

ZMĚNY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ HORNIN V DŮSLEDKU VYSOKÝCH TEPLŮT A LESNÍCH POŽÁRŮ

CHANGES IN THE MECHANICAL PROPERTIES OF ROCKS DUE TO HIGH TEMPERATURES AND WILDFIRES

Jan Blahut¹, Ghazaal Rastjoo^{1,2}, Ondřej Racek¹, Xuan-Xinh Nguyen¹, Artem Polezhaev¹, Marco Loche^{1,2}

¹Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., V Holešovičkách 94/41, 182 09 Praha 8, e-mail:

blahut@irms.cas.cz

² Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Albertov 6, 128 43 Praha 2

Abstrakt: Tento příspěvek představuje výsledky rozsáhlé studie vlivu tepelného šoku na fyzikálně-mechanické vlastnosti hornin v České republice. Na vzorcích ze 137 lokalit, zahrnujících vyvřelé a metamorfované horniny, pískovce, vápence a vulkanity, bylo provedeno stupňované, rychlé a krátkodobé zahřátí až na 800 °C. Následně byly změřeny dynamické elastické moduly a provedeno celkem 685 zkoušek v příčném tahu, 274 zkoušek v prostém tlaku a 411 zkoušek lomové houževnatosti. Výsledky ukazují na progresivní změnu dynamických parametrů i pevnosti u zahříváných vzorků, ale i na heterogenní odezvu uvnitř i napříč litologickými skupinami.

Abstract: This paper presents the results of an extensive study of the effect of thermal shock on the physical and mechanical properties of rocks in the Czech Republic. Samples from 137 locations—including igneous and metamorphic rocks, sandstones, limestones and volcanic rocks—were subjected to step-wise, rapid, short-term heating up to 800 °C. Subsequently, dynamic elastic moduli were measured, and a total of 685 transverse tensile tests, 274 uniaxial compression tests, and 411 fracture toughness tests were performed. The results indicate a progressive change in the dynamic parameters and strength of the heated samples, as well as a heterogeneous response both within and across lithological groups.

Klíčová slova: pískovce, vápence, vulkanity, vyvřelé a metamorfované horniny, tepelný šok, fyzikálně-mechanické vlastnosti

Key words: sandstones, limestones, volcanic rocks, igneous and metamorphic rocks, thermal shock, physico-mechanical parameters

1. Úvod

Lesní požáry se v důsledku probíhajících klimatických změn stávají na území střední Evropy stále častějšími a intenzivnějšími, což má dopad nejen na ekosystémy, ale také na stabilitu a celistvost horninových masivů v oblastech náchylných k požárům (McCaffrey, 2004; Moreira et al., 2011). Vysoké teploty spojené s lesními požáry mohou měnit fyzikální a mechanické vlastnosti hornin (Nyman et al., 2019; Buckman et al., 2021), což má významný vliv na stabilitu svahů, rychlost zvětrávání a vývoj krajiny v postižených oblastech.

V této studii jsme zkoumali účinky tepelného šoku na mechanické vlastnosti hornin na celkem 137 vzorcích hornin ve čtyřech litologických skupinách: vyvřelé a metamorfované horniny, pískovce, vápence a vulkanity. Pro každou skupinu byly odebrány vzorky z minimálně 25 různých lokalit po celé České republice, aby byl zajištěn statisticky reprezentativní soubor dat, který pokrývá geologickou rozmanitost země. Zkušební tělíska byla podrobena rychlému krátkodobému zahřívání (5 minut) na cílové teploty 200 °C, 400 °C, 600 °C a 800 °C. Po každém kroku zahřívání byly měřeny změny rychlostí šíření P- a S-vln, což umožnilo výpočet dynamických modulů pružnosti a jejich změn. Následně byly vzorky podrobeny zkouškám v prostém tlaku, nepřímém tahu a lomové houževnatosti.

2. Metodika

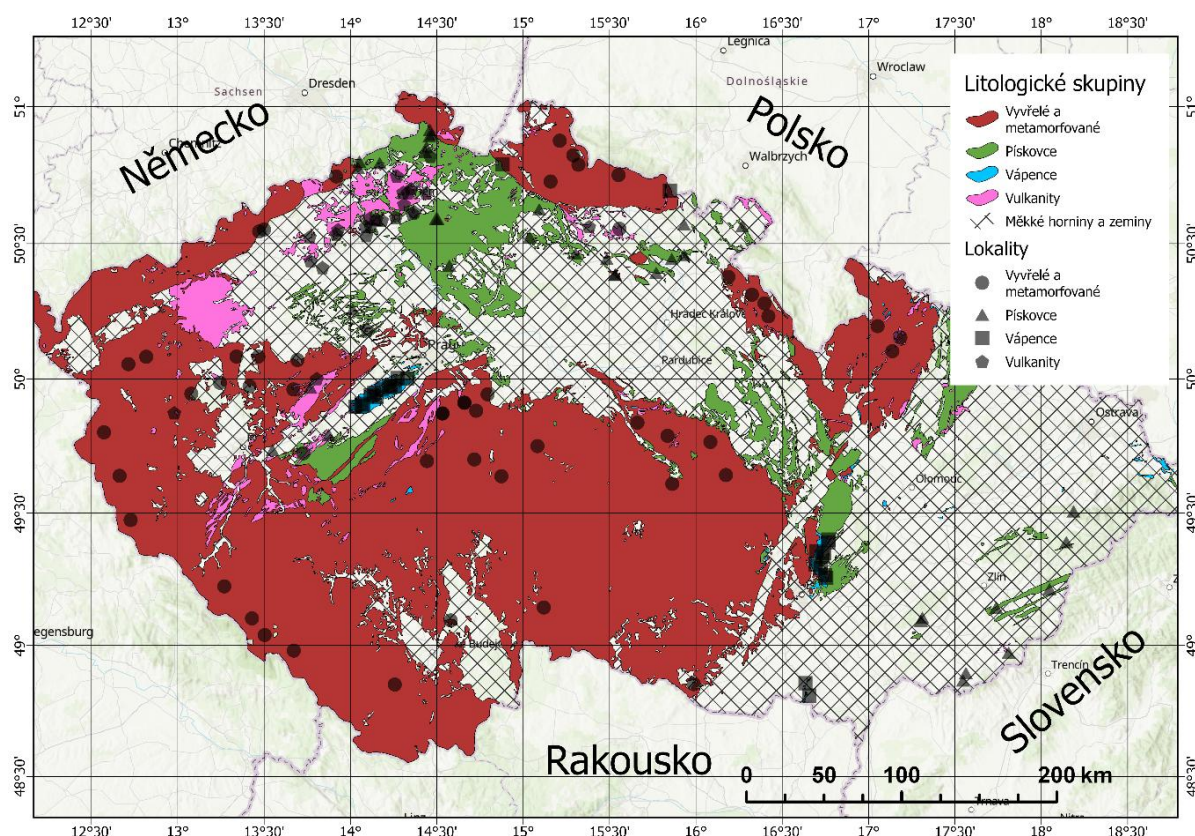
Abychom zachytili velkou geologickou rozmanitost České republiky ve vztahu k existujícím skalním svahům, které by mohly být zasaženy lesními požáry, použili jsme inženýrskogeologickou mapu v měřítku 1:500 000 (obr. 1) (https://mapy.geology.cz/arcgis/rest/services/Geohazardy/IG_rajony500/MapServer), která je rozdělena do tříd odrážejících inženýrskogeologické vlastnosti hornin. S ohledem na přítomnost skalních výchozů a skalních svahů, které by mohly být lesními požáry zasaženy, byly tyto třídy seskupeny do čtyř kategorií: (i) vyvřelé a metamorfované horniny; (ii) pískovce; (iii) vápence; a (iv) vulkanické horniny (obr. 1). Celkem byly vzorky hornin odebrány na 137 lokalitách (52 vyvřelých a metamorfovaných hornin; 35 pískovců; 25 vápenců a 25 vulkanitů). Pro každou lokalitu bylo připraveno pět zkušebních tělísek pro brazilskou zkoušku v příčném tahu (BTS), dvě zkušební tělíska pro pevnost v prostém tlaku (UCS) a tři zkušební tělíska pro lomovou houževnatost (FT). Všechny

vzorky BTS a UCS byly po dobu 24 hodin vakuově nasyceny vodou při tlaku -1 atm, aby bylo zajištěno úplné nasycení pórů, načež byla zaznamenána jejich nasycená hmotnost pro výpočet efektivní pórovitosti. Následně byly vzorky sušeny v sušárně při teplotě 105 °C po dobu 24 hodin, v souladu s metodami doporučenými ISRM (Ulusay a Hudson, 2007). Po ochlazení na pokojovou teplotu byly vzorky změřeny, zváženy a vypočítána jejich objemová hmotnost. Po vysušení byla na všech vzorcích BTS a UCS provedena prozáření P a S vlnami za účelem posouzení jejich výchozích stavů a následných změn dynamických elastických vlastností během tepelného zatěžování.

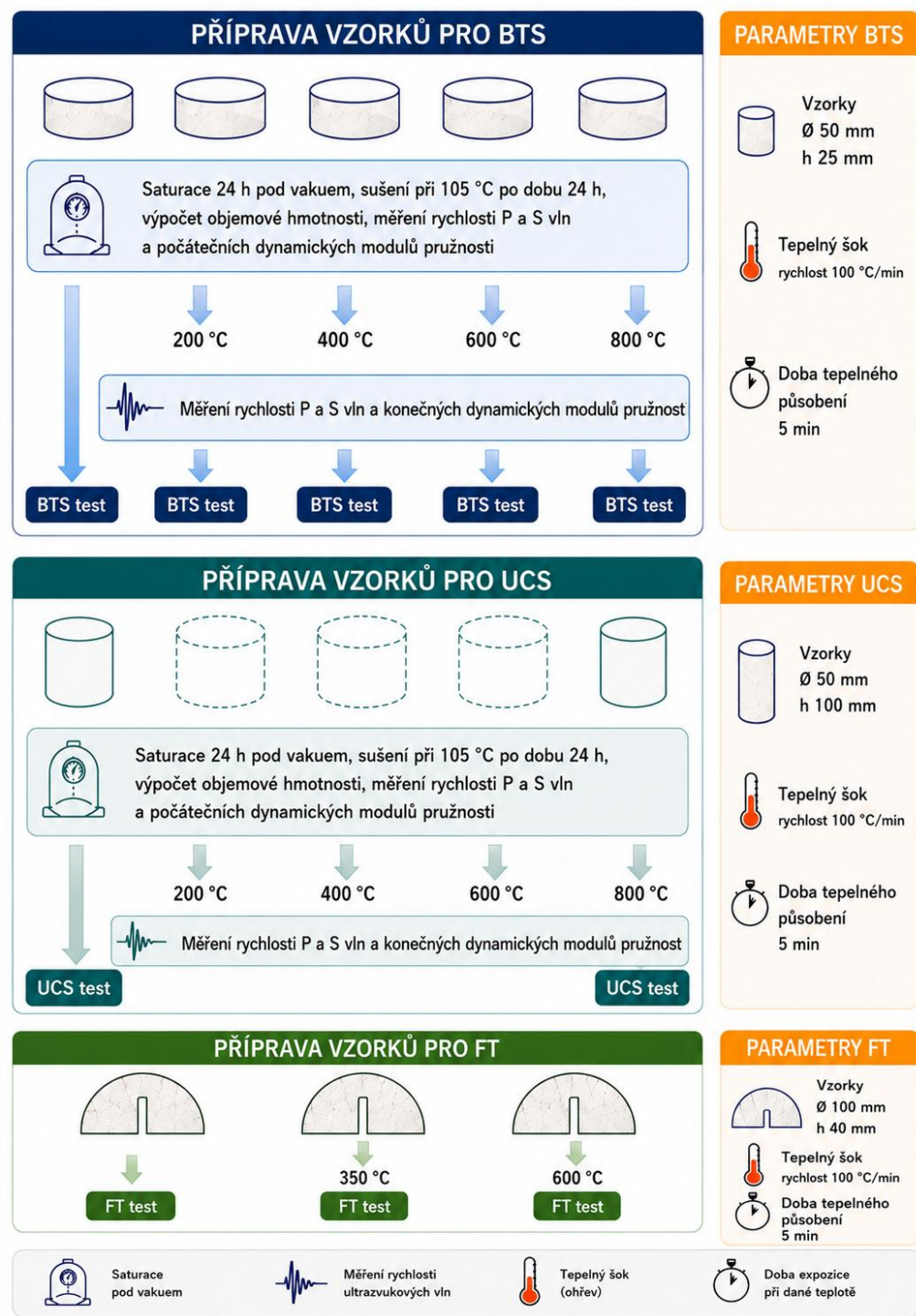
Při laboratorním měření UPV byly použity dva páry rezonančních ultrazvukových snímačů Olympus (V103 pro P-vlny, V153 pro S-vlny) s rezonanční frekvencí 1 MHz, přičemž vzdálenost mezi středy snímačů byla udržována na konstantní hodnotě cca 25 mm u vzorků BTS a cca 100 mm u vzorků UCS. Na základě experimentálně stanovených rychlostí vlnění bylo možné vypočítat dynamické elastické parametry, jako je Youngův modul (Ed), smykový modul (Ud), Poissonův poměr (Vd) a objemový modul (Kd) (Schön, 2015).

Následně byly vzorky vystaveny řízenému rychlému tepelnému zatížení s využitím programovatelné laboratorní pece (CLASIC 1013). Zkušební tělíska BTS byla vystavena čtyřem krátkodobým fázím zahřívání na cílové teploty 200 °C, 400 °C, 600 °C a 800 °C. Byla použita konstantní rychlost ohřevu 100 °C/min a vzorky byly udržovány na každé cílové teplotě po dobu 5 minut, aby se zajistilo rovnoměrné rozložení tepla, než byly přirozeně ochlazeny na pokojovou teplotu. Obdobně se postupovalo i v případě zkušebních tělísek UCS, zatímco zkoušky FT, vzhledem k omezenému počtu vzorků, byly prováděny při teplotách 350 °C a 600 °C. Po každé fázi ohřevu bylo na vzorcích provedeno ultrazvukové měření.

Závěrem byla zkušební tělíska podrobena mechanickým zkouškám za účelem stanovení jejich odpovídající pevnosti v příčném tahu, v prostém tlaku a lomové houževnatosti v režimu I (ISRM, 1978). Zkoušky v příčném tahu a prostém tlaku byly provedeny při nepřetržitém zatížení a konstantní rychlosti posuvu až do porušení. U zkoušky lomové houževnatosti byl zvolen režim I. Přehledně je metodika zobrazena na Obr. 2.



Obr. 1 Přehledová mapa lokalit sběru hornin.
Fig. 1 An overview map of rock collection sites.



Obr. 2 Metodický postup zpracování vzorků hornin působením tepelného šoku.
Fig. 2 Methodological procedure for processing rock samples using thermal shock.

3. Výsledky

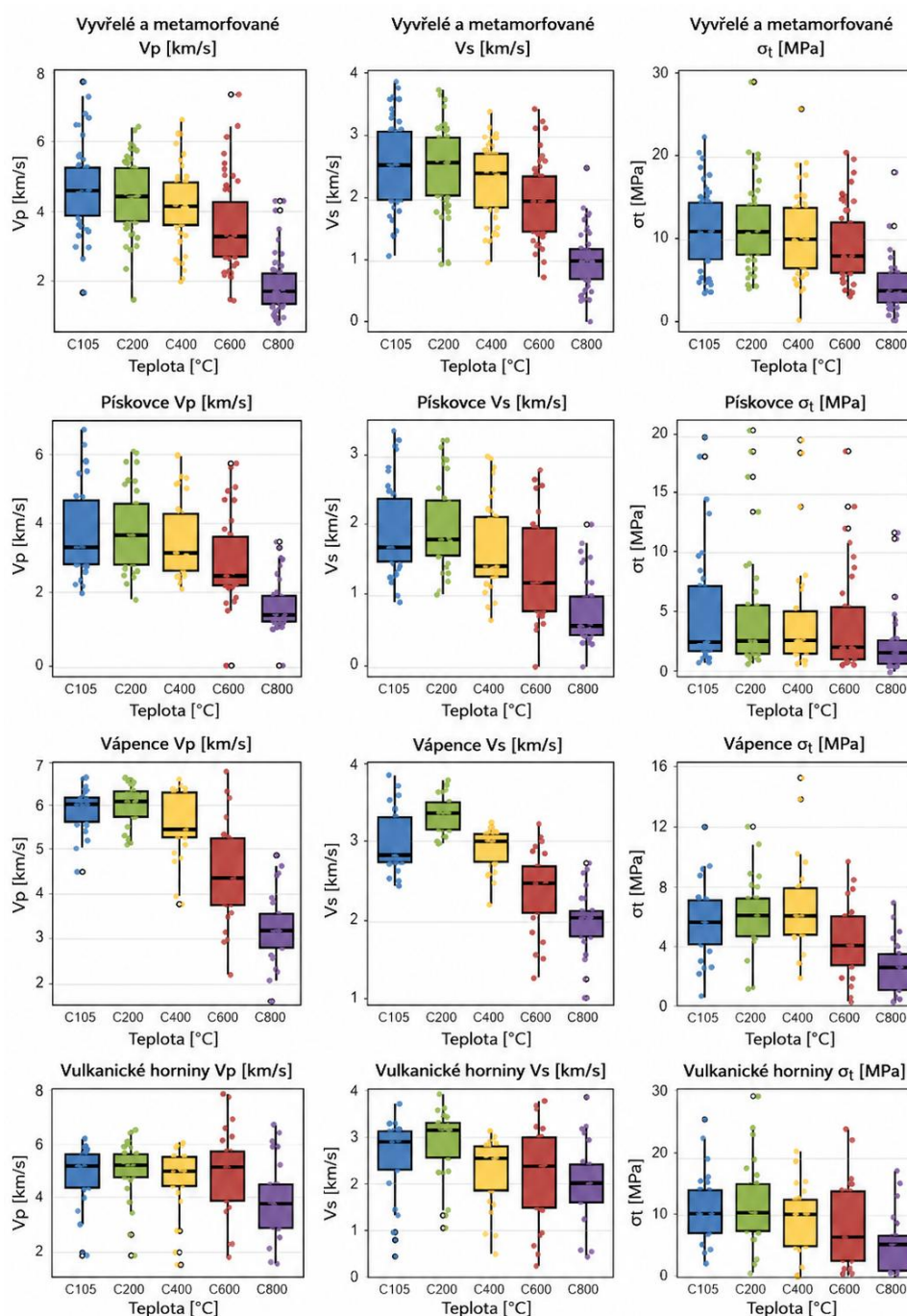
3.1 Ultrazvukové prozařování

U vyvřelých a metamorfovaných hornin vykazují rychlosti P a S vln pokles s rostoucím teplotním zatížením. Rychlosti P-vln postupně klesají až do 400 °C, načež následuje prudší pokles v rozmezí 400–800 °C, přičemž většina hodnot dosahuje přibližně 40–60 % původní rychlosti (Obr. 3). Rychlosti S-vln vykazují podobný trend, i když pokles je o něco pozvolnější a hodnoty se při 800 °C snižují na 30–50 % původní hodnoty. U pískovců se počáteční rychlosti P-vln pohybují kolem 3 km/s a zůstávají relativně stabilní až do 200 °C (Obr. 3). Při teplotách nad touto hranicí je pozorován postupný pokles, přičemž při 800 °C dosahují přibližně 50–70 %

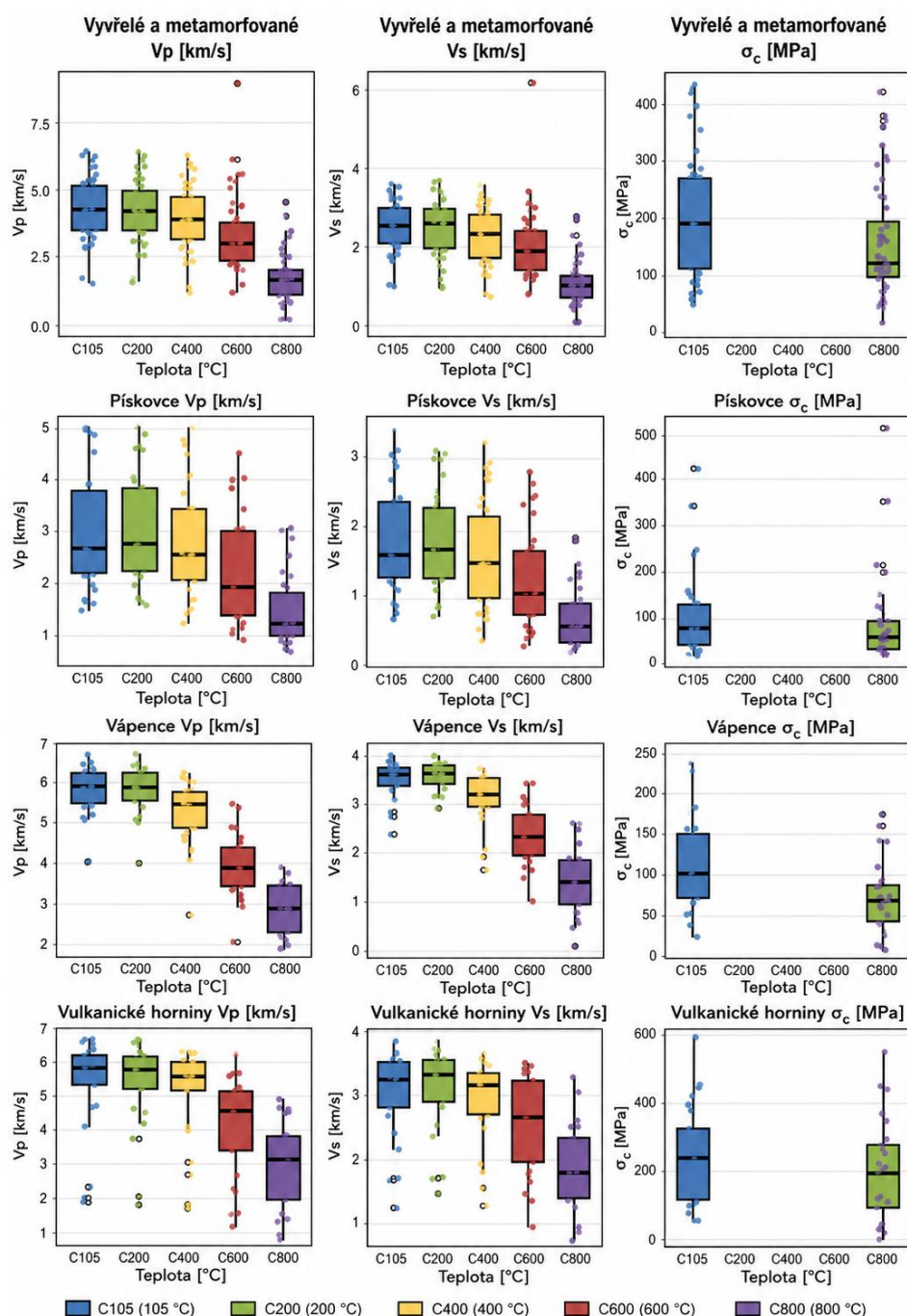
výchozí hodnoty. Rychlosti S-vln vykazují pozvolnější pokles, při 800 °C se rychlosti S-vln obvykle pohybují v rozmezí 40–60 % počátečních hodnot.

U vápenců začínají rychlosti P-vln na hodnotách kolem 6 km/s a s rostoucím teplotním zatížením postupně klesají, přičemž vykazují lineárnější pokles ve srovnání s vyvřelými a metamorfovanými horninami a pískovci. Při 800 °C si většina vzorků zachovává 50–70 % své počáteční rychlosti P-vln, což naznačuje nižší tepelnou citlivost (obr. 3). Rychlosti S-vln klesají výrazněji, zejména nad 400 °C, přičemž konečné hodnoty při 800 °C se pohybují kolem 50–70 % původních hodnot.

Vulkanické horniny vykazují nejvariabilnější reakci na tepelné zatížení. Hodnoty rychlostí P-vln zůstávají až do 200 °C blízko počátečním hodnotám, poté nepravidelně klesají, přičemž některé vzorky si zachovávají více než 80 % původní rychlosti i při 800 °C a u jiných klesají téměř na 50 %. Hodnoty S-vln vykazují podobně nepravidelný pokles, přičemž při vysokých teplotách dochází k výrazným rozdílům mezi vzorky. Při 800 °C se rychlosti S-vln pohybují v rozmezí přibližně 40–80 % původních hodnot (Obr. 3). Obdobné výsledky vykazují i vzorky pevnosti v prostém tlaku (Obr. 4).



Obr. 3 Změny rychlosti P- a S-vln a pevnosti v příčném tahu pro tepelně zatížená zkušební tělíska BTS.
Fig. 3 Changes in P- and S-waves and tensile strengths for thermally treated BTS specimens.



Obr. 4 Změny rychlostí P- a S-vln a pevnosti v příčném tahu pro tepelně zatížená zkušební tělíska UCS.
Fig. 4 Changes in P- and S-waves and tensile strengths for thermally treated UCS specimens.

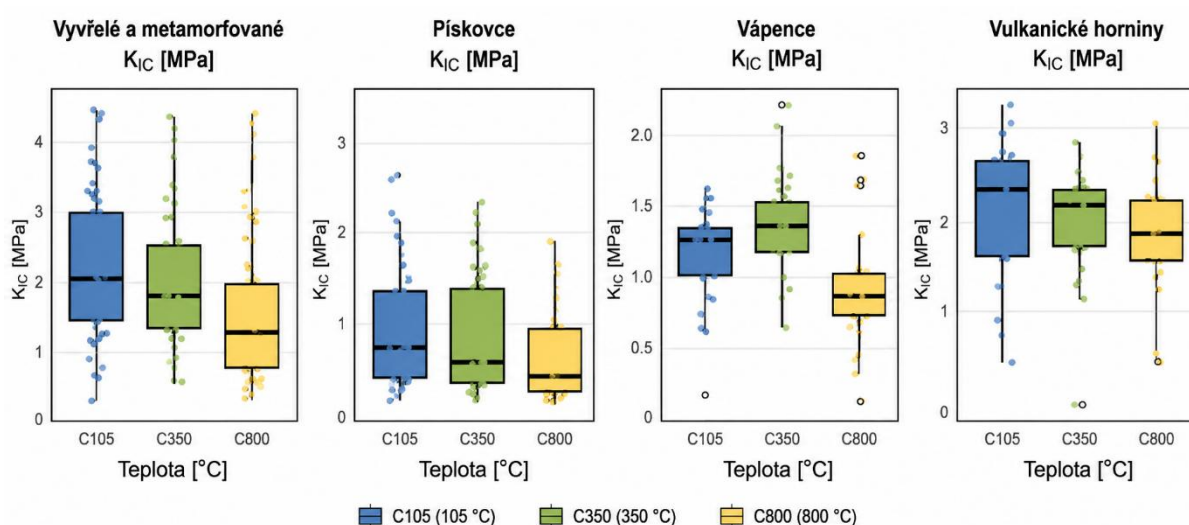
3.2 Destruktivní zkoušky

Výsledky zkoušek v příčném tahu u vyvřelých a metamorfovaných hornin odrážejí předchozí zjištění poklesu rychlostí P- a S-vln, tj.: mírný pokles při 200 °C a postupný pokles kolem 400 °C a 600 °C až k výraznějšímu poklesu při 800 °C (Obr. 3). U pískovců se pevnost v tahu zpočátku drží na průměrné úrovni s pouze nepatrným poklesem při 200 °C. Nicméně mezi 400 °C a 600 °C pevnost v tahu prudce klesá a při 800 °C dosahuje přibližně 30–40 % své počáteční hodnoty. Vzorky vápence vykazují pokles pevnosti v tahu, který začíná při 200 °C. Při 400 °C se pevnost v tahu drží bez zřetelných změn a při 600 °C klesá zhruba o 20 %. Při 800 °C je pevnost v tahu často snížena o přibližně 40–50 % své původní hodnoty. Naopak u vulkanitů pevnost v tahu zůstává relativně beze změn až do 200 °C. Při 400 °C se snížení pevnosti stává zřetelnějším. Při 600 °C se pevnost v tahu snižuje přibližně o 25 % a při 800 °C často klesá o 40 % své původní hodnoty.

U vyvřelých a metamorfovaných hornin se pevnost v prostém tlaku výrazně snižuje tepelným zatížením (Obr. 4). Rozložení hodnot pevností po zatížení až do 800 °C vykazuje podstatně nižší mediánové hodnoty a zúžené horní rozmezí ve srovnání s tepelně nezatíženými vzorky. Pískovce vykazují absolutně malé snížení pevnosti v prostém

tlaku, protože jejich počáteční pevnost v porovnání s ostatními horninami je velmi malá. Nicméně tepelná citlivost pískovců je značná, když dochází ke snížení mediánů po tepelném zatížení. Rovněž vápence vykazují pokles pevnosti v tlaku. Boxploty pro 800 °C vykazují jak nižší mediány, tak užší rozpětí, což naznačuje, že většina vzorků prochází významnou ztrátou pevnosti při zvýšené teplotě. Vulkanity opět vykazují variabilnější chování, ale i tak dochází k celkovému poklesu pevnosti v tlaku. Některé vzorky si při 800 °C zachovávají relativně vyšší pevnost, zatímco u jiných dochází k poklesu na nízké hodnoty, což zdůrazňuje heterogenní tepelné chování v rámci této litologické skupiny.

Vyvřelé a metamorfované horniny vykazují zřetelný pokles hodnoty K_{IC} (lomová houževnatost mód I) s rostoucí teplotou (Obr. 5). Hodnoty tepelně nezatížených vzorků nevykazují v porovnání se zatíženými na 350 °C významnější pokles. Při 600 °C nicméně hodnota K_{IC} prudce klesá, přičemž většina vzorků dosahuje nejnižšího rozsahu v datovém souboru, což odráží významnou tepelnou degradaci. Pískovce vykazují postupný pokles hodnoty K_{IC} v jednotlivých teplotních krocích. Při zatížení na 600 °C klesá medián K_{IC} na nízké hodnoty, přičemž užší rozložení naznačuje, že většina vzorků směřuje k podobně oslabenému stavu. Vápence vykazují neobvyklé chování hodnot K_{IC} v rozmezí do 350 °C, kdy často dochází i k nárůstu K_{IC} . Pokles se stává výraznějším při 600 °C, kde hodnoty K_{IC} výrazně klesají a variabilita se snižuje. Sopečné horniny vykazují opět nejvariabilnější reakci, přičemž hodnota K_{IC} při 350 °C klesá, ale zachovává si poměrně velký rozptyl, při 600 °C většina vzorků vykazuje silnější pokles. Několik vzorků si však zachovává relativně vyšší hodnotu K_{IC} .



Obr. 5 Změny lomové houževnatosti (K_{IC}) po tepelném zatížení
Fig. 5 Changes in Mode I fracture toughness after thermal treatment.

4. Závěr

Výsledky této studie ukazují na vysoce variabilní chování odebraných vzorků hornin mezi litologickými skupinami a uvnitř nich. V několika případech bylo po zahřátí na 200 °C pozorováno překvapivé zvýšení rychlostí P- a S-vln a pevnosti horniny, pravděpodobně v důsledku uzavření mikrotrhlin nebo dehydratace jílových minerálů. Vystavení vyšším teplotám však obecně vedlo k postupnému zhoršování mechanických vlastností, včetně prudkého poklesu rychlostí vln a z nich odvozených dynamických modulů. Vyvřelé a metamorfované horniny, přes svou počáteční vysokou pevnost vykazovaly relativně významný pokles při zahřátí nad 600 °C. Oproti tomu u pískovců, které svou počáteční pevnost měly v porovnání s ostatními horninami velmi nízkou, došlo k absolutně nižšímu snížení pevností. U vápenců bylo pozorováno jejich zpevnění při zahřátí na 200–400 °C. Vulkanity ukázaly nejmenší změny vyvolané tepelným zatížením, nicméně i nejvyšší vnitřní variabilitu ze všech litologických skupin.

Tyto poznatky poukazují na komplexní a nelineární povahu tepelné alterace hornin a zdůrazňují význam zohlednění chování specifického pro danou litologii při posuzování změn horninového masivu po požáru. Naše výsledky snad přispějí k lepšímu pochopení toho, jak lesní požáry, zesílené klimatickými změnami, mohou urychlit procesy degradace hornin.

Poděkování: Příspěvek byl připraven v rámci projektu TAČR Prostředí pro život 7 č. SS07010216: Vliv požárů a vysokých teplot na stabilitu skalních masivů. Tento výzkum byl rovněž podpořen projektem OP JAK, č. CZ.02.01.01/00/22_008/0004605, Přírodní a antropogenní georizika.

Seznam literatury

- Buckman S., Morris R.H. a Bourman R.P., 2021: *Fire-induced rock spalling as a mechanism of weathering responsible for flared slope and inselberg development*. – Nature Communications, 12, 1, 2150. DOI: 10.1038/s41467-021-22451-2
- ISRM, 1978: *Suggested methods for determining tensile strength of rock materials Part 2: Suggested method for determining indirect tensile strength by the Brazil Test*. – International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 15, 3, str. 99–103. DOI: 10.1016/0148-9062(78)90003-7
- McCaffrey S., 2004: *Thinking of wildfire as a natural hazard*. – Society & Natural Resources, 17, 6, s. 509–516. DOI: 10.1080/08941920490452445
- Moreira F., Viedma O., Arianoutsou M., Curt T., Koutsias N., Rigolot E., Barbati A., Corona P., Vaz P., Xanthopoulos G., Mouillot F. a Bilgili E., 2011: *Landscape – wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management*. – Journal of Environmental Management 92, 10, s. 2389–2402. DOI: 10.1016/j.jenvman.2011.06.028
- Nyman P., Rutherford I.D., Lane P.N.J. a Sheridan G.J., 2019: *Debris flows in southeast Australia linked to drought, wildfire, and the El Niño–Southern Oscillation*. – Geology, 47, 5, s. 491–494. DOI: 10.1130/G45939.1
- Schön J.H., 2015: *Physical properties of rocks: Fundamentals and principles of petrophysics*. – Developments in Petroleum Science, 65, 497 s.
- Ulusay R. a Hudson J., 2007: *The Blue Book: The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974-2006*. – ISRM, <https://isrm.net/page/show/935>.