



Změny mechanických vlastností hornin v důsledku vysokých teplot a lesních požárů

Případová studie z Českého Švýcarska a celorepublikové vyhodnocení čtyř litologických skupin

Jan Blahůt¹ • Ghazaal Rastjoo^{1,2} • Ondřej Racek¹ • Xuan-Xinh Nguyen¹ • Artem Polezhaev^{1,2} • Diana Usmanova² • Marco Loche¹

¹Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., Oddělení aplikované mechaniky hornin, Praha

²Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užité geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Praha

blahut@irms.cas.cz

Zvyšující se pravděpodobnost lesních požárů v ČR vyvolává otázku změn vlastností skalních hornin

Klimatický a ekologický kontext

Nárůst sucha a teplot: Klimatické modely predikují pro oblast střední Evropy častější vlny veder a dlouhodobá sucha.

NP České Švýcarsko (2022): Historicky největší zdokumentovaný požár v ČR zasáhl plochu **1 000 hektarů**.

Extrémní teplotní anomálie: Léto 2022 bylo v regionu o **2,7 °C** teplejší než dlouhodobý průměr, s dlouhým nedostatkem srážek.

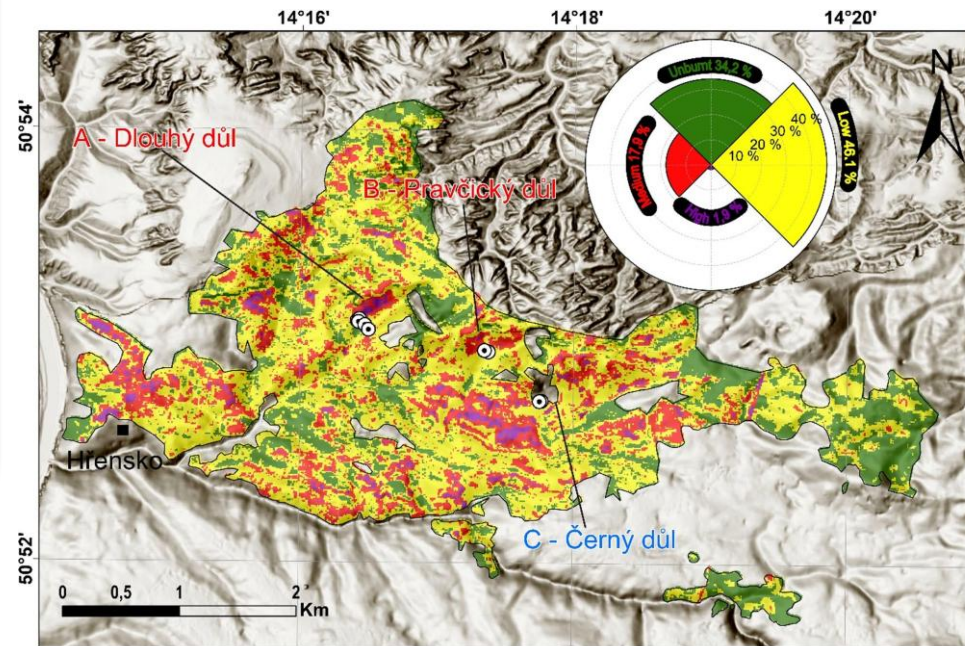
Kůrovcová kalamita: Masivní odumírání smrkových porostů vytvořilo obrovské zásoby suchého dřeva, které podpořilo šíření ohně.

Geotechnické a geomorfologické dopady

Tepelný šok výchozů: Přímý kontakt skály s ohněm vyvolává extrémní teplotní pnutí na povrchu horniny.

Odlupování pískovců (Spalling): Hlavní mechanický projev poškození skal – tvorba šupin a odpadávání materiálu.

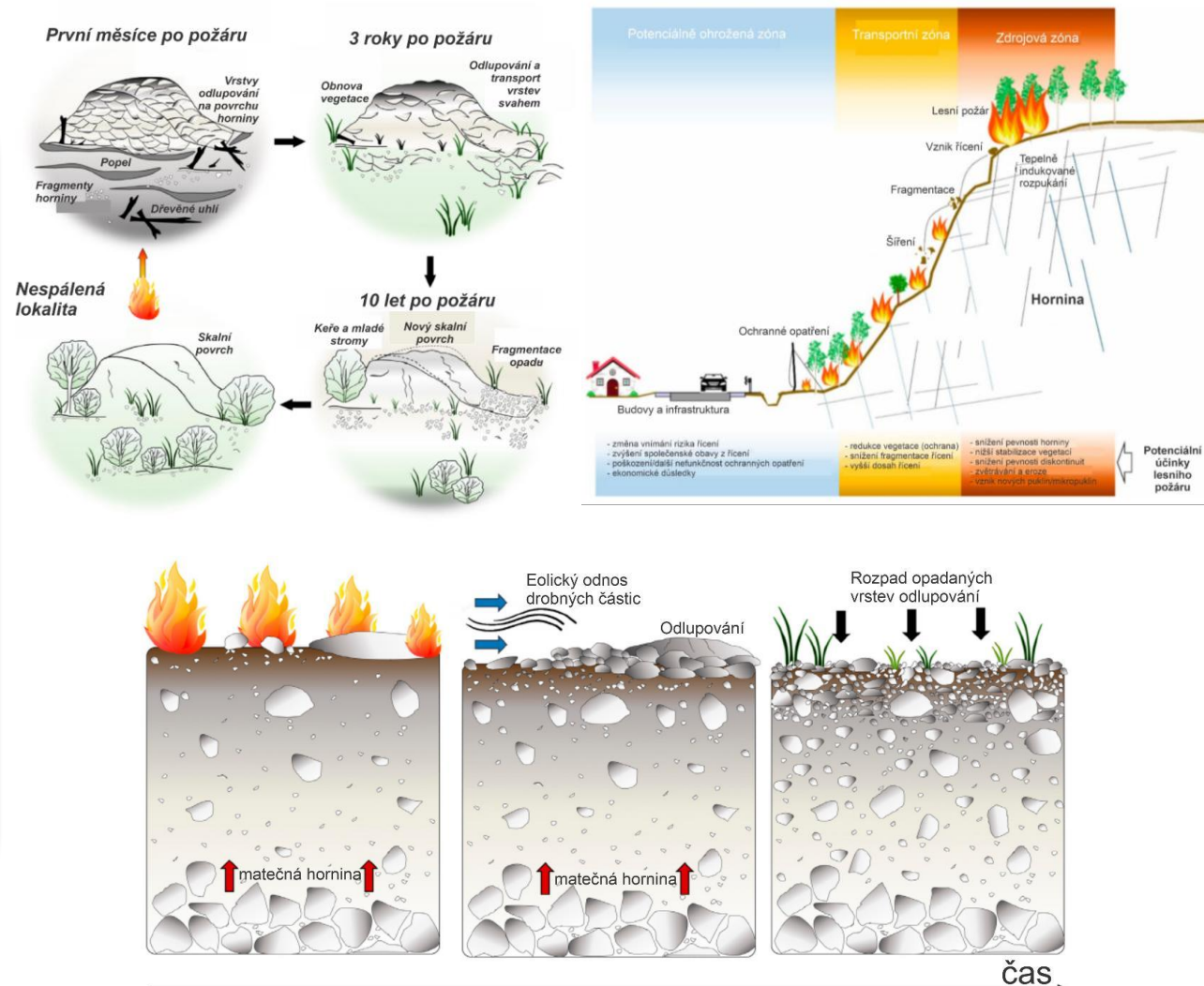
Sekundární vlivy: zvýšená eroze, možnost skalního řícení



Loche et al. (2026)

Změny skalních svahů po požáru – rešerše literatury

- Odlupování/spalling
- Urychlení exfoliace
- Přípovrchový opad
- Změna pevnosti a elasticity horniny
- Zvýšení fragmentace
- Snížení tlakové a smykové pevnosti diskontinuit
- Vznik mikrotrhlin
- Rozšíření stávajících puklin
- Zvýšení účinnosti regulačních cyklů
- Dehydratace
- Dekarbonizace
- Roztavení nebo úplné vypálení určitých minerálů
- Změna tvaru kontaktních ploch minerálů
- Přeměna minerálů
- Únik plynu z hornin
- Urychlení zvětrávání



Shtober-Sisu a Wittenberg (2021)

Případová studie NP České Švýcarsko: odběr pískovců v zasaženém území

Terénní průzkum a odběr vzorků

Odebráno 37 (48) návrťů

- Dlouhý důl: 13 (22) návrťů
- Pravčický důl: 12 (14) návrťů
- Černý důl: 12 (12) návrťů
- Silně zasažené: 23 návrťů
- Středně zasažené: 6 návrťů
- Nezasažené: 13 návrťů

Použito celkem 37 horizontálních jader o průměru 100 mm

Metodická integrace: Kombinace nedestruktivního ultrazvukového měření s destruktivními zkouškami pevnosti.

Petrografická charakteristika křemenného pískovce

Složení: Dominantně **křemenná zrna (90 %)**, slabě vytříděná, středně až hrubozrnná.

Pórovitost: Velmi vysoká **efektivní pórovitost (16 až 27 %)** v čerstvém stavu.

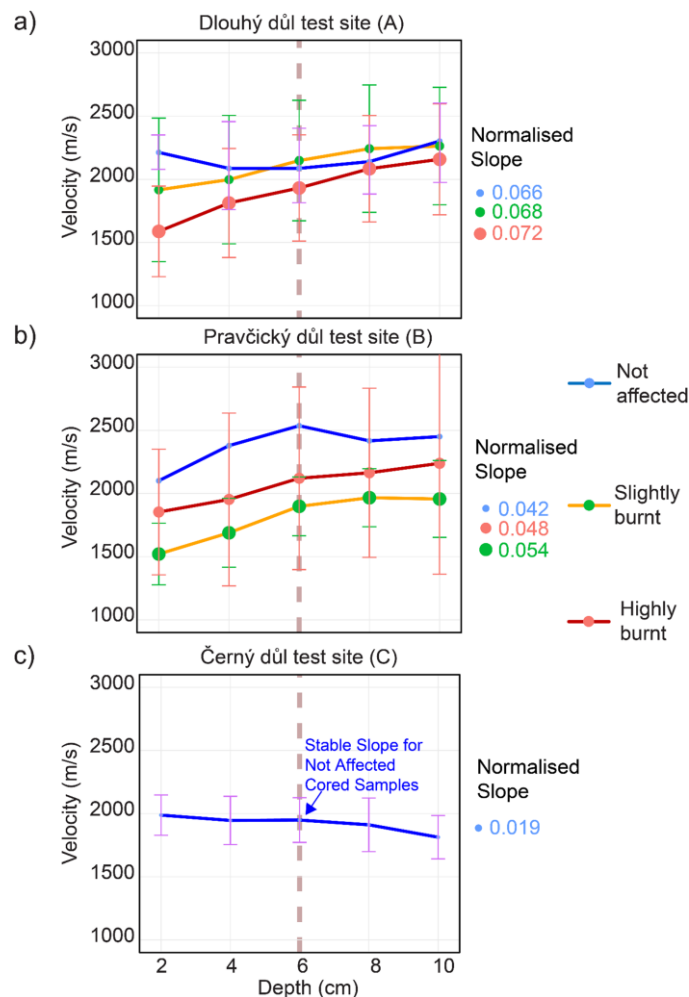
Tmel a matrice: Kaolinit, illit, slídy a lokálně železitý tmel (goethit, Fe-illit) koncentrovaný zejména v Dlouhém dole (vliv Kobylského basaltového vrchu).

Barevné projevy: Výrazné **zčervenání** povrchu skály vyvolané dehydratací goethitu na hematit při teplotách nad 300 °C.



Prozařování 100 mm vrtných jader – pískovce z NP České Švýcarsko

- Jádra vysušena 24h/105°C
- Měření rychlosti podélných vln (V_p)
- 10 bodů kolmo ke směru vrtání
 - 5 bodů od povrchu
 - 5 bodů v hloubce
- Cíle
 - Změna rychlosti s hloubkou
 - Porovnání rychlostí povrch x hloubka



Změny rychlosti vln s hloubkou: U zasažených lokalit Dlouhý důl (A) a Pravčický důl (B) se rychlost vln V_p strmě snižuje směrem k povrchu.

Kontrolní lokalita (Černý důl): Vykazuje zcela lineární a vodorovný průběh, rychlost vln se s hloubkou nemění (normalizovaný sklon $\sim 0,019$).

Hranice tepelné degradace: Analýza stanovila hloubkový dosah přirozeného požáru na přibližně 6 cm.

Mechanické zkoušky

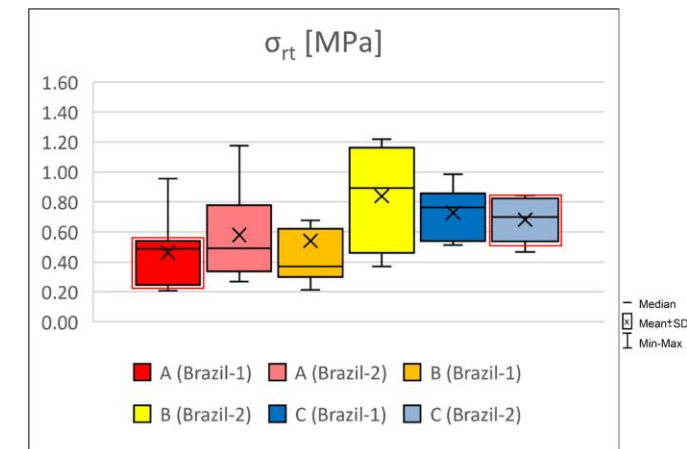
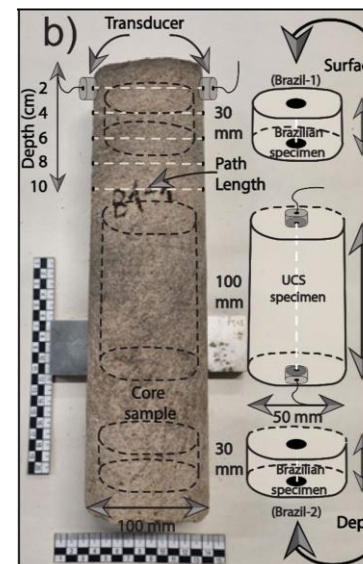
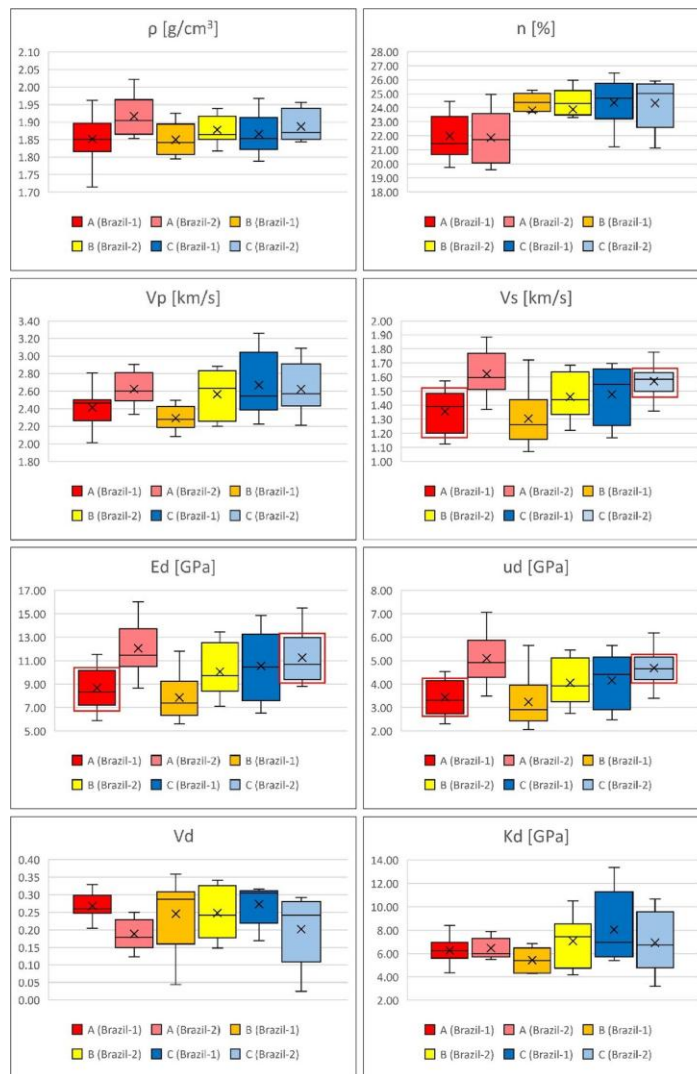
Rozřezání jader pro zkoušku v příčném tahu (BTS):

- **Brazil-1 (Povrchové):**
Odebráno z hloubky cca **1,0 až 3,5 cm** od povrchu vystaveného požáru.
- **Brazil-2 (Hluboké):**
Odebráno z hloubky cca **14 až 16,5 cm** (kontrolní, nezasažená zóna).

Zkoušky v prostém tlaku (UCS):

- Válcové vzorky odebírány z hloubky cca **4 až 14 cm**.

Výpočet dynamických elastických modulů



Loche et al. (2026)

Zkoušky v prostém tlaku (UCS) neprokázaly statistické rozdíly mezi lokalitami, protože vzorky byly odebírány z hloubky 4–14 cm, kam teplo neproniklo, nebo jen částečně.

Zkouška v tahu (BTS): Zkušební tělesa z povrchu (Brazil-1) vykazují prokazatelný propad pevnosti v tahu a elasticity (E_d) oproti kontrolní hloubce (Brazil-2).

Materiál má daleko k „ideální hornině“ – problémy s testováním

Vliv teplotního šoku na různé typy hornin v Česku

Cíle výzkumu: Výzva MŽP – Projekt TAČR

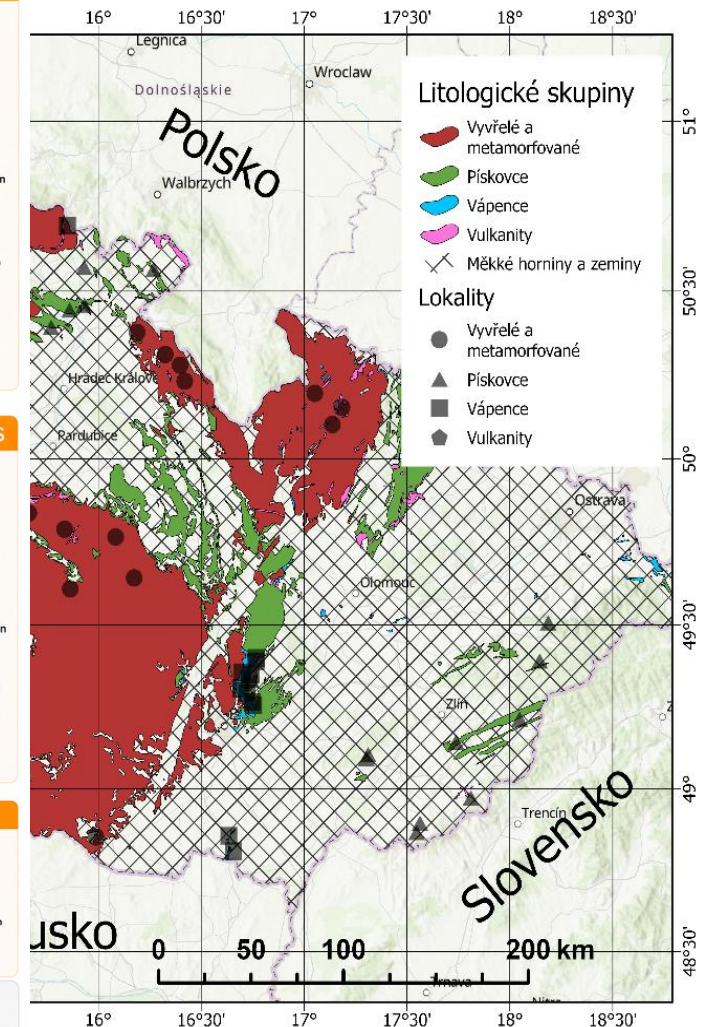
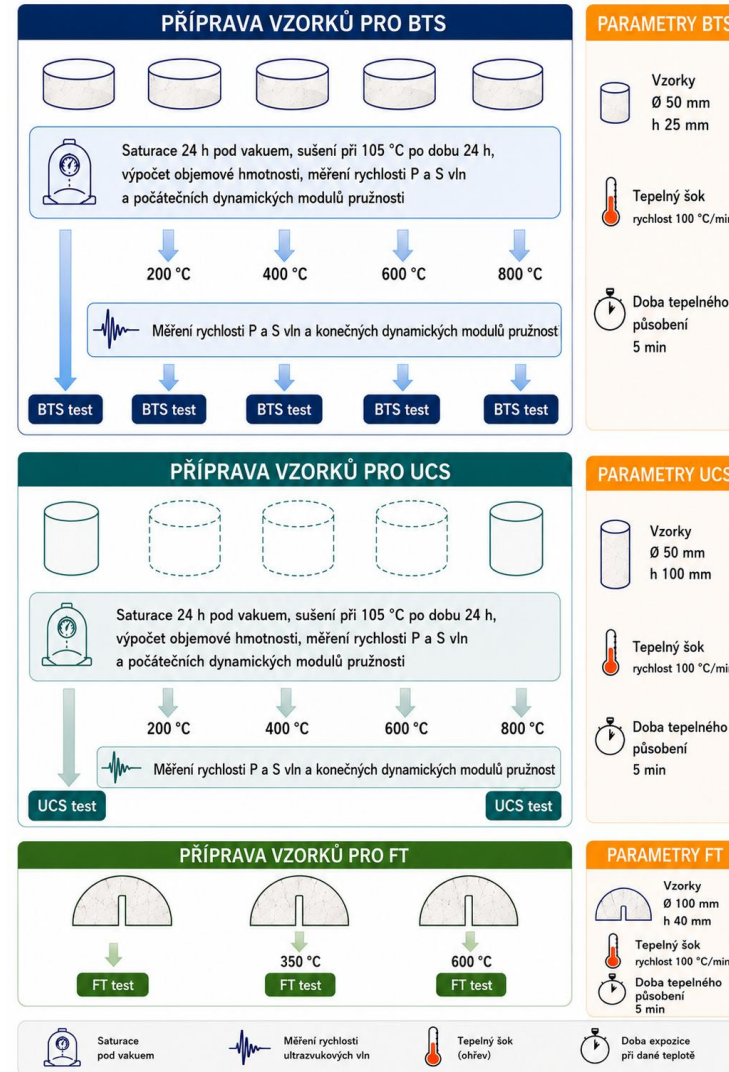
Rozsah souboru: Odebrány vzorky ze **137 různých lokalit** napříč ČR

Připraveno celkem 1370 zkušebních těles (685 pro BTS, 274 pro UCS a 411 pro zkoušky lomové houževnatosti FT).

Zkoumané litologické skupiny:

1. **Vyvěřelé a metamorfované:** žuly, ruly, fylity, migmatity. (52 lokalit)
2. **Pískovce:** většinou křídové (35 lokalit)
3. **Vápence:** vápence Českého a Moravského krasu (25 lokalit)
4. **Vulkanity:** Terciární bazalty, trachity, znělce (25 lokalit)

79 lokalit v CHKO a NP



Vzorky UCS a BTS

Měření akustické odezvy (UPV):

Vyvřelé a metamorfované horniny – Vykazují **nejstřmější propad rychlostí** nad 400 °C. Při 800 °C klesá rychlost P a S vln na pouhých **40–60 %** původní hodnoty.

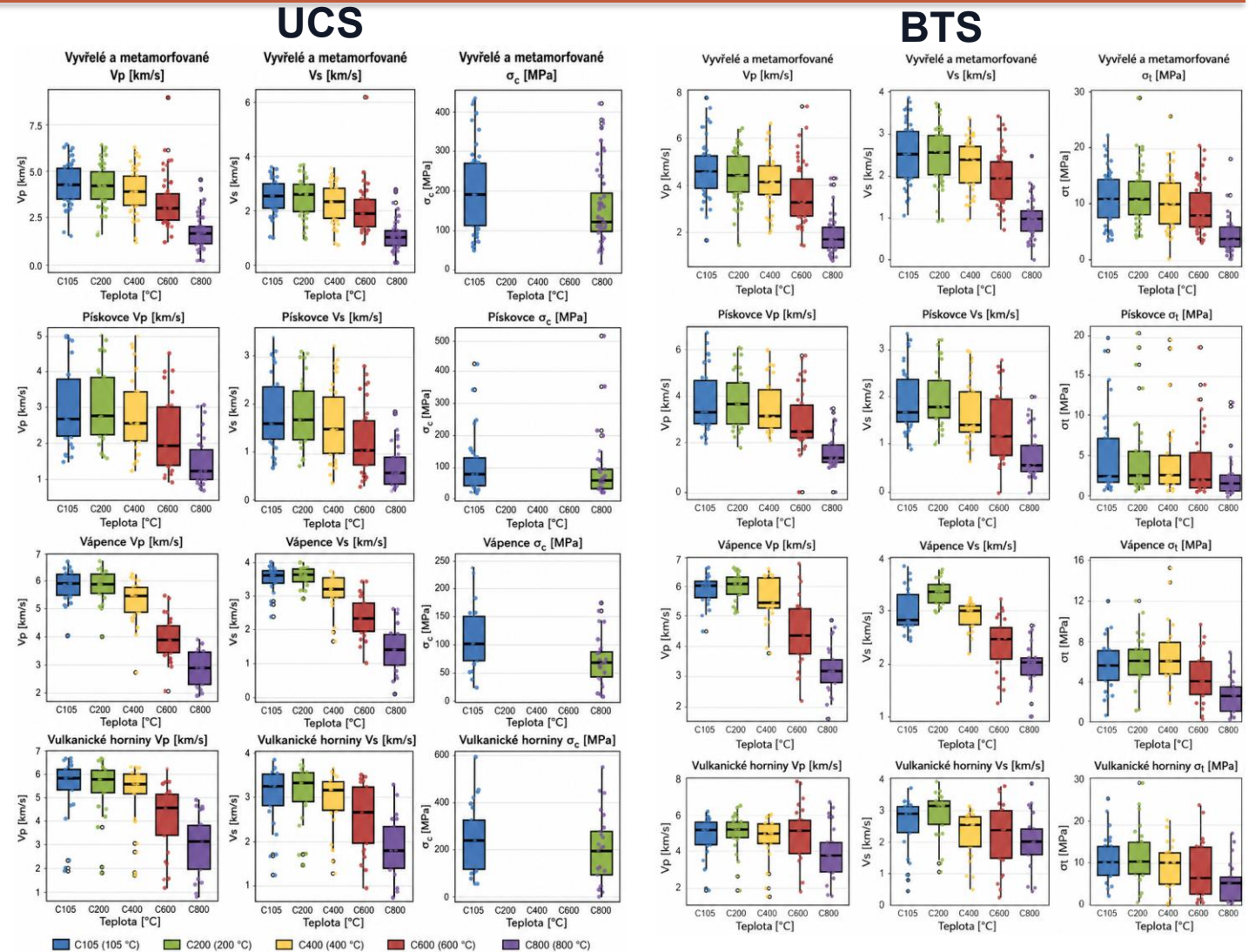
Pískovce – Jsou stabilní do 200 až 400 °C. Nad 400 °C dochází k plynulému poklesu na **50–70 %** původní rychlosti.

Vápence – Pokles podélných vln Vp je mírnější, příčné vlny Vs ale vykazují mnohem citlivější strmý pokles nad 400 °C.

Vulkanické horniny – Vykazují **vysokou heterogenitu a nepravidelný průběh**.

Destruktivní zkoušky (BTS a UCS):

- **Vyvřelé a metamorfované:** Drastický kolaps pevnosti v tahu z ~10 MPa na < 2 MPa při 800 °C.
- **Pískovce:** Pokles ze ~3-4 MPa na ~1 MPa při 800 °C.
- **Vápence:** Zcela stabilní do 400 °C (nad 400 °C kolaps o 40–50 %).
- **Vulkanity:** nejvíce stabilní, ale velká iniciální heterogenita, při 800 °C pokles o 40 %.



Mikrostrukturní mechanismy: Rozdíly v chování žuly a pískovce

Magmatity a metamorfity (Žuly / Ruly)

Nízká iniciální pórovitost (< 1 %): Velmi těsná krystalická vazba minerálních zrn bez volného prostoru.

Nesoulad tepelné roztažnosti: Různé minerály (křemen, živce, slídy) expandují při ohřevu odlišným tempem a směrem.

Masivní intergranulární trhání: Rozdílná expanze generuje extrémní pnutí na hranicích zrn a vyvolává vznik husté sítě mikrotrhlin.



Křemenné pískovce

Vysoká iniciální pórovitost (16–27 %): Vnitřní prostor vyplněný kaolinitovou/jílovitou matricí.

Póry jako "tlumící polštář": Expandující krystaly křemene mají prostor růst přímo do volných pórů, aniž by docházelo k drcení intergranulárních vazeb.

Dočasné zpevnění do 200 °C: Zvýšení vlnových rychlostí je způsobeno uzavíráním mikropuklin teplotní roztažností zrn a vypálením/spečením (sintrací) jílovité matrice.



Mechanismy u vápenců a vulkanitů: Dekompozice kalcitu a kontrakční pukliny

Vápence

Rovnoměrná expanze kalcitu: Vysvětluje vysokou mechanickou stabilitu a minimální změny v pevnosti BTS do 400 °C.

Chemická dekompozice (>400–500 °C): Nastává tepelný rozklad kalcitových a dolomitových fází za uvolňování plynného CO₂.

Zvětšování pórů (Pore enlargement): Chemický rozklad uvolňuje vazby, rozšiřuje póry a generuje husté mikrotrhliny.

Smyková citlivost Vs vln: Příčné vlny Vs reagují na vznik smykových trhlin mnohem strmějším poklesem než podélné vlny Vp.

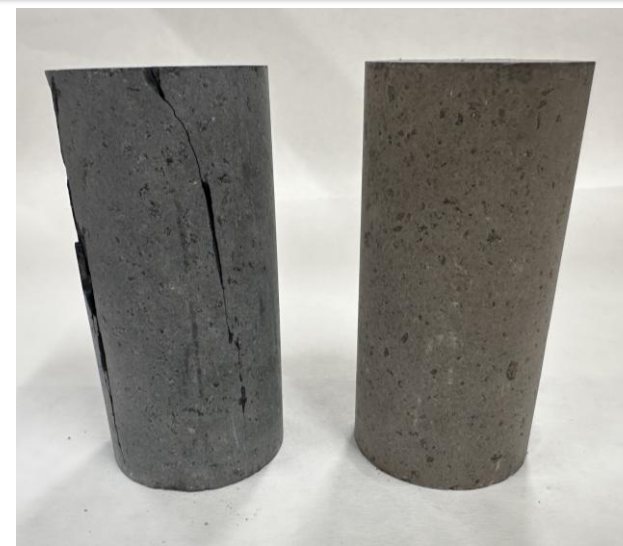


Terciární vulkanity (Bazalty / Trachity / Znělce)

Vysoká vnitřní heterogenita: Struktura tvořená krystalickými vyrostlicemi (phenocrysts) vnořenými do amorfnní skelné hmoty.

Tahová kontrakční napětí: Smršťování při chladnutí generuje silná tahová pnutí, která se v horninovém prostředí šíří mnohem agresivněji než tlaková.

Propad pevnosti v tahu (BTS): Vznik kontrakčních puklin vede k plošnému oslabení a poklesu BTS o 40 % při 800 °C.



Syntéza: Srovnávací přehled chování litologických skupin

Litologická skupina	Počáteční pórovitost	Pokles rychlosti vln (800 °C)	Pokles pevnosti BTS (800 °C)	Hlavní mechanismus poškození
Vyvěřelé a metamorfované	Nízká (0,5–5 %)	Strmý kolaps (na 40-60 %)	Prudký propad z ~10 MPa na < 2 MPa	Intergranulární mikrotrhání na hranicích zrn vlivem rozdílné expanze minerálů; alfa-beta transformace křemene.
Křemenné pískovce	Vysoká (16–27 %)	Pozvolný, plynulý (na 50-70 %)	Postupný pokles ze ~3-4 MPa na ~1 MPa	Póry tlumí růst zrn křemene; do 200 °C dočasné zpevnění uzavíráním puklin a spečením jílovité matrice.
Vápence	Velmi nízká (< 1,5 %)	Mírný u Vp (60-80 %), silnější u Vs (50-70 %)	Stabilní do 400 °C; pokles o 40-50 % při 800 °C	Rovnoměrná expanze kalcitu do 400 °C; nad 400–500 °C chemická dekompozice kalcitu za úniku CO ₂ .
Vulkanity	Nízká až variabilní (0,7–9 %)	Nepravidelný vývoj (40-80 % původní)	Prudký pokles o 40 % ze ~14 MPa na ~5 MPa	Rozhraní vyrostlic a skelné fáze; mikrotrhliny vznikají smršťováním při chladnutí (tahová kontrakční pnutí).

Závěry:

1. Požárem zasažené pískovce

Hloubka 6 cm: Oheň, resp. teplo proniká relativně mělce, což potvrdily ultrazvukové testy.

Povrchový spalling: Toto mělké poškození je však kritické – vyvolává bezprostřední odlupování šupin.

Snížení pevnosti v tahu (BTS): Zkušební tělesa z povrchu vykazují prokazatelné snižování pevnosti.

2. Laboratorní testování

Vysoké teploty vedou k výrazné, ale silně litologicky závislé degradaci hornin

Tepelné poškození není jednoduše lineární s teplotou

Predikce trhlin: Rychlý pokles Vs rychlostí slouží jako spolehlivý varovný indikátor.

3. Doporučení pro IG praxi

Po požárech nelze změny mechanických vlastností považovat za rovnoměrné

Lze doporučit využití **UPV testování hornin** pro nedestruktivní zjišťování jejich změn v kombinaci s destruktivními testy

Ze stabilitního hlediska je **zásadní pokles pevnosti v příčném tahu**, resp. lomové houževnatosti – je třeba se věnovat otevřeným diskontinuitám

Požár/teplotní šok je vhodné chápat nejen jako krátkodobý spouštěcí faktor, ale také jako **proces připravující horninový masiv k budoucímu porušení**. Pro post-fire hodnocení by proto měly být kombinovány rozsah a intenzita požáru, litologie, struktura horninového masivu, nedestruktivní měření změn v hornině a klasické hodnocení stability jednotlivých bloků.

A photograph of a forest landscape. In the foreground and middle ground, there are numerous dead, standing trees with charred, grey trunks. Some trees have white, peeling bark. Large, reddish-brown boulders are scattered across the ground and on a rocky slope in the background. The ground is covered with fallen branches, tree stumps, and some small green plants. The background shows a steep, rocky hillside with more dead trees. The overall scene suggests a forest after a fire or a natural disaster.

Děkuji za pozornost!