

Pozorovanie zmien travertínov vyplývajúcich z teplotnej záťaže

Zuzana Kompaníková¹, Tatiana Durmeková¹, Ján Vlčko¹, Martin Brček² & Miguel Gómez-Heras³

¹Katedra inžinierskej geológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava; e-mail: kompanikova@fns.uniba.sk

²Štátny geologický ústav Dionýza Štúra, Mlynská dolina I, 817 04 Bratislava 11

³Instituto de Geología Económica (CSIC-UCM), Facultad de CC. Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Spain

AGEOS Monitoring of travertine changes resulting from thermal load

Abstract: Travertines, despite of their unique noble appearance change their properties when affected by ageing like any other building and decorative stone. Some of the most noticeable changes are influenced by temperature fluctuations. From this point of view, the main purpose of presented research was to determine the influence of multiple temperature cycles for travertine from Spišské Podhradie and Ludrová in temperature range of 25°C to 60°C corresponding to summer period temperature regimes. The weakening of the rock material by heating was determined by non-destructive techniques before and after thermal load. By ultrasound apparatus was observed by means of ultrasonic velocities change, when higher values of ultrasonic velocities were determined parallel to the bedding while the perpendicular direction had slower velocities. The change of colour was specified by spectrophotometer and no distinct visual colour change was determined with increasing temperature. By non-contact profilometer surface roughness data of samples profiles primarily indicate a decrease of roughness during heating. The coefficient of linear thermal expansion acquired by thermodilatometer varied from $4.6 \cdot 10^{-3}$ to $7.8 \cdot 10^{-3}$ mm.m⁻¹.°C⁻¹ for travertine from Spišské Podhradie and $5.3 \cdot 10^{-3}$ to $7.3 \cdot 10^{-3}$ mm.m⁻¹.°C⁻¹ for travertine from Ludrová. This parameter characterizes the materials response to heating or cooling. The techniques mentioned above are non-destructive and some of them are innovative in laboratory testing.

Key words: travertine, thermal load, linear thermal expansion, ultrasound velocity, colour change, surface roughness

1. ÚVOD

Travertín je pre svoju jedinečnosť, ušľachtilý vzhľad, jemné a teplé farby, ako aj vhodné fyzikálno-mechanické vlastnosti považovaný za vynikajúci stavebný a dekoračný kameň. Jeho využitie je známe už od staroveku a doteraz patrí medzi významné stavebné a dekoračné materiály. V priebehu času prejavujúce sa zmeny vzhľadu i jednotlivých vlastností sú dané predovšetkým celkovou odolnosťou horniny proti zvetrávaniu, na ktorom sa výrazne podieľajú aj zmeny teploty. Z doposiaľ známych štúdií bola len nepatrná pozornosť venovaná vplyvu teploty, resp. teplotnej záťaži generovanej insoláciou (slnečným žiarením) na hodnotenie kvality stavebného kameňa. Aj preto sme sa v našom výskume zamerali na zhodnotenie odolnosti travertínu v teplotnom rozsahu do 60 °C, ktorý predstavuje maximálnu teplotu, zistenú počas trojročného obdobia monitorovania teploty povrchu travertínového telesa Spišského hradu (Vlčko et al., 2009^a).

Vychádzajúc z technických normových požiadaviek pre prírodný kameň používaný v stavebníctve sa za najvýznamnejšiu termofyzikálnu vlastnosť, ktorá indikuje reakciu prírodného kameňa na teplotnú záťaž, považuje lineárna teplotná rozťažnosť vyjadrovaná koeficientom lineárnej teplotnej rozťažnosti. V norme STN EN 14581 je stanovenie tejto charakteristiky požadované len na princípe meraní dĺžkových zmien pomocou mechanického alebo elektrického extenzometra. V rámci nášho výskumu bola lineárna teplotná rozťažnosť stanovená v termodilatometri, prístroji s vysokou presnosťou a presným detailným záznamom zmeny dĺžky na skúšobných vzorkách v priebehu

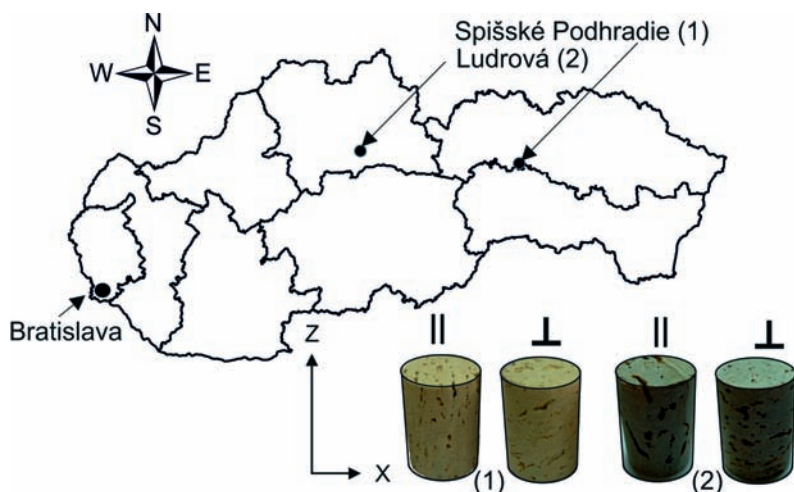
cyklovania teploty. Termodilatometer bol zostavený na základe ideového návrhu jedného z autorov príspevku vo firme Applied Precision, s.r.o. v Bratislave.

Na výskum odolnosti travertínu proti teplotnej záťaži boli realizované ďalšie experimentálne laboratórne práce, ktorých metodické postupy nie sú stanovené v technických normách. Popri zisťovaní lineárnej teplotnej rozťažnosti a s touto vlastnosťou súvisiacich parametrov, boli zisťované aj vplyvy teploty na zmenu farby, ako aj na zmenu drsnosti povrchu skúšobných vzoriek. Meranie zmien drsnosti povrchu horniny sú v obdobnej sfére výskumu nové a zriedkavo využívané. Z literatúry je zatiaľ známe použitie metódy v mikro- a nanoškále pri skúškach odolnosti granitov proti kryštalizácii solí (López-Arce et al., 2010) a pri monitorovaní zvetrávania bridlíc (Fischer & Lüttge, 2007).

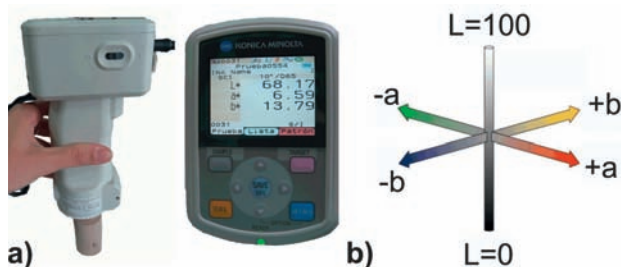
Na zistenie možných mikroštruktúrnych zmien a porušenia materiálu prípadným vznikom mikrotrhlín po jednotlivých realizovaných teplotných cykloch bol použitý ultrazvukový prístroj.

Všetky vyššie spomenuté metódy pozorovania zmien možno považovať za nedeštruktívne, pretože nevedli k porušeniu skúšobných vzoriek.

Z literatúry sú známe viaceré práce, ktoré sú zamerané na štúdium vplyvov teploty na rôzne horninové typy, prevažne však na tie, ktoré sa najčastejšie využívajú na dekoračné účely, z nich najmä granity a mramory (Rosenholtz & Smith, 1950; Cooper & Simmons, 1977; Ramana & Sarma, 1980; Sage, 1988; Battaglia et al., 1993), kde autori hodnotia a analyzujú skúšané horninové typy, vlastné meracie zariadenie, merací postup, ako aj rôzne teplotné rozsahy, ktorým boli horninové typy vystave-



Obr. 1. Travertínové skúšobné vzorky s paralelnou (||) a kolmou (⊥) orientáciou na smer uloženia a lokalizácia ich odberu.
Fig. 1. Travertine samples in parallel (||) and vertical (⊥) orientation to the bedding planes with location of sampling sites.



Obr. 2. Hodnotenie farby na travertínoch: a) Spektrofotometer Minolta CM700d, b) trojdimenzionálny model farebného priestoru CIE L*a*b*.

Fig. 2. Colour evaluation promoted on travertines: a) Spectrophotometer Minolta CM700d, b) CIE L*a*b* colour space.



Obr. 3. Schéma povrchového profilometra Traceit® (vľavo) s fotografiou snímačnej hlavy a vzorkou travertínu zo Spišského Podhradia (vpravo).

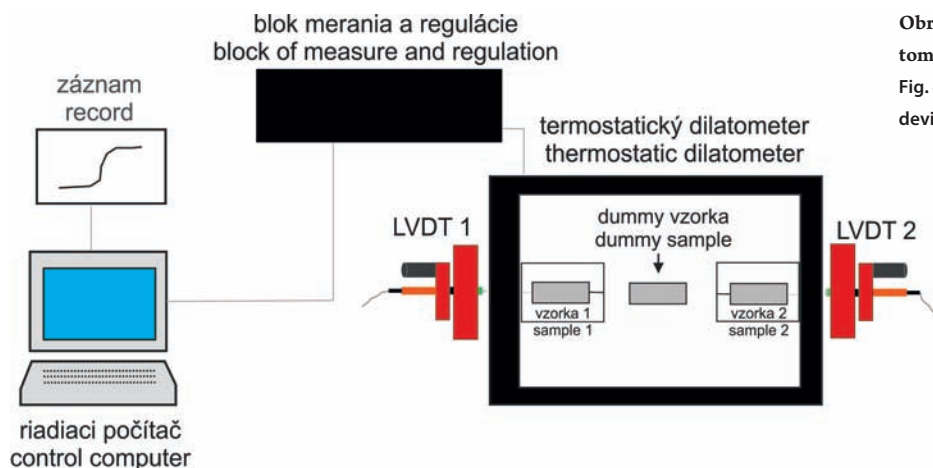
Fig. 3. Schematic diagram of contact free-surface profilometer Traceit® (left) with photo of sensing head and travertine sample from Spišské Podhradie (right).

né. Na základe poznatkov publikovaných v zahraničí možno konštatovať, že na priebeh a veľkosť lineárnej teplotnej rozťažnosti má najväčší vplyv rozsah teplôt, ktorým je skúšaná vzorka vystavená, rýchlosť stúpania teploty (Cooper & Simmons, 1977; Ramana & Sarma, 1980), štruktúra horniny (Weiss et al., 1999, 2002; Ruedrich et al., 2010), orientácia jednotlivých minerálnych zŕn v hornine (Johnson & Parsons, 1944; Rosenholtz & Smith, 1950; Sage, 1988; Widhalm et al., 1997; Siegesmund et al., 2000^a, 2000^b; De Castro Lima & Paraguassú, 2004), výskyt rôznych mikrotrhlín, veľkosť a distribúcia mikropórov (Cooper & Simmons, 1977; Leiss & Weiss, 2000), ako i celková pórovitosť (De Castro Lima & Paraguassú, 2004). Na Slovensku bol doterajší výskum teplotnej rozťažnosti zameraný na pozorovanie teplotno-mechanického správania, orientovaného najmä na zistenie spojitosti pomalých plazivých deformácií horninových masívov vo vzťahu k priebehu teploty v terénnych podmienkach (Jezný et al., 2007; Vlčko et al., 2005, 2009^a, 2009^b).

Výsledky prezentované v tomto príspevku sú súčasťou výskumu, ktorý bol zameraný na zhodnotenie fyzikálnych zmien travertínu vystaveného teplotnej záťaži, ktorá zodpovedá reálnym prírodným podmienkam letného obdobia počas dňa, tzn. podmienkam, ktorým travertín použitý v stavebných konštrukciách (ako stavebný alebo dekoračný kameň) musí reálne odolávať. Teplotná záťaž podľa Siegesmunda et al. (2009^a, 2009^b), spôsobuje v hornine teplotné napätie, ktoré môže viesť až k deformácii horniny späť s otváraním existujúcich trhlín a puklín, so vznikom nových mikrotrhlín, čím sa podieľa na celkovom zhoršení fyzikálnych vlastností horniny. Teplotná záťaž spôsobuje v hornine súčasne aj objemové zmeny, resp. lineárne zmeny (extenzia, kontrakcia) a tieto zmeny v určitom teplotnom intervale vyjadruje koeficient teplotnej rozťažnosti. V našich experimentoch teplotnú záťaž predstavovalo 5 násobné cyklické striedanie teploty v rozsahu od +25 °C do +60 °C.

2. METODIKA VÝSKUMU

Na výskum boli použité skúšobné telieska travertínu v tvare valčekov, pripravené z orientovaných monolitov odobraných z dvoch lokalít (Obr. 1) – travertínovej kopy pri Spišskom Pod-



Obr. 4. Schematické zobrazenie termodilatometra VLAP 04.

Fig. 4. Schematic diagram of dilatometric device VLAP 04.

hradí (kameňolom v prevádzke) a Ludrovej (v súčasnosti lom s občasou lokálnou ťažbou). Skúšobné telieska mali priemer 34 mm, dĺžku 50 mm a boli zhotovené paralelne i kolmo vzhľadom na plochy vrstvitosti (Obr. 1). Pre výskum bolo celkovo použitých 16 vzoriek z oboch lokalít.

Všetky laboratórne skúšky boli realizované na vysušených vzorkách. Popri štandardných skúškach na zistenie základných fyzikálnych vlastností (merná hmotnosť, objemová hmotnosť, nasiakavosť pri atmosferickom tlaku, otvorená a celková pórovitosť), súčasťou výskumu bolo štúdium zmeny pôvodnej farby horninových vzoriek pomocou spektrofotometra, ako aj pozorovanie zmien drsnosti povrchu horniny pomocou povrchového profilometra. Termofyzikálne parametre boli stanovované v termodilatometri VLAP 04.

Pred samotným výskumom vplyvu teplotnej záťaže na vzorky travertínu boli vykonané úvodné merania ultrazvukovou aparátúrou na zistenie rýchlosti šírenia ultrazvukových vln (ďalej UZV). Použitá bola aparátúra firmy Controls UPV E49 s frekvenciou 54 kHz. Skúšku bola vykonaná pomocou impulzovej priechodnej metódy na valčekoch so zabrušenými paralelnými skúšobnými plochami, v osiach paralelných s vrstvitosťou a kolmých na smer vrstvitosti. Merania ultrazvukovým prístrojom boli vykonávané aj v závere výskumu, aby bol zaznamenaný rozdiel v rýchlosti šírenia UZV na vysušenej neporušenej vzorke a na rovnakej vzorke po teplotnej záťaži v termodilatometri. Podľa Jaegera et al., (2007) a odporúčania Medzinárodnej spoločnosti pre mechaniku hornín (ISRM) bol z nameraných hodnôt stanovený koeficient porušenia K_p [%] podľa rovnice (1), kde V_{por} je rýchlosť šírenia ultrazvukových vln vo vzorke po teplotnom ohreve [m.s⁻¹] a V_{nepor} je rýchlosť šírenia ultrazvukových vln vo vzorke pred teplotným ohrevom [m.s⁻¹].

$$K_p = \frac{V_{por}}{V_{nepor}} \cdot 100 \quad (1)$$

Po vykonaní skúšok na zistenie rýchlosti šírenia UZV boli tie isté skúšobné telieska použité na presné stanovenie farby na základe kolorimetrického systému CIELAB pomocou spektrofotometra Minolta CM 700d (Obr. 2a), definujúceho farby

podobným spôsobom, ako sú vnímané ľudským okom. Merná svetlosť je vyjadrená pomocou parametra L^* a vyjadruje prechod z čiernej ($L^* = 0$) k bielej ($L^* = 100$); odtieň ako parameter a^* vyjadrujúci prechod od červenej ($+a^*$) k zelenej ($-a^*$) a sýtosť ako parameter b^* vyjadruje prechod od žltej ($+b^*$) k modrej ($-b^*$). Vyššie numerické hodnoty parametrov a^* a b^* vyjadrujú živšiu a intenzívnejšiu farbu, naopak čím sú bližšie k nule, tým je farba nevýraznejšia (Obr. 2b). Po kalibrácii prístroja bola vyjadrená perceptuálnou vzdialenosťou dvoch farieb, euklidovskú vzdialenosť medzi dvoma trojicami L^* , a^* , b^* súradníc, reprezentujúcich dve farby v tomto priestore. Tejto vzdialenosti sa v rámci CIELAB priestoru hovorí zmena farby (ΔE) a vyjadruje sa podľa rovnice (2). Celkový rozdiel farebnosti ΔC bol stanovený podľa rovnice (3).

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$\Delta C = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (3)$$

Po vykonaní skúšok ultrazvukom a spektrofotometrom boli rovnaké skúšobné telieska použité na meranie povrchu profilu vzorky. Merania boli vykonané pomocou bezkontaktného povrchového profilometra TRACEIT[®] (Obr. 3), patentovaného spoločnosťou Innowep GmbH. Je to prenosný prístroj na vyhotovenie vysoko presnej 3D-topografickej analýzy povrchu vzorky. Meranie povrchového profilu vzorky rozmerov 5 x 5 mm bolo vykonané ako v predchádzajúcich prípadoch pred teplotnou záťažou a po teplotnej záťaži. Na každú stranu vzorky bola postupne priložená snímacia hlava, z ktorej boli vysielané tri svetelné lúče. Zo záznamov bol vyhodnotený profil povrchu vzorky s priemernou výškovou hodnotou Z a vizuálna drsnosť na základe priestorových a výškových priemerných parametrov drsnosti (R_a – stredná aritmetická odchýlka profilu).

Po vykonaní úvodných nedeštruktívnych skúšok na získanie vstupných parametrov pre záverečné porovnanie boli skúšobné telieska podrobené teplotnej záťaži. Prehľad uskutočnených meraní a ich výstupov je v tab. 1.

Na zisťovanie vplyvu teplotnej záťaže na horninu bol použitý termodilatometer VLAP 04 (Obr. 4) s indukčnými snímačmi dráhy HIRT – LVDT (linear variable differential transfor-

Tab. 1. Prehľad vykonaných skúšok a ich výstupov.

Tab. 1. Summary of performed tests and output characteristics.

krok step	meranie a laboratórne určenie measurement and laboratory determination	výstupná charakteristika output characteristic	output characteristic
1.	stanovenie fyzikálnych vlastností determination of physical properties	– objemová hmotnosť – merná hmotnosť – nasiakavosť – otvorená a celková pórovitosť	– apparent density [g.cm ⁻³] – real density [g.cm ⁻³] – saturation [%] – open and total porosity [%]
2.	šírenie ultrazvukových vln ultrasonic wave velocity	– rýchlosť P-vln	– velocity of P-waves [m.s ⁻¹]
3.	farba color	– svetlosť L*, odtieň a*, sýtosť b*	– variation in luminosity L*, variation in the red-green parameter a*, variation in blue-yellow parameter b*
4.	optická povrchová drsnosť optical surface roughness	– 2D vizuálny záznam vzorky, 3D obraz vizuálneho záznamu vzorky – profil povrchu vzorky s priemernou výškovou hodnotou Z – topografická drsnosť R _a	– 2D visual impression of sample, 3D visual impression of sample – cross section with average height value Z [μm] – topo roughness R _a
5.	teplotná záťaž (5 teplotných cyklov v rozsahu +25°C až +60°C) thermal load (5 temperature cycles in range of +25°C to +60°C)	– koeficient teplotnej dĺžkovej rozťažnosti α – relatívna dĺžková teplotná rozťažnosť ε – trvalá teplotná deformácia L _r	– thermal expansion coefficient α [mm.m ⁻¹ .°C ⁻¹] – thermal expansion ε [mm.m ⁻¹] – residual strain L _r [mm.m. ⁻¹]
6.	šírenie ultrazvukových vln ultrasonic wave velocity	– rýchlosť P- vln – koeficient porušenia K _p	– velocity of P-waves [m.s ⁻¹] – coefficient of failure K _p [%]
7.	farba color	– svetlosť L*, odtieň a*, sýtosť b* – zmena farby ΔE – celkový rozdiel farebnosti ΔC	– variation in luminosity L*, variation in the red-green parameter a*, variation in blue-yellow parameter b* – color difference ΔE – chroma difference ΔC
8.	optická povrchová drsnosť optical surface roughness	– 2D vizuálny záznam vzorky, 3D obraz vizuálneho záznamu vzorky – profil povrchu vzorky s priemernou výškovou hodnotou Z – topografická drsnosť R _a – rozdiel priemernej výškovkej hodnoty ΔZ – rozdiel topografickej drsnosti ΔR _a	– 2D visual impression of sample, 3D visual impression of sample – ross section with average height value Z [μm] – topo roughness R _a – difference of average height value ΔZ [μm] – difference of topo roughness ΔR _a

mer) zaznamenávanými aj minimálne zmeny dĺžky posunu. Konštrukcia prístroja umožňuje meranie súčasne dvoch vzoriek s jednou „dummy“ vzorkou. „Dummy“ vzorka je pri experimentoch rovnakého horninového typu ako skúšané vzorky a slúži na umiestnenie termočlánku, pre kontrolu a priebeh teploty cez horninu. Teplotný priebeh skúšky a zmena dĺžky skúmanej vzorky boli zaznamenávané do formátu DBF 4 (dBASE4) pomocou programu Applied Precision každú 1 minútu. Metóda merania pozostáva z merania zmien predĺženia ΔL indikovaných na meracej vzorke, pri konkrétnej stanovenej zmene teploty meraného telesa. Rýchlosť ohreву predstavuje 0,3 °C.min⁻¹.

Teplotná záťaž bola v rozsahu od 25–60 °C. Po dosiahnutí požadovanej teploty vzoriek sa ohrev vypol a teplota sa prirodzeným chladením vrátila na počiatočnú komorovú teplotu cca. +25 °C. Ako referenčný materiál pre kalibráciu prístroja bolo použité kremenné sklo. Všetky namerané údaje boli korigované kalibračnou krivkou v intervale teplôt, ktorým bola vzorka vystavená.

Zo záznamu zmien dĺžky vzorky bola stanovená *relatívna dĺžková teplotná rozťažnosť* ε [mm.m⁻¹], ktorá vyjadruje relatívnu dĺžkovú zmenu vzorky v uvažovanom teplotnom intervale. Je definovaná rovnicou (4).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

kde ΔL – zmena dĺžky skúmanej vzorky [mm];
 L_0 – pôvodná dĺžka skúmanej vzorky [m].

Na základe hodnoty ε bol stanovený koeficient teplotnej dĺžkovej rozťažnosti α [mm.m⁻¹.°C⁻¹] podľa rovnice (5). Teplotná dĺžková rozťažnosť hornín je reakciou hornín na zvyšujúcu sa teplotu. Pri zvyšovaní a znižovaní teploty vznikajú v materiáloch vratné i nevratné dĺžkové zmeny. Tieto zmeny a ich priebeh je možné stanoviť pomocou termodilatometra, pričom teoretické stanovenie nevratných dĺžkových zmien L_r je zobrazené na obr. 5. Zvyšovaním teploty materiálu sa zväčšujú jeho rozmery vo všetkých troch smeroch. Pri poklese jeho teploty sa rozmery vo všetkých troch smeroch zmenšujú. Teplotná dĺžková rozťažnosť α , ktorá je priradená ku konkrétnej dĺžkovej zmene, závisí od stanoveného teplotného intervalu.

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \Delta T \Rightarrow \alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \cdot \Delta T} \quad (5)$$

kde ΔL – je prírastok dĺžky (mm), je to zmena dĺžky spôsobená teplotnou zmenou ΔT [°C];
 α – koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti [mm.m⁻¹.°C⁻¹];
 L_0 – počiatočná dĺžka vzorky [m];
 ΔT – zmena teploty [°C] daná teplotným intervalom na začiatku a na konci ohrevu.

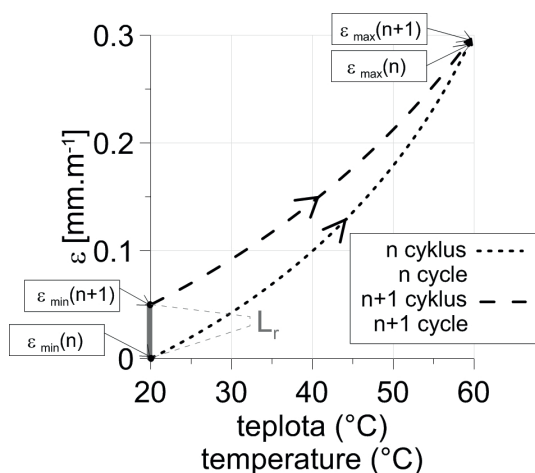
Vzorka, ktorá sa po teplotnej záťaži nevráti na svoju pôvodnú dĺžku (L_0) vykazuje trvalú reziduálnu deformáciu L_r [mm.m⁻¹] (Obr. 5). Trvalá reziduálna deformácia je nevratná a jej príčinou je pôsobenie teploty.

3. VÝSLEDKY VÝSKUMU

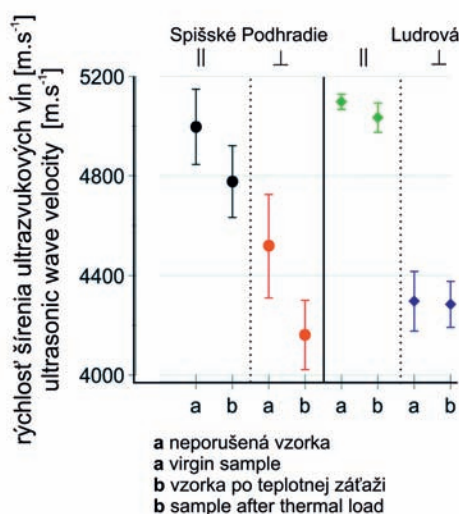
Travertíny sú špecifickým druhom sladkovodného vápenca, zložené sú z kalcitových zŕn s hypidiomorfným vývojom kryštálov, prípadne obsahujú jemné prímеси ílov, kremeňa, limonitu, ktoré im dodávajú charakteristickú farbu. Obe dva pre výskum zvolené travertíny obsahujú makroskopicky viditeľné póry až dutinky rôznej veľkosti, zväčša predĺžené v smere vrstvitosti, čím zvyrazňujú ich usmernenú textúru (Obr. 1). Základné fyzikálne parametre travertínov podrobených teplotnej záťaži sú uvedené v tab. 2. Priaznivejšie vlastnosti, tzn. vyššiu objemovú hmotnosť a nižšiu pórovitosť má sivobiely travertín z Ludrovej.

3.1. Vplyv teploty na rýchlosť šírenia ultrazvukových vln

Na základe výsledkov merania ultrazvukových vln (UZV) pred a po teplotnej záťaži možno konštatovať, že teplotné cykly v termodilatometri ovplyvnili rýchlosť šírenia ultrazvukových vln (Obr. 6). Rýchlosť prechodu ultrazvukových vln bola nižšia po procese cyklického ohrievania vzoriek, nie však výrazne.



Obr. 5. Záznam ohrevu vzorky horniny v termodilatometri na 60 °C.
 Fig. 5. Plot of rock sample behaviour in the dilatometer at the heating of 60 °C.



Obr. 6. Rýchlosť šírenia ultrazvukových vln v travertínoch pred teplotnou záťažou a po teplotnej záťaži.

Fig. 6. Propagation of ultrasound velocity in travertines before and after the thermal load.

Zmeny v rýchlostiach vyjadrené percentuálne koeficientom porušenia K_p boli v kategórii veľmi nízkeho porušenia. Najväčší pokles rýchlosti šírenia UZV vykázali travertíny zo Spišského Podhradia od 4 do 8 %, pričom väčšie zmeny nastali v smere kolmom na vrstvitosť. Podobne, pokles rýchlosti bol nameraný v travertíne z Ludrovej, kde však zmena bola menej výrazná, iba 0,3 až 1 %. Tento pokles v rýchlosti šírenia UZV je dôkazom fyzikálnych zmien vo vzorkách travertínu na základe teplotných cyklov, ktorým boli vystavené.

3.2. Vplyv teploty na zmenu farby

V tab. 3 je zosumarizovaná farebná škála travertínu pred vystavením vzorky teplotnej záťaži a po vystavení teplotnej záťaži ohrevom do +60 °C. Z nameraných hodnôt nebola zistená žiad-

Tab. 2. Základné fyzikálne vlastnosti študovaných travertínov.

Tab. 2. Basic physical properties of the studied travertines.

	objemová hmotnosť apparent density [g.cm ⁻³]	merná hmotnosť density [g.cm ⁻³]	nasiakavosť saturation [%]	otvorená pórovitosť open porosity [%]	celková pórovitosť total porosity [%]
Spišské Podhradie	2,37	2,70	1,64	3,85	12,2
Ludrová	2,47	2,67	1,63	4,01	7,6

Tab. 3. Farebná škála travertínov podľa CIELAB pred a po teplotných cykloch (+ zvýšenie hodnoty parametra po teplotnej záťaži, - zníženie hodnoty).

Tab. 3. Colour variation promoted on the travertines by CIELAB before and after the thermal load (+ zvýšenie hodnoty parametra po teplotnej záťaži, - zníženie hodnoty).

		L*			a*			b*		ΔE	ΔC	
		pred before	po after		pred before	po after		pred before	po after			
Spišské Podhradie		90,32	90,5	+	1,41	1,38	-	7,38	6,91	-	0,51	0,475
	⊥	91,8	86,14	-	0,63	0,92	+	7,18	6,04	-	5,78	1,172
Ludrová		69,64	70,31	+	1,93	1,96	+	9,12	9,3	+	0,70	0,178
	⊥	72,45	72,93	+	2,65	2,48	-	12,32	11,67	-	0,84	0,681

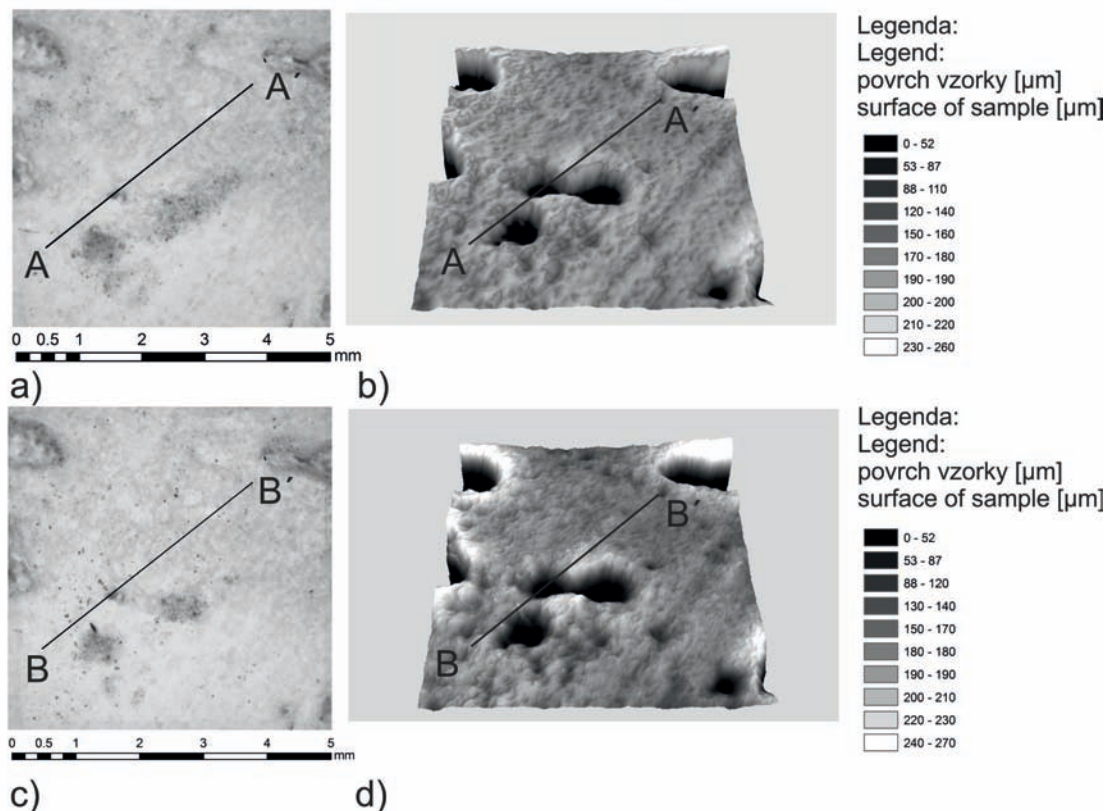
+ zvýšenie hodnoty parametra po teplotnej záťaži, - zníženie hodnoty

+ increase of value after thermal load, - decrease of value

Tab. 4. Zmeny v parametroch drsnosti travertínov vplyvom teplotnej záťaže, merané na spodnej a vrchnej ploche skúšobnej vzorky.

Tab. 4. Variation (changes) in roughness parameters of travertines before and after the thermal load, measured on the bottom and the top of specimens.

	povrch vzorky surface of sample	drsnosť horniny roughness of stone						X	Y
		X		Y		X	Y		
		pred before	po after	pred before	po after				
		R _z	R _a	R _z	R _a		ΔR _z		
Spišské Podhradie	spodná časť vzorky bottom of specimen	3,16 (± 1,5)	3,14 (± 1,1)	4,04 (± 1,89)	4,05 (± 1,76)	-0,02	-0,40		
	vrchná časť vzorky top of specimen	3,17 (± 1,4)	3,03 (± 1,35)	4,56 (± 1,83)	4,37 (± 1,87)	-0,14	-0,05		
Ludrová	spodná časť vzorky bottom of specimen	3,72 (± 1,8)	3,44 (± 1,4)	4,3 (± 2,64)	4,07 (± 2,51)	-0,28	-0,42		
	vrchná časť vzorky top of specimen	2,6 (± 0,9)	2,56 (± 0,82)	3,5 (± 0,82)	3,37 (± 0,79)	-0,04	-0,05		



Obr. 7. Záznam povrchu vzorky travertínu zo Spišského Podhradia pred teplotnou záťažou (a, b) a rovnaká plocha povrchu vzorky po teplotnej záťaži (c, d). Obrázky vľavo sú vizuálnym záznamom vzorky; obrázky vpravo predstavujú 3D vizualizáciu.

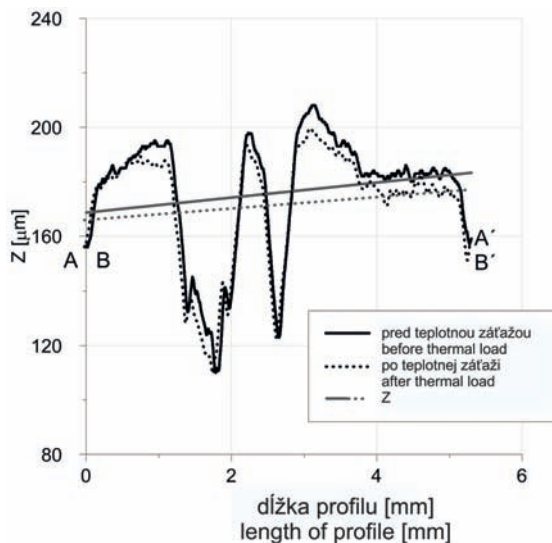
Fig. 7. Travertine sample from Spišské Podhradie before the thermal load (a, b) and the same sample after the thermal load (c, d). Pictures on the left side are visual records of the surface; pictures on the right side are surface roughness 3D height maps.

na výrazná zmena farby, zistený bol mierny pozitívny posun farieb od červenej k zelenej, ako aj od žltej k modrej. To znamená, že teplotná záťaž v teplotách od 25 do 60 °C nemá výrazný dosah na zmenu farby. Viacerí autori uvádzajú (Hajpál, 1999, 2002; Hajpál & Török, 2004; Gómez-Heras et al., 2004, 2006), že zmena farby horninového materiálu je výraznejšia až pri vyšších teplotách nad 200 °C.

3.3. Vplyv teploty na zmenu povrchovej drsnosti

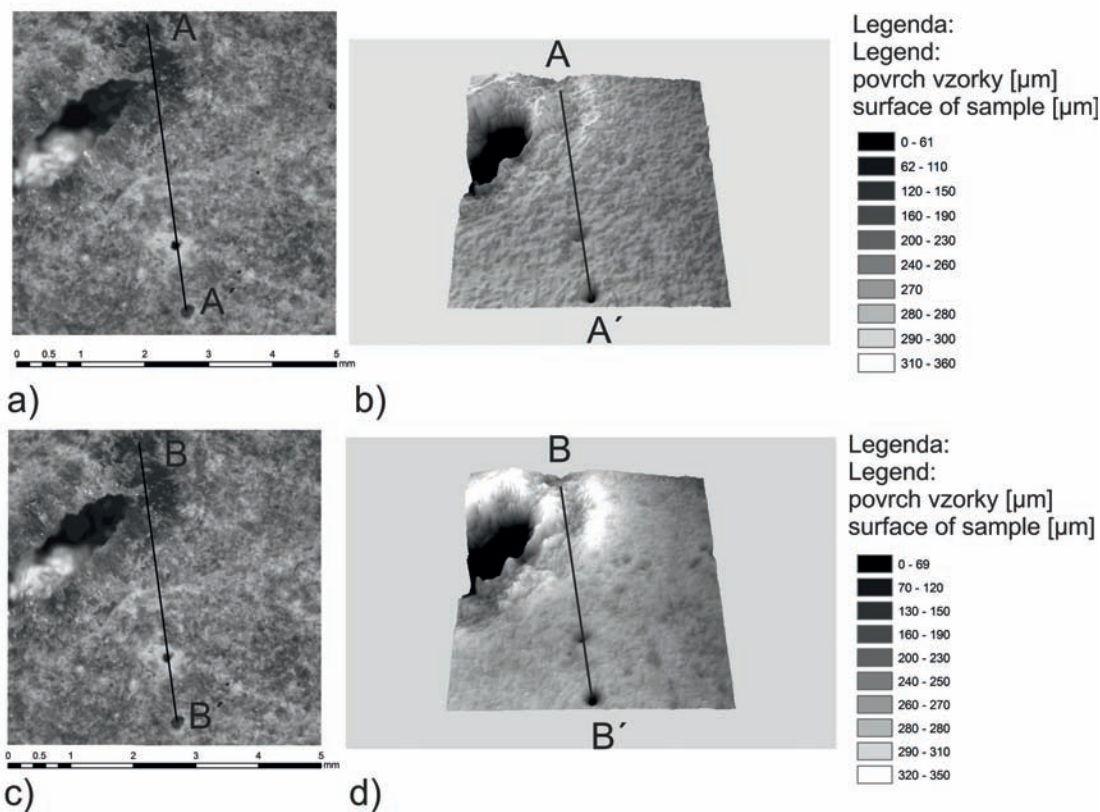
Prístroj Traceit poskytuje komplexný súbor parametrov definujúcich drsnosť povrchu horninovej vzorky, pričom pomocou spracovania údajov geografickým softvérom možno získať vizualizáciu povrchových zmien s mierou rozlíšenia v μm, ako aj kvantifikáciu morfológických zmien z digitalizovaného obrazu povrchu premietnutého do 3D obrazu.

Na obr. 7a je znázornený optický záznam vzorky travertínu zo Spišského Podhradia pred jej vystavením teplotnej záťaži a stav po teplotnej záťaži (Obr. 7c). Z optického záznamu bol namodelovaný 3D záznam pred teplotnou záťažou (Obr. 7b) a po teplotnej záťaži (Obr. 7d) a vykreslený profilový záznam so strednou aritmetickou čiarou profilu Z. Stredná aritmetická čiara profilu Z predstavuje základnú čiaru, ktorá rozdeľuje profil tak, že v rozsahu základnej dĺžky sú súčty plôch po oboch jej stranách rovnaké. Priemerné výškové hodnoty Z získané



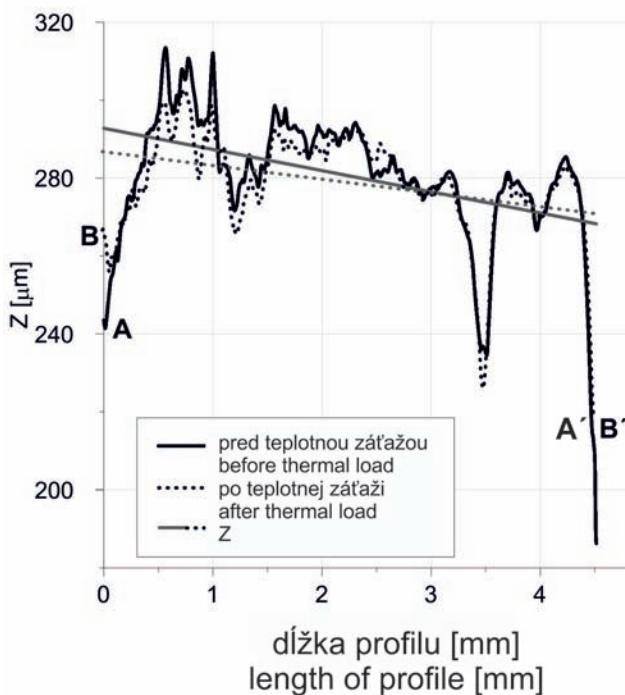
Obr. 8. Profil povrchovej drsnosti na vzorke travertínu zo Spišského Podhradia pred teplotnou záťažou a po teplotnej záťaži. Hodnoty povrchovej drsnosti zodpovedajú profilu (A-A'; B-B') zobrazeného na obr. 8.

Fig. 8. Surface roughness profile on the surface of travertine sample from Spišské Podhradie before and after the thermal load. The surface roughness optical values corresponding to the profile (A-A'; B-B') given in Fig. 8.



Obr. 9. Záznam povrchu vzorky travertínu z Ludrovej pred teplotnou záťažou (a, b) a rovnaká plocha vzorky po teplotnej záťaži (c, d). Obrázky vľavo sú vizuálnym záznamom vzorky; obrázky vpravo predstavujú 3D vizualizáciu.

Fig. 9. Travertine sample from Ludrová before the thermal load (a, b) and the same sample after the thermal load (c, d). Pictures on the left side are visual records of the surface; pictures on the right side are surface roughness 3D height maps.



Obr. 10. Profil povrchovej drsnosti na vzorke travertínu z Ludrovej pred teplotnou záťažou a po teplotnej záťaži. Hodnoty povrchovej drsnosti zodpovedajú profilu (A-A'; B-B') zobrazeného na obr. 10.

Fig. 10. Surface roughness profile on the surface of travertine sample from Ludrová before and after the thermal load. The surface roughness optical values corresponding to the profile (A-A'; B-B') given in Fig. 10.

Tab. 5. Minimálne a maximálne hodnoty relatívnej dĺžkovej rozťažnosti a lineárna teplotná rozťažnosť pre jednotlivé cykly (1–5).
 Tab. 5. Minimum and maximum values of relative dilatation and thermal expansion; coefficient α for each thermal cycle.

Spišské Podhradie						
	$\epsilon_{\min} ()$ [mm.m ⁻¹]	$\epsilon_{\min} (\perp)$ [mm.m ⁻¹]	$\epsilon_{\max} ()$ [mm.m ⁻¹]	$\epsilon_{\max} (\perp)$ [mm.m ⁻¹]	$\alpha ()$ [mm.m ⁻¹ .°C ⁻¹]	$\alpha (\perp)$ [mm.m ⁻¹ .°C ⁻¹]
1	4,5E-04	1,8E-03	1,7E-01	2,9E-01	4,8E-03	8,4E-03
2	3,4E-02	2,8E-02	1,9E-01	2,9E-01	4,5E-03	7,5E-03
3	3,8E-02	2,4E-02	2,0E-01	3,0E-01	4,5E-03	7,8E-03
4	7,1E-02	2,5E-02	2,3E-01	2,9E-01	4,7E-03	7,7E-03
5	8,0E-02	2,9E-02	2,4E-01	3,0E-01	4,6E-03	7,7E-03
priemer average	4,47E-02	2,16E-02	2,06E-01	2,94E-01	4,62E-03	7,82E-03
Ludrová						
	$\epsilon_{\min} ()$ [mm.m ⁻¹]	$\epsilon_{\min} (\perp)$ [mm.m ⁻¹]	$\epsilon_{\max} ()$ [mm.m ⁻¹]	$\epsilon_{\max} (\perp)$ [mm.m ⁻¹]	$\alpha ()$ [mm.m ⁻¹ .°C ⁻¹]	$\alpha (\perp)$ [mm.m ⁻¹ .°C ⁻¹]
1	1,6E-03	1,1E-02	2,0E-01	2,8E-01	5,5E-03	7,6E-03
2	5,3E-03	3,9E-02	2,0E-01	2,9E-01	5,2E-03	7,2E-03
3	-6,5E-04	4,2E-02	2,0E-01	3,0E-01	5,4E-03	7,3E-03
4	2,8E-02	4,6E-02	2,3E-01	3,0E-01	5,4E-03	7,2E-03
5	2,9E-02	7,1E-02	2,2E-01	3,2E-01	5,2E-03	7,1E-03
priemer average	1,27E-02	4,18E-02	2,10E-01	2,98E-01	5,34E-03	7,28E-03

na profilovom zázname (A–A') sú pre vzorku pred teplotnou záťažou 176 μm . Po vystavení vzorky teplotnej záťaži ohrevom na 60 °C v 5-tich cykloch možno pozorovať pokles hodnoty Z (B–B') na 174 μm (Obr. 8).

Podobne ako na skúšobných vzorkách zo Spišského Podhradia uvádzame optický záznam vzorky travertínu z Ludrovej pred jej vystavením teplotnej záťaži (Obr. 9a) a po teplotnej záťaži (Obr. 9c). 3D záznam vzorky je uvedený na obr. 9b a 9d. Pre vzorku travertínu z Ludrovej predstavujú priemerné výškové hodnoty Z na profilovom zázname (A–A') pre vzorku pred teplotnou záťažou 292.9 μm a po záťaži 286.9 μm (B–B') (Obr. 10).

Vizuálny záznam, ako aj 3D vizualizácia skúšobných vzoriek na obr. 7 a obr. 9 pred a po teplotnej záťaži má polohovo priradené známe body (tzv. vĺčkové body) s vizuálnym záznamom, ako aj s 3D vizualizáciou na skúšobných vzorkách pred teplotnou záťažou.

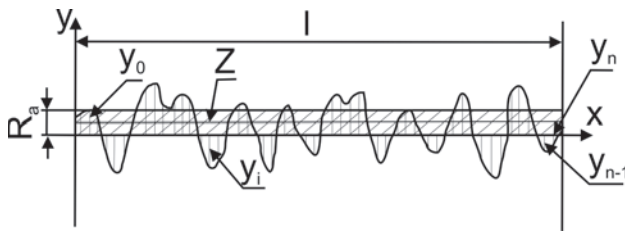
Pomocou strednej aritmetickej čiary profilu Z možno určiť aj strednú aritmetickú odchýlku profilu Ra, čo predstavuje pred-

nostnú výškovú charakteristiku drsnosti povrchu. Hodnota Ra je stredná aritmetická hodnota absolútnych odchýlok profilu v rozsahu základnej dĺžky podľa rovnice (6) graficky zobrazenej na obr. 11. Hodnoty Ra sú vyjadrené pre celú pozorovanú plochu 5 x 5 mm (Tab. 4).

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \approx \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n |y(x_i)| \quad (6)$$

kde x – úsečka profilu odčítaná na strednej čiare; $y(x)$ – funkcia opisujúca profil; y_i – súradnica n bodov profilu povrchu v medziach základnej dĺžky, $i=1,2,3,\dots,n$; l – základná dĺžka; n – počet bodov profilu povrchu na základnej dĺžke.

Meraním pomocou optického bezkontaktného profilometra boli zaznamenané odlišnosti drsnosti povrchu. Z hodnôt uvedených v tab. 4 vyplýva, že drsnosť bola znížená po vystavení skúšobných vzoriek teplotnej záťaži aj pri relatívne nízkom tep-



Obr. 11. Drsnosť povrchu vzorky so strednou aritmetickou hodnotou Ra (spracované podľa STN EN ISO 4287).

Fig. 11. Surface roughness of sample with arithmetic average Ra (according to STN EN ISO 4287).

lotnom rozsahu. Tento jav pravdepodobne súvisí s makropórovitou štruktúrou horninových vzoriek travertínu.

3.4. Vplyv teploty na zmeny dĺžky

Zmeny dĺžky travertínových vzoriek spôsobené 5-timi cyklami ohrevu v termodilatometri sú znázornené v grafických záznamoch na obr. 12. Relatívna dĺžková teplotná rozťažnosť a koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti boli zistené pre teplotný rozsah od 25 do 60 °C, hodnoty oboch parametrov po každom cykle ohrevu i priemerné hodnoty sú uvedené v tab. 5 so zohľadnením orientácie skúšobnej vzorky. Relatívna dĺžková rozťažnosť je znázornená ako funkcia počtu ohrievacích cyklov. Obr. 12 ilustruje, ako sa dĺžková rozťažnosť vzorky so zvyšujúcou teplotou zvyšuje, naopak, koeficient dĺžkovej teplotnej rozťažnosti s narastajúcim počtom cyklov vykazuje postupne klesajúcu tendenciu.

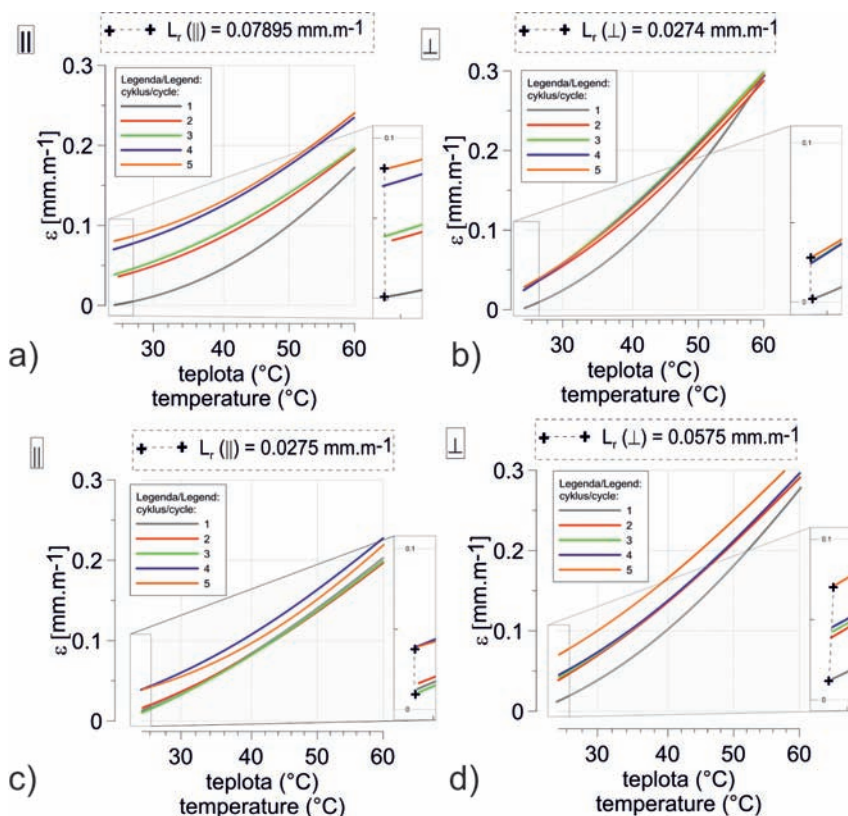
Zo záznamov meraní v termodilatometri počas cyklovania ohrevu a chladnutia vzoriek boli zistené najväčšie hodnoty trvalej teplotnej deformácie L_r na travertíne zo Spišského Podhradia (Obr. 12a,b), pričom vyššia trvalá deformácia bola nameraná

na vzorke paralelne so smerom vrstvitosti ($0.07895 \text{ mm.m}^{-1}$) oproti vzorke kolmej na smer vrstvitosti (0.0274 mm.m^{-1}). Odlišné správanie bolo zistené v travertíne z Ludrovej. V smere paralelne s plochami vrstvitosti (Obr. 12c,d) bola nameraná nižšia trvalá deformácia (0.0275 mm.m^{-1}), ako vo vzorke s kolmou orientáciou na smer vrstvitosti (0.0575 mm.m^{-1}). Pribeh koeficientu α s narastajúcim počtom cyklov je zobrazený na obr. 13.

Z výsledkov termodilatometrických meraní mramorov publikovaných v literatúre je známy vplyv orientácie kryštálov kalcitu na hodnoty koeficientu lineárnej teplotnej rozťažnosti (Siegesmund et al., 2000^a). Tento vplyv môže zohrávať určitú úlohu aj pri dĺžkových zmenách travertínov, na zložení ktorých sa rovnako významnou mierou podieľa kalcit.

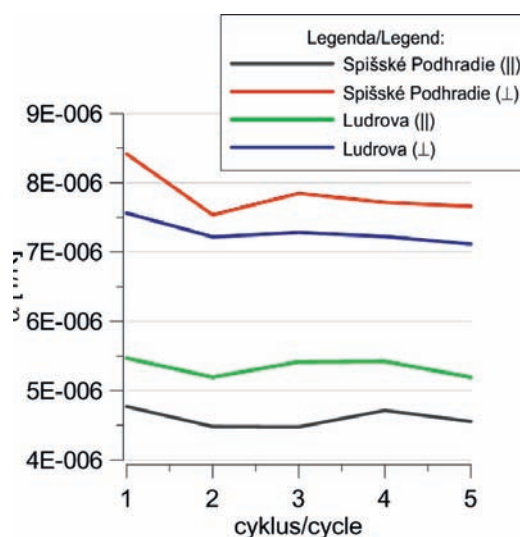
4. ZÁVER

Účelom výskumu bolo poskytnutie merateľných objektívnych informácií o cyklickom pôsobení teplotných výkyvov v kladnom rozsahu na travertín, ktorý je u nás pomerne hojne využí-



Obr. 12. Závislosť relatívnej teplotnej dĺžkovej rozťažnosti od teploty pre travertín zo Spišského Podhradia (a, b) a Ludrovej (c, d); obrázky vľavo predstavujú vzorky s orientáciou paralelne na smer vrstvitosti; obrázky vpravo predstavujú vzorky s orientáciou kolmo na smer uloženia; zobrazenie piatich cyklov ohrevu a chladnutia.

Fig. 12. Thermal dilation as a function of temperature for travertine from Spišského Podhradia (a, b) and Ludrová (c, d); pictures on the left are samples parallel on the bedding; pictures on right are samples vertical on the bedding; plotting of 5 cycles of heating and cooling.



Obr. 13. Koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti α v závislosti od počtu cyklov, stanovený paralelne i kolmo na smer vrstvitosti.

Fig. 13. Thermal expansion coefficient α dependent on the thermal cycle number, parallel and vertical to bedding planes.

vaný ako stavebný a dekoračný materiál. Pozorovaním rýchlosti šírenia ultrazvukových vln bolo zistené, že v piatich cykloch opakované teplotné zmeny v termodilatometri pôsobili na vzorky deštruktívne, čo sa prejavilo v znížení rýchlosti prechodu ultrazvukových vln. Rozsah teplôt od 25 do 60 °C nemal však výrazný dopad na zmenu farby, ako aj drsnosť povrchu.

Travertíny, ktoré boli predmetom výskumu sú monominerálneho zloženia, na druhej strane sú štruktúrne výrazne nehomogénne a špecifické pomerne vysokou a nepravidelnou pórovitosťou. Z tohto dôvodu boli ich termofyzikálne vlastnosti pozorované v dvoch smeroch, a to v smere paralelnom a kolmom na smer vrstvitosti vzhľadom na textúrne prvky a asymetricky rozložené pórové priestory.

Vyvodzovaním teplotnej záťaže v termodilatometri bola zároveň pre travertín stanovená významná termofyzikálna materiálová konštanta, akou je koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti. Pre travertín zo Spišského Podhradia bol tento parameter zistený v nasledujúcich hodnotách: merané paralelne so smerom vrstvitosti $\alpha = 4,6 \cdot 10^{-3} [\text{mm}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}]$ a v smere kolmom na vrstvitosti $\alpha = 7,8 \cdot 10^{-3} [\text{mm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}]$. Pre homogénnejší a hutnejší travertín z Ludrovej bol zistený koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti paralelne so smerom vrstvitosti $\alpha = 5,3 \cdot 10^{-3} [\text{mm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}]$ a v smere kolmom na vrstvitosti $\alpha = 7,3 \cdot 10^{-3} [\text{mm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{C}^{-1}]$. Vzájomná súvislosť bola potvrdená medzi počtom cyklov teplotných záťaží a hodnotou koeficientu lineárnej teplotnej rozťažnosti. Lineárna teplotná rozťažnosť sa s počtom teplotných cyklov postupne znižuje.

Travertíny vykázali po 5-tich cykloch ohrevu na 60 °C a chladnutia na iniciálnu teplotu 25 °C zmeny. Väčšia trvalá teplotná deformácia bola zistená na travertíne zo Spišského Podhradia. Pravdepodobne pórová nehomogenita travertínov je dôvodom nejednoznačnosti určenia smeru v hornine, v ktorom sa prejaví vyššia trvalá teplotná deformácia. Vzhľadom na to je potrebné vykonať ďalšie termodilatometrické merania

na väčšom počte vzoriek s väčším počtom teplotných cyklov a v rôznom teplotnom rozsahu, vrátane mínusových teplôt, ktoré by pomohli dať odpoveď na ďalšie otázky, napr. ako dlho je vzorka travertínu schopná odolávať teplotnej záťaži. Z výsledkov vyplýva, že po zvyšujúcom sa počte teplotných cyklov bola zaznamenaná zvyšujúca sa trvalá teplotná deformácia.

Podakovanie: Táto práca bola finančne podporená Vedeckou grantovou agentúrou MŠVVaŠ SR, grant VEGA č. 1/0413/09 a agentúrou APVV, projekt APVV-0641-10, a bola súčasťou riešenia projektu GEOMATERIALES P2009/MAT-1629.

Literatúra

- Battaglia S., Franzini M. & Mango F., 1993: High sensitivity apparatus for measuring linear thermal expansion: Preliminary results on the response of marbles to thermal cycles. *Il Nuovo Cimento*, 16, 453–461.
- Cooper H.W. & Simmons G., 1977: The effect of cracks on the thermal expansion of rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 36, 404–412.
- De Castro Lima J. & Paraguassú A.B., 2004: Linear thermal expansion of granitic rocks: influence of apparent porosity, grain size and quartz content. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 63, 3, 215–220.
- Fischer C. & Lüttge A., 2007: Converged surface roughness parameters – A new tool to quantify rock surface morphology and reactivity alteration. *American Journal of Science*, 307, 955–973.
- Gómez-Heras M., Álvarez de Buergo M., Fort R., Hajpál M., Török A. & Varas M.J., 2004: Characterization of changes in matrix of sandstones affected by historical fires. In: Kwiatkowski D. & Lofvendahl R. (Ed.): 10th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Stockholm 2004, 561–568.
- Gómez-Heras M., Figueiredo C., Varas M.J., Mauricio A., Álvarez de Buergo M., Aires-Barros L. & Fort R., 2006: Digital image analysis contribution to the evaluation of the mechanical decay of granitic stones affected by fires. In: Kourkoulis S.K. (Ed.). *Fracture and failure of natural building stones*. Springer, Dordrecht, The Netherlands: Springer, 427–437.
- Hajpál M., 1999: Behaviour of Sandstones of Historical Monuments Under Thermal Influence. *Periodica Polytechnica*, 43, 2, 207–218.
- Hajpál M., 2002: Changes in Sandstones of historical monuments exposed to fire or high temperature. *Fire Technology*, 38, 4, 373–382.
- Hajpál M. & Török A., 2004: Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. *Environmental Geology*, 46, 3, 311–322.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W. & Zimmerman R.W., 2007: *Fundamentals of Rock Mechanics* (4th Edition). John Wiley & Sons. 475 p.
- Jezný M., Vlčko J. & Hvožďara M., 2007: Teplota ako faktor štruktúrneho oslabenia horninových masívov. *Geotechnika*, 10, 3, 8–15.
- Johnson W.H. & Parsons W.H., 1944: Thermal expansion of concrete aggregate materials. *Journal of Research of the U. S. National Bureau of Standards*, 32, 101–126.
- Leiss B. & Weiss T., 2000: Fabric anisotropy and its influence on physical weathering of different types of Carrara marbles. *Journal of Structural Geology*, 22, 11–12, 1737–1745.
- López-Arce P., Varas-Muriel M.J., Fernández-Revuelta B., Álvarez de Buergo M., Fort R. & Pérez-Soba C., 2010: Artificial weathering of Spanish granites subjected to salt crystallization tests: Surface roughness quantification. *Catena*, 83, 2–3, 170–185.
- Ramana Y.V. & Sarma L.P., 1980: Thermal expansion of a few Indian granitic rocks. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 22, 1, 36–41.

- Rosenholtz J.L. & Smith D.T., 1950: Crestmore sky blue marble, its linear thermal expansion and color. *American Mineralogist*, 35, 11–12, 1049–1054.
- Ruedrich J., Bartelsen T., Dohrmann R. & Siegesmund S., 2010: Building sandstone integrity affected by the process of hygric expansion. *Environmental Earth Sciences*. doi: 10.1007/s12665-010-0767-0.
- Sage J.D., 1988: Thermal microfracturing of marble. In: Marinos P.G. & Koukis G. (Eds.): *Engineering geology of ancient Works, monuments and historical sites*. Balcema, Rotterdam, 1013–1018.
- Siegesmund S., Ullemeyer K., Weiss T. & Tschegg E.K., 2000^a: Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. *International Journal of Earth Sciences*, 89, 170–182.
- Siegesmund S., Weiss T. & Tschegg E.K., 2000^b: Control of marble weathering by thermal expansion and rock fabrics. In: Fassinga V. (Ed.): *9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, 1, Elsevier, Venice, 205–213.
- STN EN 14 581: 2005: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie koeficienta lineárnej teplotnej rozťažnosti.
- STN EN ISO 4287: 1999: Geometrické špecifikácie výrobkov (GPS). Charakter povrchu: Profilová metóda – Termíny, definície a parametre charakteru povrchu.
- Vlčko J., Jezný M. & Pagáčová Z., 2005: Influence of Thermal Expansion on Slope Displacements. In: Sassa K., Fukuoka H., Wang F. & Wang G. (Ed.): *Landslides: Risk Analysis and Sustainable Disaster Management. Proceedings of the First General Assembly of the International Consortium on Landslides*, Washington, Springer Verlag, 7, 71–74.
- Vlčko J., Greif V., Gróf V., Jezný M., Petro L. & Brček M., 2009^a: Rocks displacement and thermal expansion study at historic heritage sites in Slovakia. *Environmental Geology*, 58, 1727–1740.
- Vlčko J., Brček M., Vařilová Z. & Zvebil J., 2009^b: Deformation Monitoring at Cultural Heritage Sites. In: Huang J. (Ed.): *World Danxia, 2nd Collection, First International Symposium on Danxia Landform*, 26–28 May, Danxian, Guangdong China, 317–324.
- Weiss T., Leiss B., Oppermann H. & Siegesmund S., 1999: Microfabric of fresh and consequences for the reconstruction of the Marpor palais Postdam. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 150, 2, 313–332.
- Weiss T., Siegesmund S. & Fuller E.R., 2002: Thermal stresses and microcracking in calcite and dolomite marble via finite element modeling. In: Siegesmund S., Weiss T. & Vollbrecht A. (Eds.): *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies*. Geological Society, London, Special Publications, 205, 89–102.
- Widhalm C., Tschegg E. & Eppensteiner W., 1997: Acoustic emission and anisotropic expansion when heating marble. Institute for Applied and Technical Physics, Technical University Vienna, Austria. *Journal Performance of Constructed Facilities*, ASCE, 11, 35–40.

Summary: Travertines from the territory of Slovakia (Spišské Podhradie and Ludrová) were selected (Fig. 1) to investigate the relationship between their anisotropy of the thermal expansion and the residual dilatation behavior after multiply cycles of heating and cooling. In order to understand these effects (Tab. 1).

Basic identification properties of studied travertine types were determined - real and apparent density, open and total porosity, water absorption (Tab. 2). Non-destructive tests were to complete physical properties of travertines like ultrasonic wave velocity, total colour difference, total chroma difference and surface roughness parameters.

Ultrasonic wave velocity measurements are a powerful and sensitive tool for the damage assessment of rock material, propagation of ultra-

sonic wave velocity was measured before and after each thermal load to evaluate the increase of V_p (P-wave velocity). P-wave propagation time was measured with a Controls UPV E-49 apparatus. The anisotropy of travertines was reflected in different ultrasonic velocities measured in different orientations in relation to the bedding planes. The higher values of ultrasonic velocities were determined parallel to the bedding while the perpendicular direction had slower velocities. A decrease in ultrasonic wave velocity is apparent from the results caused by the thermal load. Effect of five heating cycles caused 4–8 % reduction of P-wave velocity for Spišské Podhradie travertine, for Ludrová travertine it was only 0,3–1 % reduction.

Colour measurements were carried out with a spectrophotometer Minolta CM-700d (Fig. 2). Data were collected as CIE $L^*a^*b^*$ coordinates (Tab. 3). Influence of thermal load on the samples of travertine very significantly.

The topography (roughness) of travertine samples was measured by non-contact surface profilometer Traceit[®] (Fig. 3) to make 3D-topography analysis (Fig. 8,9). The optical roughness was measured on the top and bottom surfaces of the travertine specimens before and after the thermal load and the roughness parameter R_a – arithmetic mean of the absolute values of profile deviations from the mean line, were defined as stipulated in DIN EN ISO 4287 standard. The optical roughness on the samples were recorded slightly decrease of R_a values (Tab. 4).

Thermal expansion measurements were performed by using a thermodilatometer VLAP 04 (Fig. 4). The sample size corresponds to a cylinder of 50 x 34 mm. This setup allows the simultaneous measurement of two specimens at identical experimental conditions. In order to simulate temperature changes comparable to those observed under natural conditions the upper temperature limit was fixed at +60 °C with 5 heating cycles.

The thermal linear expansion expresses the relative length change of a sample with temperature effect. The temperature is non-linear, i.e. the thermal expansion coefficient which describes the specific length change ($10^{-3} \text{ mm.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$) depends on the considered temperature interval. The thermal expansion coefficient (Tab. 5, Fig. 13) were obtained on the same specimens as used to determine the physical indices, like ultrasonic wave velocity, change of colour and optical surface roughness.

Effect of thermal load on the linear thermal expansion coefficient was considerable. All specimens exhibited lower coefficient of linear thermal expansion after each thermal cycle, which indicates weakening of the rock samples, i.e. the rock specimens are less resistant to the thermal effects prior to the thermal cycling substituted by the thermal dilatation of the weakened rock.

No considerable visual changes were observed on the specimens after the thermal load from 25 to 60 °C. The weakening of the rock material was observed only by means of ultrasonic velocities change, insensible change of colour, change in optical roughness and changes in thermophysical properties like coefficient of linear thermal expansion and residual dilatation.