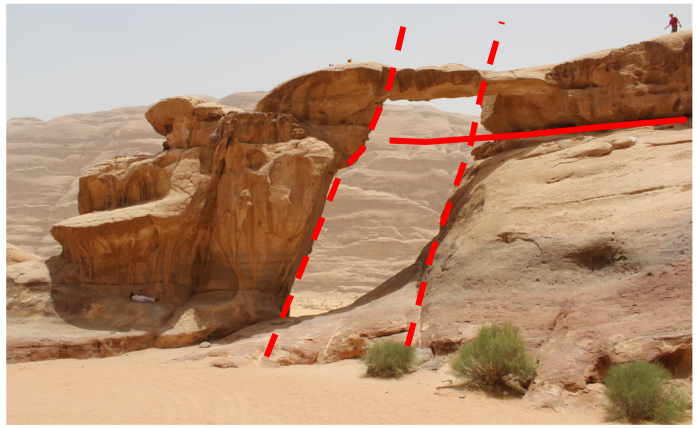
Disi sandstone



Rock arch # 1 of Jebel al Kharaz

Rock arch # 2 of Jebel al Kharaz

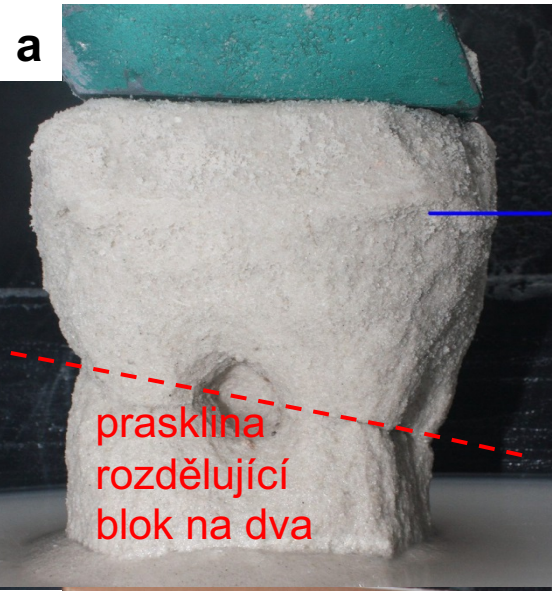


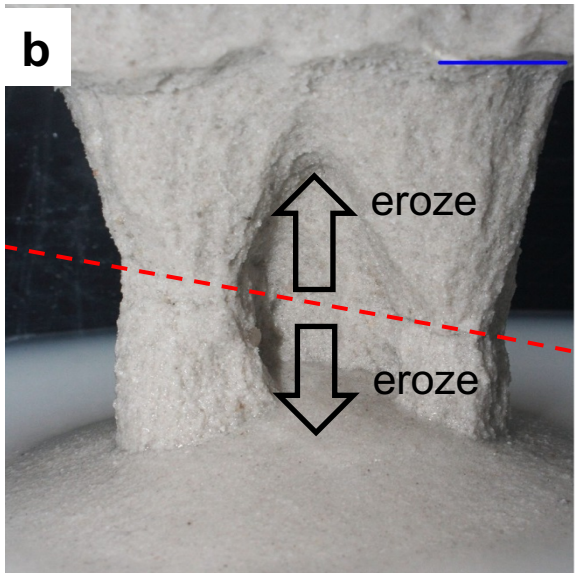


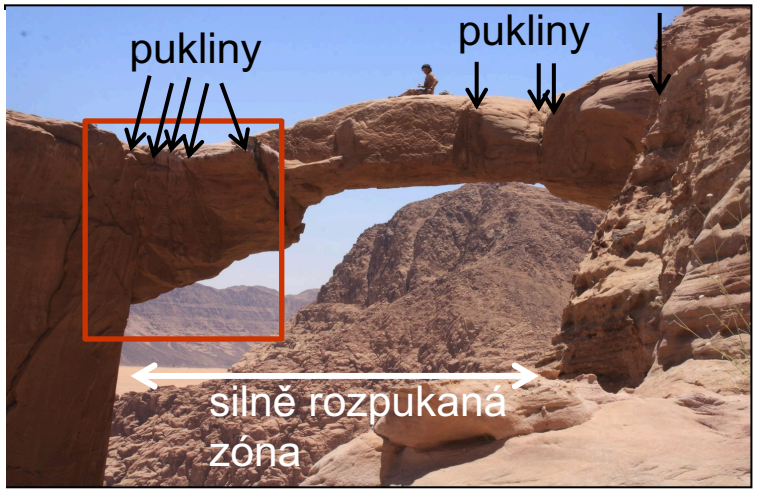
Um Frouth rock bridge

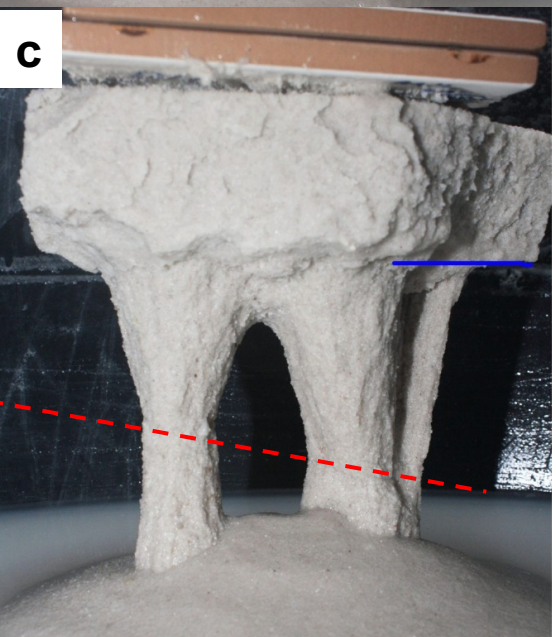
Fyzikální modelování: pukliny redistribují napětí

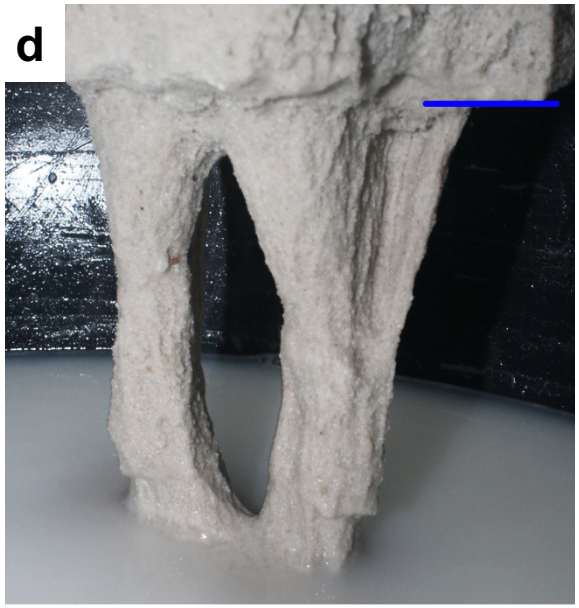
- sloupky se iniciují vytvoří na horizontální puklině, eroze propaguje vertikálně
- jak se zmenšuje šířka sloupků roste v nich napětí z nadloží, eroze se může zastavit

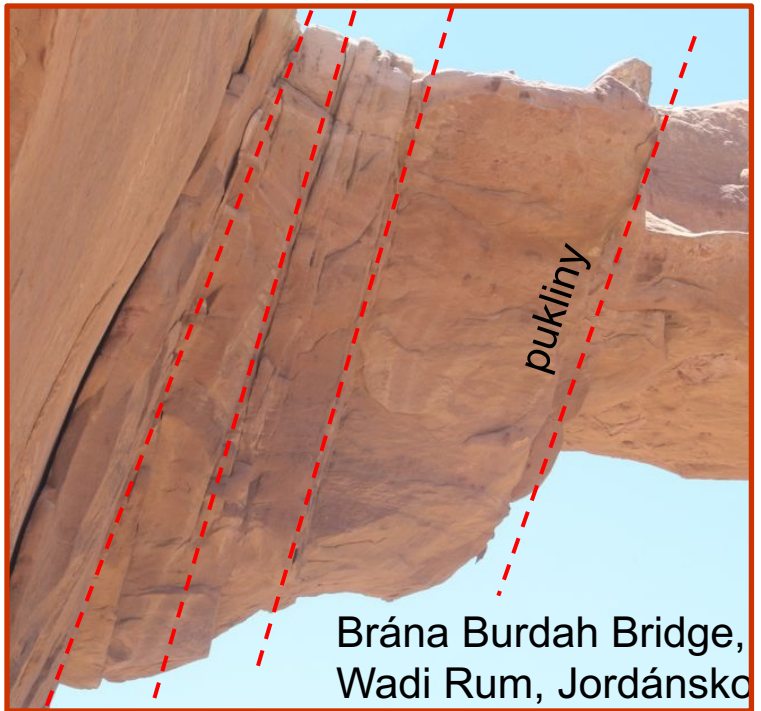












Horizontální plošné diskontinuity a vznik bran (USA - Utah)



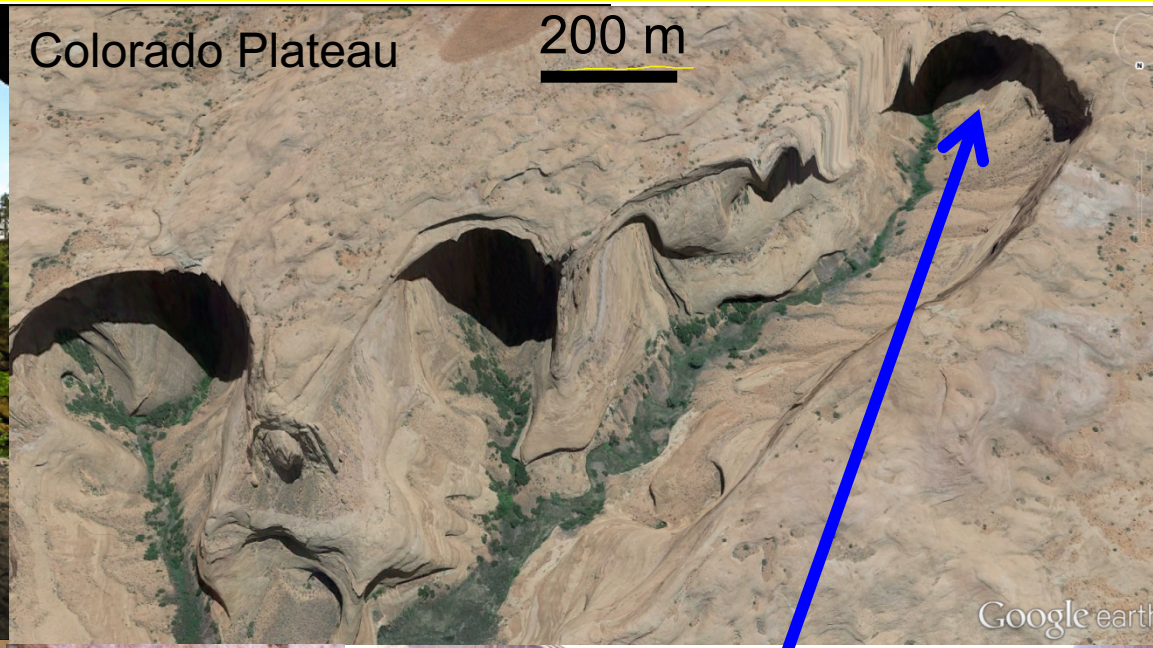


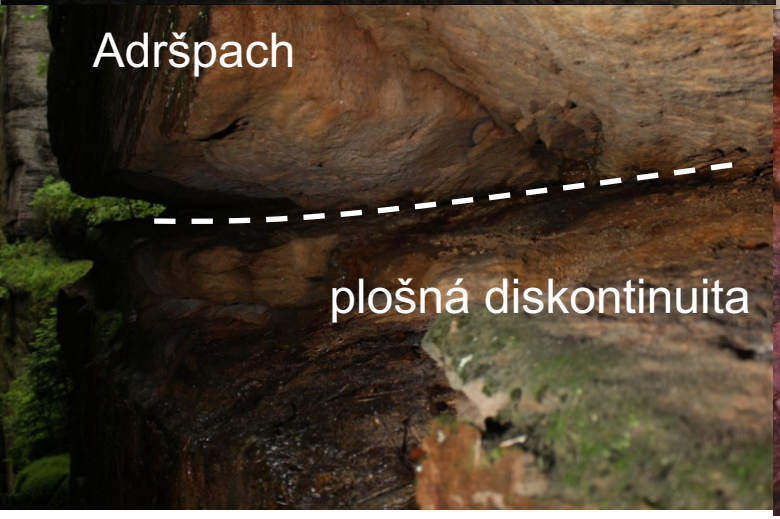


Zvlněná diskontinuita deformuje napěťové pole

Plošné diskontinuity deformují napěťové pole –kontrolují erozi pískovce











- Diskontinuity – otevřené trhliny a rychle zvětrávající horizonty, zejména jíl a prachovce
- Napěťový stín (nízká úroveň napětí) okolo diskontinuity vede k zvětrání jinak odolného pískovce

Jsou tyto formy jen v pískovci?

• pravděpodobně v jakémkoli materiálu, který má **uzamčenou strukturu** a rozpadá se na zrna či úlomky (zvětrávající brekcie, zvětralá žula, apod.).

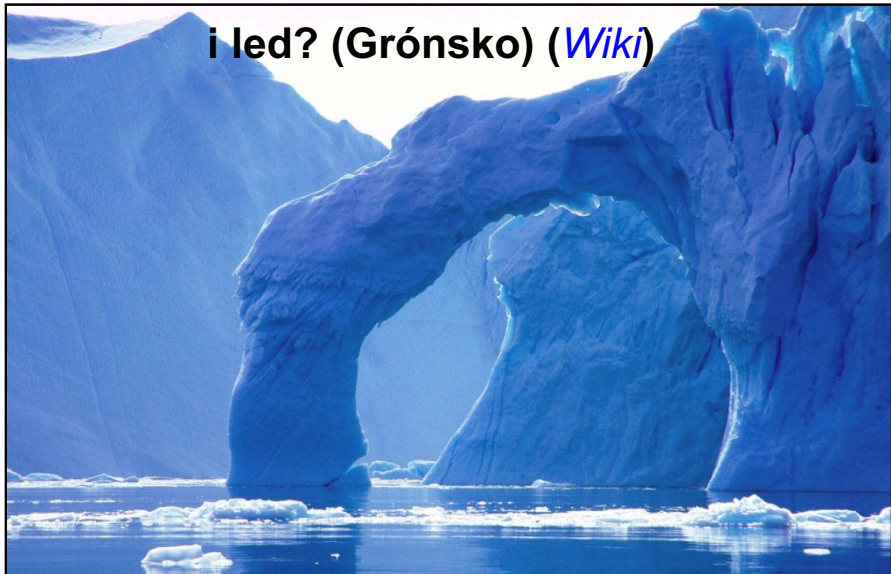


detail









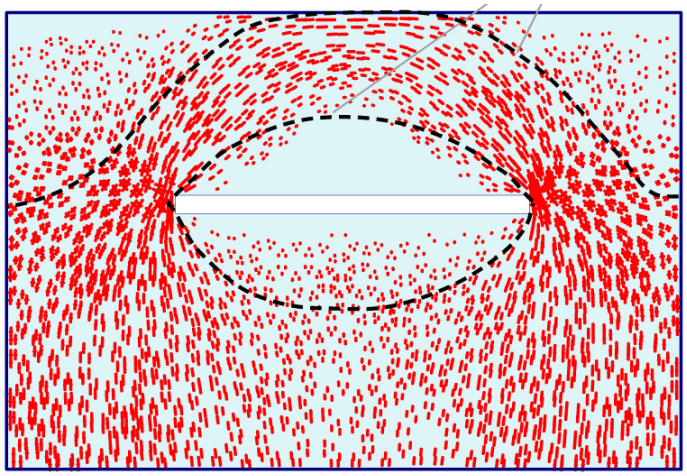
Nová perspektiva pro rozklíčování vývoje pískovcových skalních forem

Máme dvě možnosti jak na vznik pískovcových forem pohlížet:



1) Zařadit vliv napětí pod selektivní zvětrání (tradiční pohled, nepomůže porozumět procesu)
2) Rozdělit komplikovanou interakci na kaskádu faktorů a procesů:

Fyzikální pole (napětí)- **propojuje** miliardy zrn do jediného systému – pískovcového útvaru



Počáteční a okrajové podmínky – dávají tvar a intenzitu fyzikálnímu poli a tím i útvaru

Zpětná vazba - propojuje faktory a udává **směr procesu**:

Zvětrávací a erozní procesy (déšť a splach, mrazové a solné zvětrání)
- pouhé nástroje, účinkují tam, kde jim to napěťové pole dovolí

- **různé erozní a zvětrávací procesy vytváří stejný tvar** pokud fyzikální pole, počáteční a okrajové podmínky, zpětná vazba a plocha působení zvětrávacího procesu je stejná

Závěry

✓ Pískovcové formy se poprvé podařilo vytvořit fyzikálním modelováním za kontrolovaných podmínek, procesy, které reálně v přírodě probíhají

✓ Zvýšení horninového napětí na povrchu pískovce je schopno výrazně snížit rychlost solného a mrazového zvětrání a zastavit erozi deštěm a povrchovým splachem.

✓Negativní zpětná vazba mezi napětím a erozí(zvětráním) je zřejmě nejdůležitějším principem, který vytváří unikátní pískovcovou morfologii v různých národních parcích světa a tedy definujícím principem (tím co definuje co je pískovcový reliéf)

✓ Příroda vytváří často komplikované vzorce pomocí velmi triviálních principů, tak jednoduchých a nenápadných že často až unikají pozornosti



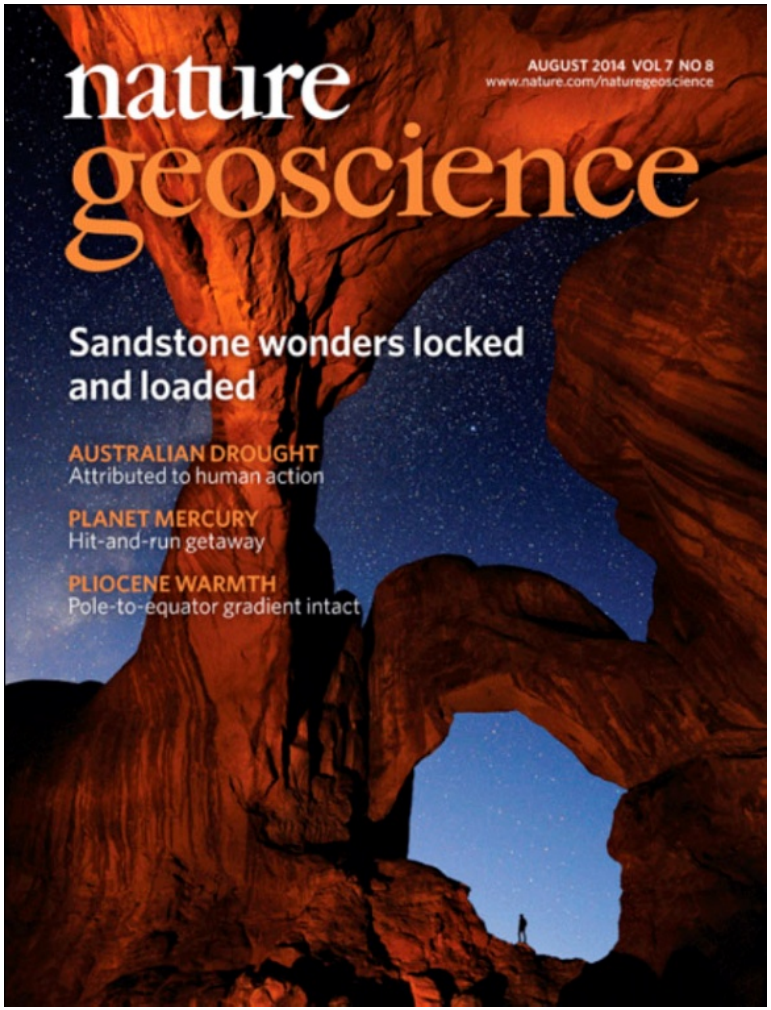


Děkuji za pozornost

Autoři studie děkují vedení a pracovníkům akciové společnosti Sklopísek Střeleč a.s. (jmenovitě řediteli P. Hübnerovi a vedoucímu útvary těžby L. Horákovi) a také D. Smutkovi za umožnění dlouhodobého terénního výzkumu v lomu.
Marku Janáčovi (vesmir.cz) děkujeme za poskytnutí videí, popularizaci tématu a další pomoc

Tento výzkum byl podpořen grantem Univerzity Karlovy (grant GAUK 380511,) a granty GAČR 13-28040S a 16-19459S, dále podporou rozvoje výzkumné organizace RVO 68378297, RVO 67985831.

Radami, fotografiemi a konzultacemi a další pomocí přispěli (abecedně):
J. Adamovič, M. Atman, M. Audy, J. Boháč, G.T. Carlig, V. Cílek, V. Erban T. Fischer, O. Jäger, D. Jakoubková, J. Jakovenko, R. Mikuláš, J. Mls, M. van Oosten, L. Palatinus, A.N. Palmer, J. Patzelt, M. Sluka, V. Sojka, D. Tingey, J. Válek, K. Žák a další



Poprvé dobře podložený názor na vznik těchto jevů

nature International weekly journal of science

Home | News & Comment | Research | Careers & Jobs | Current Issue | Archive | Audio & Video | For Aut

News & Comment › News › 2014 › July › Article

NATURE | NEWS

Sandstone arches form under their own stress

Downward pressure and erosion combine to create celebrated rock formations.

Richard A. Lovett

BBC News Sport Weather Capital Future Sho

NEWS SCIENCE & ENVIRONMENT

Home | UK | Africa | Asia | Europe | Latin America | Mid-East | US & Canada | Business | Health | Sci/Enviro

21 July 2014 Last updated at 08:23 GMT

Share

Sandstone shapes 'forged by gravity'

By Jonathan Webb
Science reporter, BBC News



FT Magazine

Home | UK | World | Companies | Markets | Global Economy | Lex | Comment

Arts | Magazine | Food & Drink | House & Home | Lunch with the FT | Style | Books | Pursuits

August 8, 2014 4:48 pm

Geology: an arching theory of rock erosion

By Clive Cookson

Share | Author alerts | Print | Clip | Comments



A formation in Arches National Park, Utah

Geologists have long sought to explain the remarkable landforms such as arches, alcoves and pillars that are shaped by the weathering and erosion of sandstone, though there has been no consensus about the main mechanisms involved. Now, after extensive experiments eroding sandstone in the laboratory, a Czech team has published a scientific paper that seems to solve the problem.

How the heck is this still standing? That's probably the question heard most often at Arches National Park. The second? **How did it form?** (http://www.calacademy.org/)

-věda uznává důkazy, ne nepodložená tvrzení