

Distribúcia teploty, jej režim a hĺbkový dosah v travertínovom masíve podložia Spišského hradu

Martin Brček, Ján Vlčko, Zuzana Kompaníková, Vladimír Greif & Tatiana Durmeková

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

AGEOS Temperature distribution, its regime and penetration depth in the travertine massif of Spiš Castle subgrade

Abstract: The main goal of this paper is to illustrate some causal phenomena acting in nearby surface of the rock mass from the viewpoint of permanent factor temperature, or more precisely temperature change. Authors submit long-time research information about temperature regime in the travertine rock mass forming the subgrade of the Spiš Castle. The research has shown that diurnal temperature changes influence mainly superficial parts of rock mass (to the depth of 1.5 m), deeper parts of rock mass are influenced by temperature change with longer time period, e.g. annual time period. Simultaneously, relation between moisture or saturation of the rock mass and temperature change with the depth within rock mass was determined. From these relations it was found out, that the precipitation rate higher than 1.5 mm.day⁻¹ increased the depth of diurnal temperature changes by 0.3 m as compared to the period without precipitation.

Key words: rock massif, termophysical parameters, temperature monitoring, diurnal and annual temperature change, Spiš Castle subgrade

1. ÚVOD

Teplotné zmeny majú významný podiel na procesoch, ktoré sa uskutočňujú v horninovom prostredí. Nielen extrémne, ale i prirodzené (zvyčajné) teplotné výkyvy – teplotné rozdiely vyvolávajú v horninovom masíve, resp. horninovom materiáli objemové zmeny, ktoré podmieňujú ako nárast vnútorných napätí, tak aj veľkosť deformácie (Jezný et al., 2007; Vlčko et al., 2009^a, 2009^b; Brček et al., 2010). Nielen vplyvom teplotných procesov, ale vplyvom i ďalších mechanických, ako aj chemických a biologických procesov dochádza k postupnému zhoršovaniu vlastností horninového masívu. Podľa ich rozsahu a povahy môže dôjsť dokonca k okamžitej deštrukcii alebo k pomalému – dlhodobému narúšaniu horniny s častým kumulatívnym účinkom, nadobúdajúcim až ničivý charakter.

Väčšina experimentov a úvah týkajúcich sa zhoršenia vlastností hornín vplyvom teplotných zmien sa zakladá na pozorovaniach (extrémov) dennej teploty a to buď na obmedzenom súbore teplôt z ľubovoľnej hĺbkovej úrovne, alebo na jedinom údaji o maximálnej teplote povrchu horniny (Smith, 1977; Winkler, 1977; McGreevy & Smith, 1982; McGreevy, 1985; Goudie, 1989; Hall & Hall, 1991). Z pohľadu objektívizácie skúmania termofyzikálnych podmienok v komplexnom systéme horninových masívov je nemysliteľné, aby jeden (extrémny) teplotný údaj charakterizoval teplotný režim horninového masívu, resp. aby tento vystihoval klimatické pásmo územia, v ktorom sa nachádza. Navyše, ak by do procesu vyhodnocovania teplotných zmien vstupovali takéto údaje, potom je otázne do akej miery je tento proces vyhodnocovania realistický (Jenkins & Smith, 1990). S ohľadom na vyššie uvedené fakty, považujeme

za nevyhnutné vykonávať v horninových masívoch (prípadne v horninových materiáloch) niekoľkoročný monitoring teploty a až na základe takto získaných dát študovať poznatky o distribúcii teploty, jej režime a hĺbkovom dosahu. Autori článku sa o tento prístup pokúsili, keď na záujmovej lokalite Spišský hrad vykonali päťročný teplotný monitoring.

2. PRÍRODNÉ POMERY

Územie severnej časti Hornádskej kotliny, tzv. Podhradskej kotliny (Mazúr & Lukniš 1986) je charakteristické komplexom relatívne mohutných (15 až 52 m) elevácií travertínových kôp, ku ktorým patrí aj tá, na ktorej je postavený Spišský hrad.

Klimaticky patrí územie do mierne teplej a mierne vlhkej oblasti so studenou zimou (Lapin et al., 2002). Priemerné ročné teploty vzduchu dosahujú 6,8 °C (meteorologická stanica Spišské Vlchy; Šťastný et al., 2002). Priemerný dlhodobý zrážkový úhrn za rok kolíše v rozmedzí od 600 do 700 mm (Faško & Šťastný, 2002). Geologické podložie tvoria mezozoické a paleogénne komplexy hornín, kvartérne, resp. neogénne sedimenty tvoria najvyššie polohy, vrátane travertínových kôp. V bezprostrednom podloží hradu sa vyskytuje hutianske súvrstvie paleogénneho veku patriace centrálno-karpatskej paleogénnej panve, ktoré je tvorené vápnitými ílovcami, drobnozrnnými zlepcami, pieskovecami, siltovcami. Súvrstvie transgreduje na podložný mezozoický komplex silicika stratenskej skupiny (Gross et al., 1999).

Ako je uvedené vyššie, dominantnou črtou územia sú výskyt travertínových kôp. Z nich najvýraznejšie sú travertínová kopa Spišského hradu (hrúbka 52 m) a kopa Drevení, obe známe

Tab. 1. Fyzikálno-mechanické vlastnosti travertínu podložia Spišského hradu.

Tab. 1. Physical-mechanical properties of travertine in foundations of Spiš Castle.

Parameter	Symbol	Jednotka Unit	Hodnota Value
Objemová hmotnosť Bulk density of rock	ρ_d	(kg.m ⁻³)	2274,67
Merná hmotnosť True specific rock	ρ_s	(kg.m ⁻³)	2661,25
Pórovitosť horniny Rock porosity	n	(%)	14,53
Hmotnostná nasiakavosť Absorption capacity of rock	N	(%)	2,22
Pevnosť v jednoosom tlaku Uniaxial compressive strength	σ_c	(MPa)	83,04
Modul pružnosti Modulus of rock elasticity	E	(GPa)	58,33
Poissonovo číslo Poisson ratio	ν	(-)	0,20

z literatúry ako deformácie blokového charakteru (Nemčok & Svatoš, 1974). Travertíny na záujmovej lokalite sú v prevažnej miere sivobielej až bielej farby, amorfné, prípadne veľmi jemnozrnné. Charakteristická je pre ne rôznorodá pórovitosť v rozmedzí od mikropórov až po dutiny, ktoré sú často vyplnené kalcitom, prípadne aragonitom (Vlčko et al., 1998; Vlčko, 2002). V tab. 1 sú uvedené údaje o fyzikálno-mechanických vlastnostiach študovaného travertínu. Stanovenie všetkých uvedených fyzikálnych a mechanických vlastností sa vykonalo v laboratóriu pracoviska Katedry inžinierskej geológie Prírodovedeckej fakulty Univerzity Komenského v Bratislave podľa platných technických noriem – STN EN 1936, STN EN 13755, STN EN 1926 a STN EN 14580.

3. METODICKÝ POSTUP

Popri terénnom výskume termofyzikálnych parametrov, časť prác sme realizovali aj v laboratóriu a v závere pri vyhodnotení výsledkov bolo potrebné kombinovať viaceré prístupy, metódy a nástroje, ktoré umožňujú skúmanie fyzikálno-termických procesov horninových masívov v celej ich zložitosti. Výsledky dosiahnuté jednotlivými metodickými postupmi sa komplementárne dopĺňajú, vzájomne na seba nadväzujú a umožňujú i vzájomné porovnanie.

3.1. Monitoring teploty skalného masívu

Aby bolo možné analyzovať vplyv klimatických cyklov na termofyzikálne procesy v horninovom masíve, bolo v priestore južnej časti hradného masívu tzv. Perúnovej skaly vo februári roku 2003 osadených päť kusov platinových odporových sní-

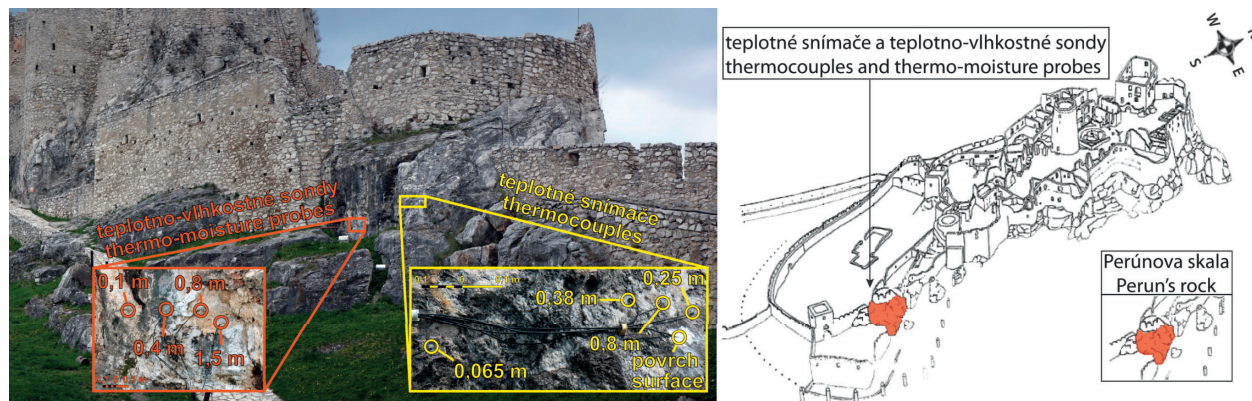
mačov teploty (Pt1000TGL40/0) s meracím rozsahom -30 až +100 °C. Štyri snímače teploty sú umiestnené v rozličných hĺbkach travertínového masívu (6,5 cm, 16 cm – neskôr v marci 2004 premiestnený do hĺbky 80 cm, 25 cm a 38 cm; Obr. 1) a piaty teplotný snímač zaznamenával do prvého kvartálu 2009 vonkajšiu teplotu vzduchu. Koncom apríla 2009 sme týmto snímačom začali merať povrchovú teplotu travertínového masívu. Teploty sa zaznamenávajú v pravidelných časových sekvenciách (každú hodinu) a údaje sa ukladajú na dataloger (STM-255). Hodinový interval snímania teploty bol navrhnutý preto, aby vzhľadom na naše technické a materiálové vybavenie, boli čo najpresnejšie zachytené teplotné maximá a minimá, ktoré sú dôležité pre určenie teplotných amplitúd v pozorovaných hĺbkových úrovniach skalného masívu.

Existujúci monitorovací systém bol rozšírený o teplotno-vlhkostné senzory (Obr. 1), ktoré prostredníctvom informácie o tepelných vlastnostiach horniny umožňujú získať údaje o vlhkosti v horninovom masíve. Monitorovanie prirodzeného teplotno-vlhkostného režimu začalo v decembri 2008, kedy boli v rozdielnych hĺbkových úrovniach osadené štyri teplotno-vlhkostné sondy (10, 40, 80 a 150 cm).

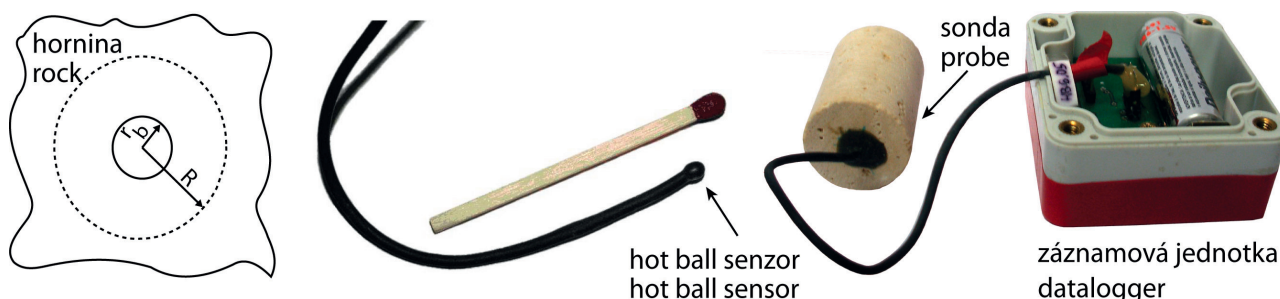
Na monitorovanie tohto procesu bol využitý senzor tepelnej vodivosti založený na princípe tzv. horúcej guľôčky (*hot ball*; Obr. 2). Prístroj RTM v.1.03 (dataloger) v spojení so sondou v pravidelných časových intervaloch zaznamenáva vlhkosť a teplotu v travertínovom masíve.

3.2. Laboratórne práce

Pre lepšie pochopenie termofyzikálnych procesov pôsobiach v dôsledku klimatických cyklov v horninových masívoch je



Obr. 1. Umiestnenie snímačov teploty a teplotno-vlhkostných sond na Spišskom hrade.
 Fig. 1. Location of thermocouples and thermo-moisture sensors at Spis Castle.



Obr. 2. Model metódy horúcej guľôčky (vľavo, r_b – polomer senzora, R – prestup tepla); senzor horúcej guľôčky (v strede); teliesko sondy a záznamová jednotka datalogger (upravené podľa Kubičár et al., 2006).
 Fig. 2. Model of the hot ball method (left, r_b - radius of the hot-ball sensor, R - heat penetration depth); hot ball sensor (in the middle); data logger connected to the hot ball probe (right) (according to Kubičár et al., 2006).

potrebné mať k dispozícii aj základné termofyzikálne vlastnosti travertínov. Z tohto dôvodu boli v laboratóriách pracoviska Fyzikálneho ústavu SAV určené ich termofyzikálne parametre (Tab. 2) akými sú koeficient tepelnej λ ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) a teplotnej vodivosti a_{lab} ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$) i špecifické teplo c ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$).

3.3. Základné východiská pre numerické stanovenie priebehu teplotného poľa v skalnom masíve

Priebeh teplotného poľa v skalnom masíve je možné stanoviť z in situ nameraných teplôt (zaznamenaných v širšom časovom horizonte) rozličnej hĺbkovej úrovne. Namerané teploty je nutné podrobiť verifikácii, ktorá môže byť spojená s prípadnou korekciou napr. vylúčením anomálnych hodnôt. Nadväzne na to, je potrebné vykonať analýzu a štatistické spracovanie teplotných dát, a až potom pristúpiť k analytickým výpočtom priebehu teplotných zmien.

Skalný horninový masív, pre účely výpočtových riešení, je potrebné zjednodušiť do formy ideálneho telesa (homogénny polpriestor s teplotnou vodivosťou a), ktorého povrch je vystavený vonkajším teplotným zmenám, a v ktorom nie sú iné zdroje tepla. Rozloženie teploty pritom závisí iba od vertikálnej súradnice z a času t . Túto predstavu možno matematicky vyjadriť úpravou parciálnej diferenciálnej rovnice vedenia tepla na tvar:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{a \partial^2 T}{\partial z^2}; T = T(z, t) \quad (1)$$

Zistenia meteorológov ukazujú, že teplotné zmeny pri povrchu Zeme sa rovnajú súčinu konštanty T_0 (v našom prípade ju predstavuje teplotná amplitúda A) s periodickou funkciou času. Najjednoduchším prípadom takejto periodickej funkcie je jediná kosínusová vlna, t.j. pre teplotnú zmenu pri povrchu $z = 0$ platí okrajová podmienka:

$$T|_{z=0} = A \cos \omega t \quad (2)$$

kde ω je kruhová frekvencia časových zmien, $\omega = 2\pi/\tau$; τ je perióda.

Podmienkou je, aby teplotné zmeny $T = T(z, t)$ vyvolané periodickým slnečným žiarením boli ďaleko od povrchu polpriestoru nulové; t.j. platí okrajová podmienka pre $z \rightarrow \infty$:

$$T(z, t) = 0 \quad (3)$$

Derivovaním rovnice (1) podľa t a z pri dodržaní spomenutých okrajových podmienok (2) a (3) dostaneme závislosť:

$$T(z, t) = A e^{-z/\delta} \cos(\omega t - z/\delta) \quad (4)$$

Tab. 2. Termofyzikálne vlastnosti travertínu.

Tab. 2. Thermophysical properties of the travertine.

Hornina Rock	Parametre horniny Rock parameters			
	a_{lab} ($m^2 \cdot s^{-1}$)	c ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	λ ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	α ($^{\circ}C^{-1}$)
	9,81E-7	934,00	2,13	4,74E-6
Skúšobné vzorky travertínu Travertine specimens	7,10E-7	850,00	1,36	6,36E-6
	-	-	-	4,16E-6
	-	-	-	3,95E-6
Priemer Average	8,46E-7	892,00	1,75	4,80E-6

kde, $\delta = \sqrt{2a/\omega} = \sqrt{a\tau/\pi}$ je hĺbka prieniku teplotných zmien (m). Táto rovnica poukazuje na fakt, že amplitúda teplotných zmien je exponenciálne tlmená s rastúcou hĺbkou. V hĺbke $z = \delta$ je amplitúda teplotných zmien Ae^{-1} , t.j. približne 1/3 z amplitúdy teploty povrchu horniny, resp. horninového masívu. Súčasne dochádza aj k fázovému oneskorenovaniu teplotných vln s hĺbkou. Zatiaľ čo na povrchu horninového telesa $z = 0$ je maximum teploty v čase $t = 0$, v hĺbke z ($z > 0$) je maximálna teplota s oneskorením v čase:

$$t_z = z/(\omega\delta) = z/\sqrt{2a\omega} = z\sqrt{\tau/4\pi a} \quad (5)$$

Modelovanie priebehu teplotných zmien v povrchových zónach horninového masívu možno pri poznaní amplitúdy zmien teploty A ($^{\circ}C$) a koeficientu teplotnej vodivosti a ($m^2 \cdot s^{-1}$) realizovať pre rozdielne časové periódy. V našom prípade sme použili dennú a ročnú časovú periódu.

Informáciu o amplitúde zmien teploty A ($^{\circ}C$) získame na základe priamych meraní teploty in situ. Základom pre správne stanovenie teplotnej amplitúdy je vhodne zvolený metodický postup štatistického spracovania teplotných dát. Čím vyššia je frekvencia meraní teploty, tým presnejšie je možné zachytiť extrémny vo výkyve teploty (McKay & Friedmann, 1985; Hall & André, 2001). Týka sa to najmä zimných mesiacov, keď i krátkodobý slnečný osvit môže spôsobiť náhly nárast teploty aj o niekoľko $^{\circ}C$. Vzhľadom na technické vybavenie, ktoré sme mali k dispozícii, ale i z hľadiska potrieb nášho výskumu, môžeme považovať za postačujúcu časovú frekvenciu zberu dát v hodinových intervaloch. Sčasti to vyplýva aj z poznatku, že záujmové územie sa nachádza v miernom klimatickom pásme, kde sa nepredpokladajú extrémne klimatické výkyvy, ako napr. v arktickom pásme, resp. vo vysokých nadmorských výškach. Veľkú dôležitosť je potrebné venovať i vhodnému štatistickému postupu na určenie hodnôt amplitúd zmien teploty. Ideálny spôsob spočíva v zistení minimálnych a maximálnych teplôt v pravidelne sa opakujúcich časových úsekoch (deň, týždeň,

mesiac, rok). Vymedzenie najkratšieho časového úseku, závisí od frekvencie merania; napríklad, ak sa meranie uskutočňuje každú hodinu, potom najkratší pravidelne sa opakujúci časový úsek, z ktorého je možné stanoviť teplotnú amplitúdu je 24 hod. Rozdiel medzi max a min hodnotou vyjadruje rozsah teploty t.j. $R = T_{max} - T_{min}$, tzn. pre každý zvolený časový úsek, sme osobitne stanovili T_{min} a T_{max} ; polovica z vypočítaného teplotného rozsahu definuje amplitúdu zmien teploty. Pre konkrétny časový úsek (deň, rok) sme za referenčnú hodnotu amplitúdy teplotných zmien z celého súboru vypočítaných amplitúd zvolili ich medián. Keďže dátový súbor obsahoval aj anomálne údaje, bolo potrebné ešte pred začatím celého postupu vykonať filtrovanie dát. Táto operácia v sebe zahŕňa ich analýzu uskutočnenú prostredníctvom nástroja poradovej štatistiky a percentilov, ako aj samotné vylúčenie nežiaducich údajov. Adekvátna a nami zvolená miera, podľa ktorej sme vykonali odstránenie chýb, zodpovedala 5-mu a 95-mu poradovému percentilu. Schematické znázornenie celého postupu výstižne zachytáva obr. 3.

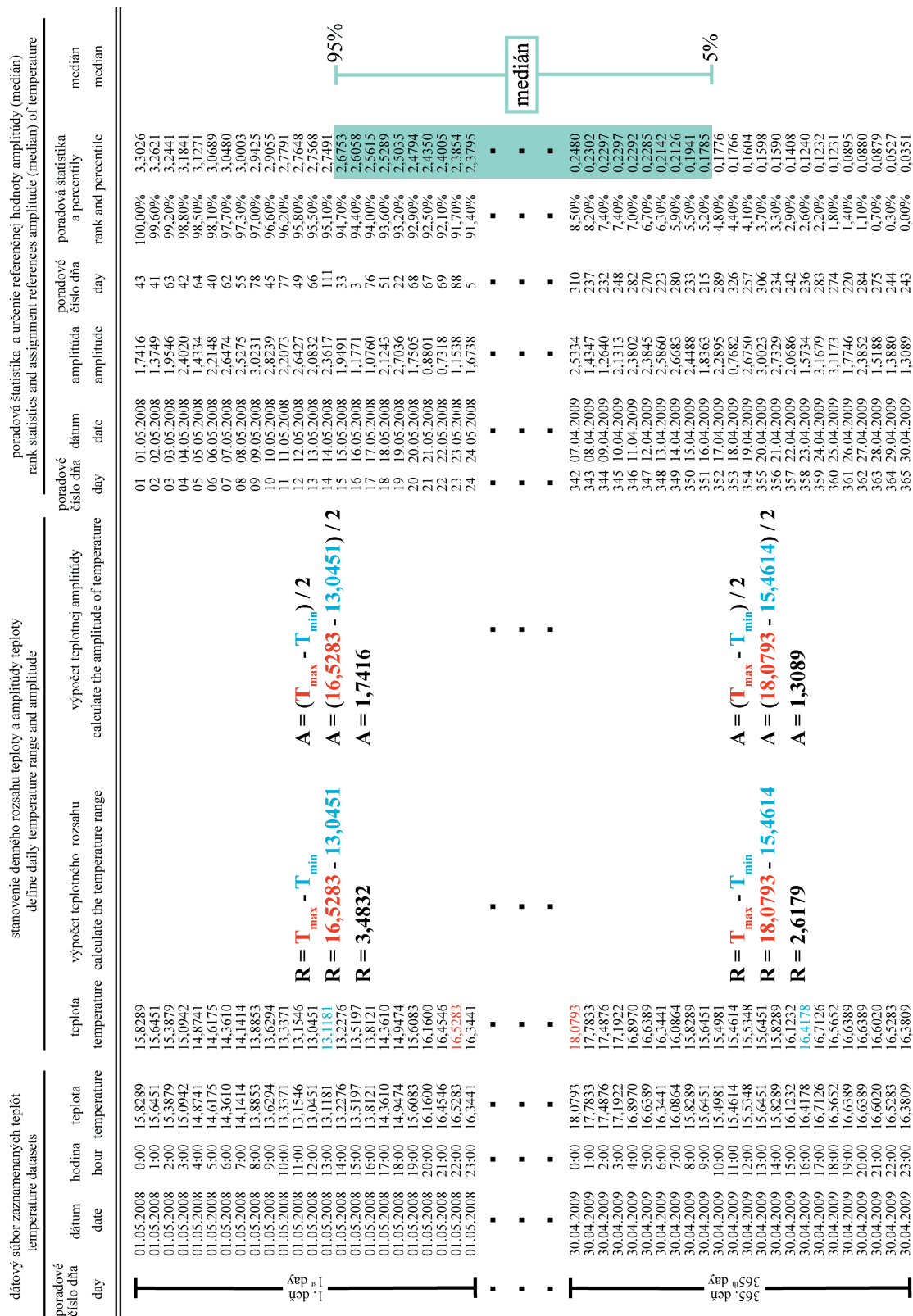
Pre zistenie koeficientu teplotnej vodivosti a ($m^2 \cdot s^{-1}$) bol použitý výpočet z in situ nameraných amplitúd teplotných zmien, ktorý je založený na poznatku, že smerom do hĺbky horninového masívu sa teplotné amplitúdy znižujú. Na základe uvedeného potom platí nasledujúci vzťah (Carslaw & Jaeger, 1959; Ingersoll, 2007):

$$\delta = (Z_j - Z_i) / \ln(A_j/A_i) \quad (6)$$

kde δ je hĺbka prieniku teplotných zmien (m), Z_j a Z_i sú hĺbky (m), ktorým prislúchajú amplitúdy teplotných zmien A_j a A_i ($^{\circ}C$).

Pre výpočet teplotnej vodivosti a ($m^2 \cdot s^{-1}$) platí nasledujúci vzťah:

$$a = (\delta^2 \pi) / \tau \quad (7)$$



Obr. 3. Schematické znázornenie postupu štatistického spracovania na určenie referenčnej dennej teplotnej amplitúdy v rámci ročného monitorovania.

Fig. 3. Schematic diagram of the statistical procedure for determination of the reference daily temperature variation for one-year monitoring period.

3.4. Stanovenie hodnoty teplotnej vodivosti pre dennú a ročnú periódu

Pri stanovení vodivosti pre dennú periódu je potrebné, podľa vzťahu (7), vypočítať pre každý deň v roku (365 dní, nezávisle od počiatku merania) teplotnú vodivosť, potom je potrebné vytvoriť percentuálne poradie pre každú hodnotu nachádzajúcu sa v dátovom súbore. Na základe tohto úkonu, ktorý umožňuje analyzovať relatívne umiestnenie hodnôt v množine údajov vykonáme selekciu (hrubé filtrovanie) dátového súboru, čím eliminujeme chyby (anomálne hodnoty) v dátovom súbore. Ako kritérium tzv. „filtra“ sme použili hranicu 5 a 95 percentilu. Nadväzne bol určený medián, ale len z rozsahu hodnôt tzv. „boxu“, ktorého horná hranica predstavuje 75-ty percentil a dolná hrana 25-ty percentil. Rozsah tzv. „boxu“ teda reprezentuje stredných 50% hodnôt súboru. Schematické zobrazenie celého postupu štatistického spracovania je na obr. 4. Výpočet ročnej teplotnej vodivosti je oveľa jednoduchší, pretože výsledkom rovnice (7) je len jedna hodnota pre daný rok.

4. PRIEBEH TEPLŔTNÝCH ZMIEN V TRAVERTÍNOVOM MASÍVE PERÚNOVEJ SKALY

Priebeh teplotných zmien v skalnom masíve je možné stanoviť dvoma spôsobmi: priamymi meraniami in situ a analytickým výpočtom. Vzájomným porovnaním môžeme zistiť, či teplotné zmeny v horninovom masíve zistené na základe výpočtov majú reálny priebeh alebo sú zatažené chybami (v meraniach, v neznalosti štruktúrno-textúrnych parametrov, vlhkosti i ďalších aspektov týkajúcich sa horninového materiálu i masívu).

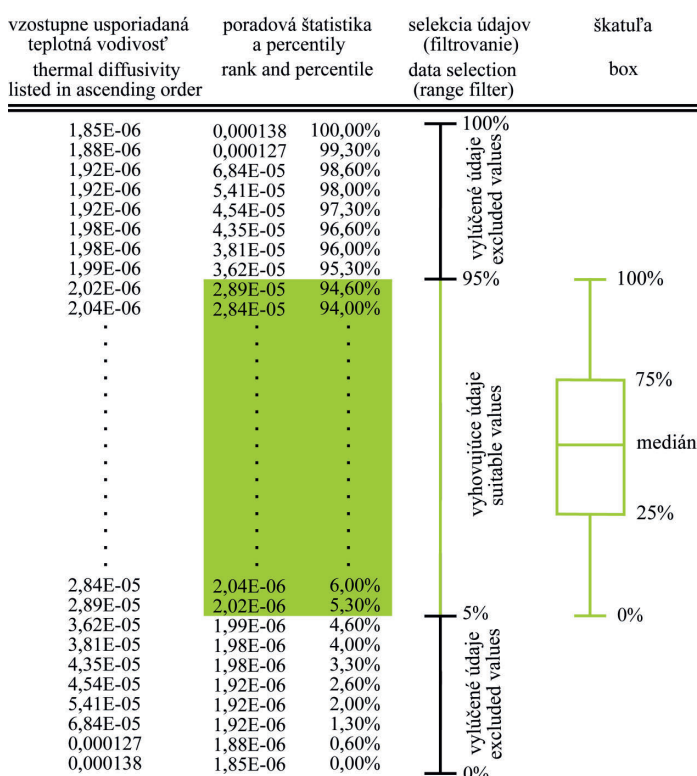
4.1. Stanovenie teplotných zmien in situ

Teplotné zmeny či už na povrchu alebo vo vnútri horninového masívu prebiehajú v rôznych časových škálach. Stručne sa dajú pre potreby inžinierskogeologickej praxe charakterizovať ako:

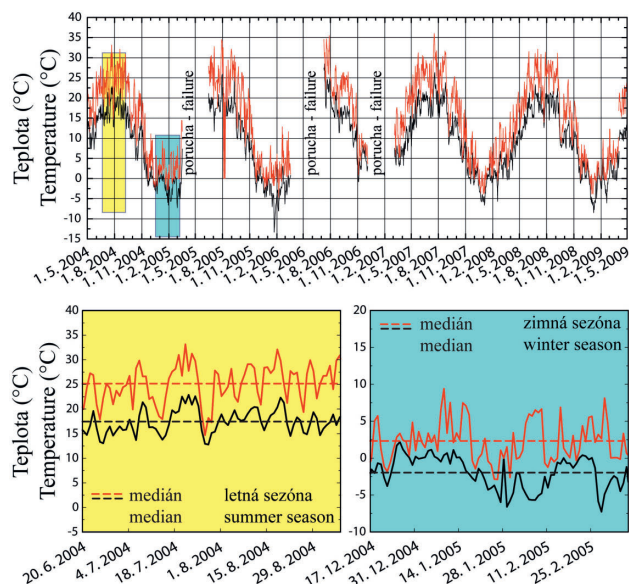
- ▶ neperiodické krátkodobé zmeny trvajúce v rozmedzí pár sekúnd až niekoľko minút, najčastejšie zapríčinené zmenami radiačnej bilancie v dôsledku náhleho oslnenia/zatienia horninového masívu alebo fluktuáciou vzduchových hmôt (rýchlosť vetra), búrkovou aktivitou (krátkodobý a intenzívny úhrn atmosferických zrážok a pod.);
- ▶ periodické zmeny: denné zmeny s periódou 24 hodín spôsobené rotáciou Zeme okolo vlastnej osi; sezónne zmeny s interanuálnou periódou (napr. jarné, letné, atď.) a ročné cykly s periódou 365 dní, ktorých príčinou je obeh Zeme okolo Slnka; viacročné zmeny s periódou 11 rokov, 22 rokov, 80–100 rokov zapríčinené napríklad periodickosťou slnečnej aktivity.

V našom výskume sme vychádzali z niekoľkoročných údajov o teplotných zmenách v rôznych hĺbkových úrovniach horninového masívu zaznamenávaných v hodinových intervaloch. Tieto údaje postačujú na to, aby z hľadiska denných a ročných cyklov bolo možné vykonať analýzu teplotných zmien v horninovom prostredí. Samozrejme, čím je vyššia frekvencia (niekoľko sekundová, minútová) meraní teploty, tým je vyššia pravdepodobnosť zachytenia i extrémov vo výkyve teploty horniny. Tieto údaje sú nutné vtedy, ak cieľom výskumu je ozrejmiť kolaps/deštrukciu hornín (v podobe vzniku mikrotrhlín, granularnej dezintegrácie, fragmentácie, atď.) zapríčinenú teplotnou únavou (*thermal fatigue*).

Medzi základné teplotné parametre, z ktorých vychádza analýza teplotných zmien v travertínovom masíve patria predovšet-



Obr. 4. Schematické zobrazenie postupu štatistického spracovania použitého pri výpočte mediánu dennej teplotnej vodivosti.
Fig. 4. Schematic diagram of the statistical procedure for determination of median daily thermal diffusivity.



Obr. 5. Graf priebehu teplôt v hĺbke 6,5 cm Perúnovej skaly.

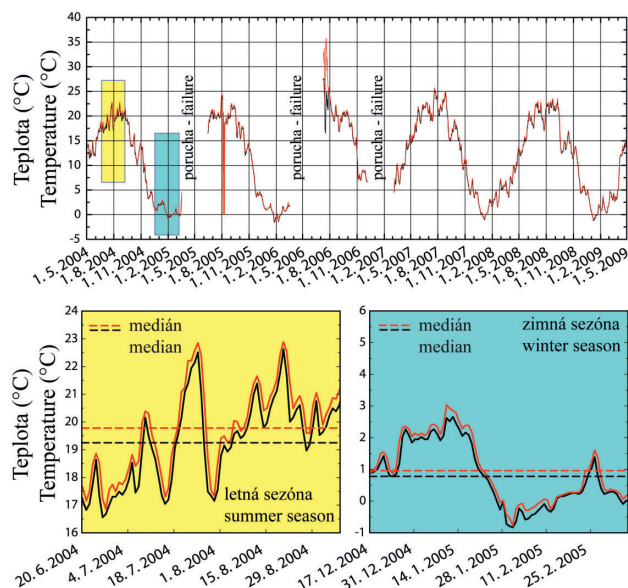
Fig. 5. Temperature diagram for Perún's rock at the depth of 6.5 cm.

kým maximálne a minimálne teploty, zistené pre denné a ročné časové úseky. Rozloženie teploty v horninovom masíve vhodne vystihujú grafy priebehu teplôt na obr. 5 a 6. Z grafov teplôt a vypočítaných mediánov vyplýva, že teplotné zmeny, resp. rozptatia medzi maximálnymi a minimálnymi dennými teplotami sú najväčšie v letných mesiacoch, v zimných mesiacoch sú najmenšie. V istej hĺbkovej úrovni, však dochádza ku konvergencii medzi dennými teplotnými maximami a minimami (Obr. 6). To poukazuje na všeobecne známy fakt, že pre povrch horninového telesa, ako i hĺbky plytko pod ním majú veľký význam denné zmeny teploty (Obr. 5), pričom pre hlbšie úrovne sú dôležité teplotné zmeny za dlhšie časové obdobie, napr. jedného roka.

4.2. Stanovenie teplotnej zmeny na základe rovnice vedenia tepla

Modelovanie priebehu teplotnej zmeny v travertínovom masíve Spišského hradu prostredníctvom analytického riešenia rovnice vedenia tepla (rovnica 1; kap. 3) sa odvíja od stanovenia amplitúdy teplotných zmien A ($^{\circ}\text{C}$) a koeficientu teplotnej vodivosti a ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Podľa aplikovaného metodického postupu boli určené ako denné, tak aj ročné amplitúdy teplotných zmien pre všetky monitorované hĺbkové úrovne. Výsledné hodnoty dennej amplitúdy teplotných zmien zistené na základe päťročných meraní (2004–2008) s výnimkou povrchu, sú prehľadne uvedené v tab. 3. V nej sa nachádza aj súhrnná hodnota amplitúdy zmien teploty pre celé obdobie monitorovania. Tento atribút bol vypočítaný ako medián zo štatistického výberu, ktorý pozostával zo všetkých odfiltrovaných hodnôt dennej teplotnej amplitúdy príslušnej hĺbkovej úrovne. Jeho vypovedajúca schopnosť je takto oveľa vyššia, ako keby bol počítaný ako stredná hodnota z už stanovených referenčných amplitúd teplotných zmien. Hodnoty ročných amplitúd teplotných zmien sú rovnako uvedené



Obr. 6. Graf priebehu teplôt v hĺbke 80 cm Perúnovej skaly.

Fig. 6. Temperature diagram for Perún's rock at the depth of 80 cm.

v tab. 3. Treba si však uvedomiť, že v tomto prípade sa nejedná o medián, pretože pre každý rok monitoringu sa vypočítala len jedna hodnota, ktorú sme automaticky považovali za reprezentatívnu, vstupujúcu do výpočtov. Z dôvodu extrémne malého počtu prvkov štatistického výberu sme pre určenie súhrnnej charakteristiky amplitúd ročných teplotných zmien zvolili medián, ktorý považujeme za najvhodnejší spomedzi štatistických ukazovateľov stredných hodnôt.

Z teplotných meraní vykonávaných v rôznych hĺbkových úrovniach travertínového masívu zaznamenaných počas piatich rokov sme podľa metodického postupu (teplotná vodivosť, kap. 3) stanovili i hodnoty teplotnej vodivosti pre dennú a ročnú periódu (Tab. 4).

Z dôvodu, že štatistický výber na určenie súhrnnej hodnoty ročnej teplotnej vodivosti obsahoval extrémne málo prvkov (len 5 údajov), môžeme za súhrnnú charakteristiku považovať medián určený z tohto výberu. Rozsah resp. priebeh teplotných zmien, pre dennú i ročnú periódu, v rôznych hĺbkach skalného masívu sme numerickým výpočtom stanovili z parametrov uvedených v tab. 3 a 4.

Modelovaním (výpočtom) sme stanovili hodnotu mediánu dennej amplitúdy teplotných zmien v hĺbke 0,065 m $A = 2,71$ $^{\circ}\text{C}$, v hĺbke 0,25 m $A = 1,53$ $^{\circ}\text{C}$, v 0,38 m $A = 1,02$ $^{\circ}\text{C}$, v 0,8 m $A = 0,28$ $^{\circ}\text{C}$ a v hĺbke 1,5 m kde sú teplotné zmeny minimálne $A = 0,03$ $^{\circ}\text{C}$. Porovnaním maximálnej hodnoty amplitúdy teplotných zmien stanovenej pre hĺbku 0,065 m s maximom teplotných vln v rozličných hĺbkach sme zistili, že tieto sú navzájom od seba fázovo posunuté, tzn. že došlo k časovému oneskoreniu, ktorého rozsah ilustruje obr. 7 a tab. 5. Sivé polia (interval údajov) v obrázku zahŕňajú teplotné vlny analyticky vypočítané pre dennú periódu za päťročné obdobie monitoringu; prerušovaná čiara vo vnútri polí zobrazuje ich medián; časové oneskorenie priebehu teplotnej vlny je znázornené červenou prerušovanou čiarou.

Tab. 3. Referenčné hodnoty teplotných amplitúd pre dennú a ročnú periódu stanovené na základe päťročného obdobia monitorovania.
Tab. 3. Reference values of diurnal and annual temperature amplitudes estimated from five years monitoring period.

Hĺbka (cm) Depth (cm)	Teplotná amplitúda (°C) Amplitude of temperature (°C)							
	1. rok merania 1 st year		2. rok merania 2 nd year		3. rok merania 3 rd year		4. rok merania 4 th year	
	(jan 04 – dec 04)		(jan 05 – dec 05)		(jan 06 – dec 06)		(jan 07 – dec 07)	
	Denná Daily	Ročná Annual	Denná Daily	Ročná Annual	Denná Daily	Ročná Annual	Denná Daily	Ročná Annual
6,5	2,60	16,30	2,85	17,28	2,65	18,06	2,96	16,12
25	1,15	13,76	1,23	14,44	1,32	16,15	1,72	14,16
38	0,63	11,80	0,89	14,61	1,14	15,64	1,24	12,98
80	0,18	9,75	0,14	11,09	0,15	13,62	0,20	10,70
	5. rok merania 5th year		1. – 5. rok merania from 1st to 5th year					
	(jan 08 – dec 08)		(jan 04 – dec 08)					
	Denná Daily	Ročná Annual	Denná Daily	Ročná Annual				
	6,5	2,40	15,01	2,71	16,30			
25	1,49	13,79	1,39	14,16				
38	1,06	12,88	0,93	12,98				
80	0,16	10,74	0,17	10,74				

Ak do výpočtov vstúpi medián ročnej teplotnej amplitúdy $A = 16,30$ °C stanovený z celého obdobia monitoringu teplot spolu s mediánom ročnej teplotnej vodivosti $a = 3,50841 \cdot 10^{-7}$ m².s⁻¹ dospejeme k zisteniu, že v hĺbke 0,25 m pod povrchom dôjde k redukcii teplotnej amplitúdy na 14,70 °C, v hĺbke 0,38 m na 13,72 °C, v hĺbke 0,8 m k zníženiu na 10,92 °C a v hĺbke až 7 m sa vyskytuje hodnota teplotnej amplitúdy 0,40 °C (Obr. 8). Maximum alebo minimum teplotnej amplitúdy dosiahne v hĺbke 0,8 m časové oneskorenie oproti hĺbke 6,5 cm, 22 dní 18 hodín a 2 minúty (Tab. 6).

4.3. Porovnanie výsledkov stanovených výpočtom s laboratórnymi a in situ meraniami

Zobrazenie priestorového rozloženia teplotných amplitúd (nameraných i vypočítaných) v plošných grafoch (Obr. 9 a 10) sa javí ako dostatočný spôsob vyjadrenia prieniku teplotných zmien pre travertínový masív podložia Spišského hradu. Ak grafy zobrazujú nielen teplotné amplitúdy získané z in situ meraní, ale

taktiež hodnoty analyticky vypočítané, potom je možnosť ich vzájomného porovnania. Polia s odtieňom modrej a zelenej farby znázorňujú interval resp. rozsah analyticky vypočítaných kriviek (hodnôt) priebehu teplotných zmien za monitorované obdobie. V prípade horného a dolného ohraničenia modrého poľa sa ako dôležitý vstupný parameter pre výpočet priebehu teplotných zmien použil koeficient teplotnej vodivosti (a_{field} ; Tab. 4) stanovený z in situ nameraných teplotných amplitúd (Tab. 3). Horné ohraničenie zodpovedá najvyššie položeným krivkám z celého súboru namodelovaných priebehov prieniku teplotných zmien počítaných na základe 75-teho percentilu teplotnej vodivosti. Spodné ohraničenie analogicky zodpovedá najnižšej krivke počítanej z 25-teho percentilu. Čierne plné krivky nachádzajúce sa vo vnútri poľa, znázorňujú priebeh teplotných zmien počítaných na základe mediánu teplotnej vodivosti (pre každý rok osobitne). Čierna prerušovaná čiara znázorňuje medián za celé monitorované obdobie (troch/piatich rokov). Okrem toho v grafoch je dôležitá doplňujúca informácia, ktorú reprezentuje krivka prieniku teplotných amplitúd, vypočítaná na základe laboratórne stanove-

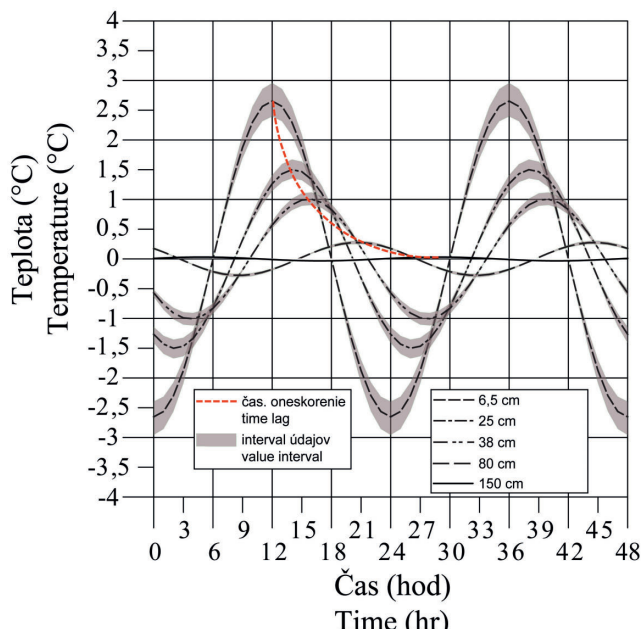
Tab. 4. Teplotná vodivosť za jednotlivé roky i za celé obdobie monitorovania vypočítaná z in situ nameraných teplôt. Poznámka: 1. a) hodnota zodpovedajúca 25-mu percentilu „boxu“; 2. b) hodnota zodpovedajúca 75-mu percentilu „boxu“; 3. c) hodnota zodpovedajúca mediánu „boxu“.
 Tab. 4. Thermal diffusivity for individual years and for the whole monitoring period calculated from in situ temperatures. Note: 1. a) value corresponding to the 25-percentile of the „box“; 2. b) value corresponding to the 75-percentile of the „box“; 3. c) value corresponding to the median of the „box“.

Periódna Period		Teplotná vodivosť a (m ² s ⁻¹) Thermal diffusivity a (m ² s ⁻¹)			
		1. rok merania 1 st year (jan 04 – dec 04)	2. rok merania 2 nd year (jan 05 – dec 05)	3. rok merania 3 rd year (jan 06 – dec 06)	4. rok merania 4 th year (jan 07 – dec 07)
Denná Daily	a)	1,125E-6	2,107E-6	3,519E-6	3,404E-6
	b)	2,292E-6	1,008E-5	1,001E-5	6,404E-6
	c)	1,385E-6	5,183E-6	4,636E-6	4,062E-6
Ročná Annual		9,465E-8	3,508E-7	4,765E-7	2,112E-7
		5. rok merania 5 th year (jan 08 – dec 08)	1. – 5. rok merania from 1 st to 5 th year (jan 04 – dec 08)		
Denná Daily	a)	3,385E-6	2,397E-6		
	b)	6,316E-6	6,510E-6		
	c)	4,303E-6	3,843E-6		
Ročná Annual		4,213E-7	3,508E-7		

Tab. 5. Útlm a fázoový posun mediánu dennej teplotnej amplitúdy.

Tab. 5. Temperature attenuation and time lag of median daily temperature amplitude.

Hĺbka (cm) Depth (cm)	Amplitúda (°C) Amplitude (°C)	Oneskorenie (min) Time lag (min)	Útlm (%) Attenuation (%)
6,5	2,71	0	0
25	1,53	130	43,45
38	1,02	222	62,17
80	0,28	518	89,62
150	0,03	1011	98,79

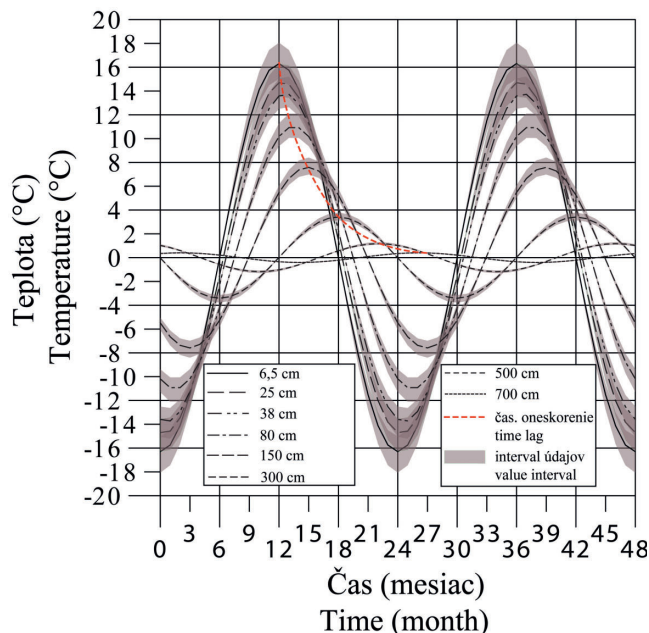


Obr. 7. Graf priebehu denných teplotných zmien v rôznych hĺbkach.
Fig. 7. Graph of the diurnal temperature changes for different depths.

nej teplotnej vodivosti (a_{lab} ; červená prerušovaná čiara). Táto, takisto ako krivka v predchádzajúcom prípade, vyjadruje medián za celé monitorované obdobie. Vrchnú a spodnú hranicu intervalu, v ktorom sa krivka prieniku teplotných amplitúd (vypočítaná na základe a_{lab}) nachádza tvorí najvyššie a najnižšie položená krivka zo súboru všetkých vypočítaných priebehov prieniku teplotných zmien stanovených na základe a_{lab} za celé monitorované obdobie. Je však potrebné zdôrazniť, že ich výpočet sa zakladal vždy len na jednej jedinej laboratórnej stanovenej hodnote teplotnej vodivosti (a_{lab} ; kap. 3, Tab. 2). Z takto zobrazených výsledkov sa dá usúdiť, že dosah denných teplotných zmien sa prejavuje približne do hĺbky 1,5 m (čierna prerušovaná čiara; Obr. 9), resp. cca do hĺbky 0,9 m (červená prerušovaná čiara). To dokumentuje že, dosah teplotných zmien vypočítaný podľa a_{lab} nedosahuje takých hĺbok, ako je to v prípade, keď vo výpočtoch použijeme a_{field} . Treba zdôrazniť, že namerané a vypočítané teplotné zmeny podľa a_{field} v monitorovaných hĺbkových úrovniach nadobúdajú primeranú zhodu, rozdiel je iba v hĺbke 0,8 m (Tab. 7).

Naopak, značne veľké rozdiely, vzhľadom k nameraným teplotám, dosahujú teplotné zmeny počítané s parametrom a_{lab} . Oneskorenie je viac ako dvojnásobné, ak do rovnice (5) vstúpi parameter a_{lab} (Tab. 8). Pri týchto konštatovaniach je potrebné si uvedomiť, že ak použijeme pre modelovanie priebehu teplotných zmien teplotnú vodivosť určenú v laboratóriu, musíme zohľadniť to, že bola stanovená pri teplote 25 °C, čo je však dôležitejšie, že bola stanovená na vysušenej vzorke malých rozmerov. Je teda pochopiteľné, že i dosah teplotných zmien bude menší v porovnaní s dosahom teplotných zmien počítaných z dát získaných priamo v teréne, pri prirodzenej vlhkosti so zachovanými makro i mikroštruktúrnymi znakmi skalného masívu.

Je však zaujímavé, že opačný trend nastal pri modelovaní prieniku ročnej teplotnej zmeny (Obr. 10). Dosiahnuté percentuálne rozdiely (Tab. 9) sa od seba až tak výrazne nelíšia



Obr. 8. Graf priebehu ročných teplotných zmien v rôznych hĺbkach.
Fig. 8. Graph of the annual temperature changes for different depths.

v porovnaní s dennými teplotnými zmenami. Aj v tomto prípade však platí, že väčšie teplotné rozdiely dosahujú teplotné zmeny počítané s parametrom a_{lab} . Šťastí to možno pripísať aj tomu, že sa porovnávali len pozorované hĺbkové úrovne, ktoré môžeme považovať za relatívne plytké vzhľadom k predpokladanému dosahu ročnej teplotnej zmeny, ktorá je zhruba rovná 10,5 m (čierna prerušovaná čiara). Na objasnenie teplotných rozdielov v hlbších úrovniach skalného masívu je možné využiť exponenciálnu trendovú čiaru, ktorá sa aplikuje na namerané teplotné amplitúdy (v tabuľke označená symbolom *). Odhliadnuc od toho, že výsledné hodnoty sú potom poznačené určitou mierou nepresnosti, dospejeme k zisteniu, že priebeh vypočítaný na základe a_{field} sa oveľa viac blíži k skutočnosti, ako priebeh počítaný na základe a_{lab} . Ak porovnáme i útlm teploty s hĺbkou a časové oneskorenia teplotných amplitúd (Tab. 10), dospejeme k obdobnému poznatku. Je však prekvapujúce, že ročná teplotná vodivosť stanovená analytickým výpočtom ($3,50841 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) nadobúda menšie hodnoty ako laboratórne stanovená teplotná vodivosť ($9,81 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Je to pravdepodobne spôsobené tým, že výpočtové riešenie platí pre homogénne, nekonečné prostredie resp. polpriestor a tým sa zanedbáva vnútorná stavba masívu v jej plnom rozsahu. Pórovitosť, plochy nespojitosti a pod., môžu vytvárať preferovanú cestu pre prúdenie vzduchu, podzemnej vody a tým logicky ovplyvňujú výsledky meraní. V konečnom dôsledku sa to premietne i do stanovenia teplotných amplitúd, a tým aj do výsledkov analytických výpočtov. Vzájomným porovnaním denných a ročných prienikov teplotných zmien je možné zistiť i to, že prejav ročnej zmeny predstavuje približne 6 až 7 násobok hĺbky denných prienikov. Zo zistení ďalej vyplýva aj to, že viac ako 50% útlm ročnej teplotnej amplitúdy bol dosiahnutý v hĺbke menšej ako 1,5 m. Pre denné teplotné zmeny sa táto hranica nachádza niekde v hĺbke medzi 0,25 až 0,38 m. Vychádzajúc z tohto poznatku, môžeme vrstvu travertínového

Tab. 6. Útlm a fázový posun mediánu ročnej teplotnej amplitúdy.

Tab. 6. Temperature attenuation and time lag of median annual temperature amplitude.

Hĺbka (cm) Depth (cm)	Amplitúda (°C) Amplitude (°C)	Oneskorenie Time lag			Útlm (%) Attenuation (%)
		(deň) (day)	(hod) (hr)	(min) (min)	
6,5	16,30	0	0	0	0,00
25	14,70	5	17	26	9,83
38	13,72	9	18	1	15,82
80	10,92	22	18	2	32,98
150	7,59	44	10	5	53,46
300	3,41	90	20	27	79,07
500	1,18	152	18	17	92,79
700	0,40	214	16	8	97,52

Tab. 7. Rozdiely denných teplotných zmien. Poznámka: 1. a) in situ nameraná teplotná amplitúda; 2. b) analyticky vypočítaná teplotná amplitúda na základe parametra a_{field} ; 3. c) analyticky vypočítaná teplotná amplitúda na základe parametra a_{lab} ; 4. a-b) rozdiel teploty/percentuálny rozdiel medzi in situ nameranou teplotnou amplitúdou a analyticky vypočítanou teplotnou amplitúdou na základe parametra a_{field} ; 5. a-c) rozdiel teploty/percentuálny rozdiel medzi in situ nameranou teplotnou amplitúdou a analyticky vypočítanou teplotnou amplitúdou na základe parametra a_{lab} .

Tab. 7. Differences for the diurnal temperature changes. Note: 1. a) amplitude of temperature measured in situ; 2. b) analytically calculated amplitude of temperature of the parameter a_{field} ; 3. c) analytically calculated amplitude of temperature of the parameter a_{lab} ; 4. a-b) temperature difference/percentage difference between in situ measured amplitude of temperature and analytically calculated amplitude of temperature by the parameter a_{field} ; 5. a-c) temperature difference/percentage difference between in situ measured amplitude of temperature and analytically calculated amplitude of temperature by the parameter a_{lab} .

Hĺbka (cm) Depth (cm)	Amplitúda (°C) Amplitude (°C)			Rozdiel teploty (°C) Temperature difference (°C)		Percentuálny rozdiel (%) Percentage difference (%)	
	a	b	c	a - b	a - c	a - b	a - c
6,5	2,71	2,71	2,71	0,00	0,00	0,00	0,00
25	1,39	1,53	0,87	0,14	0,52	10,00	37,13
38	0,93	1,02	0,40	0,09	0,54	9,58	57,59
80	0,17	0,28	0,03	0,11	0,14	69,20	81,43

masívu vymedzenú povrchom a práve touto podpovrchovou hĺbkou považovať za teplotne najviac atakovanú.

4.4. Priebeh a dosah denných teplotných zmien verzus zrážková činnosť

Je zrejmé, že na hĺbkový dosah teplotných zmien vplýva viacero faktorov, medzi iným aj prítomnosť vody, resp. nasýtenie hor-

ninového masívu alebo jeho zvýšená prirodzená vlhkosť. Na obr. 11 možno pozorovať závislosť dosahu denných teplotných zmien od zrážkovej činnosti v období od 25.5. do 5.6.2009. Pre tieto dni bol osobitne stanovený rozsah, teplotných zmien v rôznych hĺbkach skalného masívu Perúnovej skaly prostredníctvom numerického modelovania (kap. 3). Vo výpočtoch sa za vstupnú hodnotu amplitúdy zmien teploty A (°C) a koeficientu teplotnej vodivosti a_{field} ($m^2 \cdot s^{-1}$) dosadili hodnoty stanovené

Tab. 8. Porovnanie útlmu a oneskorenia mediánu dennej teplotnej amplitúdy. Poznámka: 1. a) in situ nameraná teplotná amplitúda; 2. *) teplotná amplitúda A vypočítaná pre danú hĺbku podľa regresnej rovnice $\ln(Y) = -0,0381060356 * X + 1,289998724$; 3. b) analyticky vypočítaný atribút (teplotná amplitúda, oneskorenie, útlm) na základe parametra a_{field} ; 4. c) analyticky vypočítaný atribút (teplotná amplitúda, oneskorenie, útlm) na základe parametra a_{lab} .

Tab. 8. Comparison of the attenuation and time lag of the median daily temperature amplitude. Note: 1. a) amplitude of temperature measured in situ; 2. *) amplitude of temperature calculated for that one depth by the regression equation $\ln(Y) = -0,0381060356 * X + 1,289998724$; 3. b) analytically calculated attribute (amplitude of temperature, time lag, attenuation) by the parameters a_{field} ; 4. c) analytically calculated attribute (amplitude of temperature, time lag, attenuation) by the parameters a_{lab} .

Hĺbka (cm) Depth (cm)	Amplitúda (°C) Amplitude (°C)			Oneskorenie Time lag				Útlm (%) Attenuation (%)		
	a	b	c	(hod)	(min)	b	c	a	b	c
				(hr)	(min)					
6,5	2,71	2,71	2,71	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
25	1,39	1,53	0,87	2	4	10	18	48,59	43,45	67,68
38	0,93	1,02	0,40	3	7	42	19	65,48	62,17	85,36
80	0,17	0,28	0,03	8	17	38	5	93,87	89,62	98,86
150	* 0,01	0,03	0,00	16	33	51	22	99,56	98,79	99,98

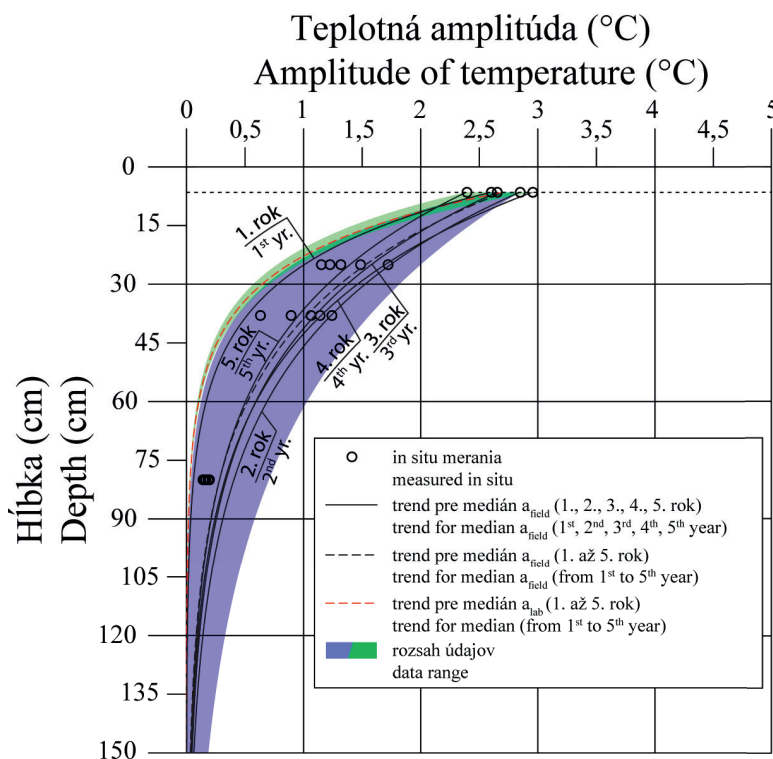
Tab. 9. Rozdiely ročných teplotných zmien. Poznámka: 1. a) in situ nameraná teplotná amplitúda; 2. b) analyticky vypočítaná teplotná amplitúda na základe parametra a_{field} ; 3. c) analyticky vypočítaná teplotná amplitúda na základe parametra a_{lab} ; 4. a–b) rozdiel teploty/percentuálny rozdiel medzi in situ nameranou teplotnou amplitúdou a analyticky vypočítanou teplotnou amplitúdou na základe parametra a_{field} ; 5. a–c) rozdiel teploty/percentuálny rozdiel medzi in situ nameranou teplotnou amplitúdou a analyticky vypočítanou teplotnou amplitúdou na základe parametra a_{lab} ; 6. *) teplotná amplitúda A vypočítaná pre danú hĺbku podľa regresnej rovnice $\ln(Y) = -0,005533033061 * X + 2,801585549$.

Tab. 9. Differences for the annual temperature changes. Note: 1. a) amplitude of temperature measured in situ; 2. b) analytically calculated amplitude of temperature of the parameter a_{field} ; 3. c) analytically calculated amplitude of temperature of the parameter a_{lab} ; 4. a–b) temperature difference/percentage difference between in situ measured amplitude of temperature and analytically calculated amplitude of temperature by the parameter a_{field} ; 5. a–c) temperature difference/percentage difference between in situ measured amplitude of temperature and analytically calculated amplitude of temperature of the parameter a_{lab} ; 6. *) amplitude of temperature calculated for that one depth by the regression equation $\ln(Y) = -0,005533033061 * X + 2,801585549$.

Hĺbka (cm) Depth (cm)	Amplitúda (°C) Amplitude (°C)			Rozdiel teploty (°C) Temperature difference (°C)		Percentuálny rozdiel (%) Percentage difference (%)	
	a	b	c	a – b	a – c	a – b	a – c
6,5	16,30	16,30	16,30	0,00	0,00	0,00	0,00
25	14,16	14,70	15,34	0,54	1,18	3,80	8,33
38	12,98	13,72	14,67	0,74	1,69	5,70	13,01
80	10,74	10,92	12,89	0,18	2,15	1,71	20,01
150	* 7,18	7,59	10,30	0,40	3,11	5,62	43,34
300	* 3,13	3,41	6,36	0,28	3,23	8,93	102,98
500	* 1,04	1,18	3,38	0,14	2,35	13,47	226,57
700	* 0,34	0,40	1,78	0,06	1,43	18,15	418,64

Obr. 9. Priebeh a dosah denných teplotných zmien.

Fig. 9. Daily temperature curve and penetration depth of temperature changes.



Poznámka/Note:

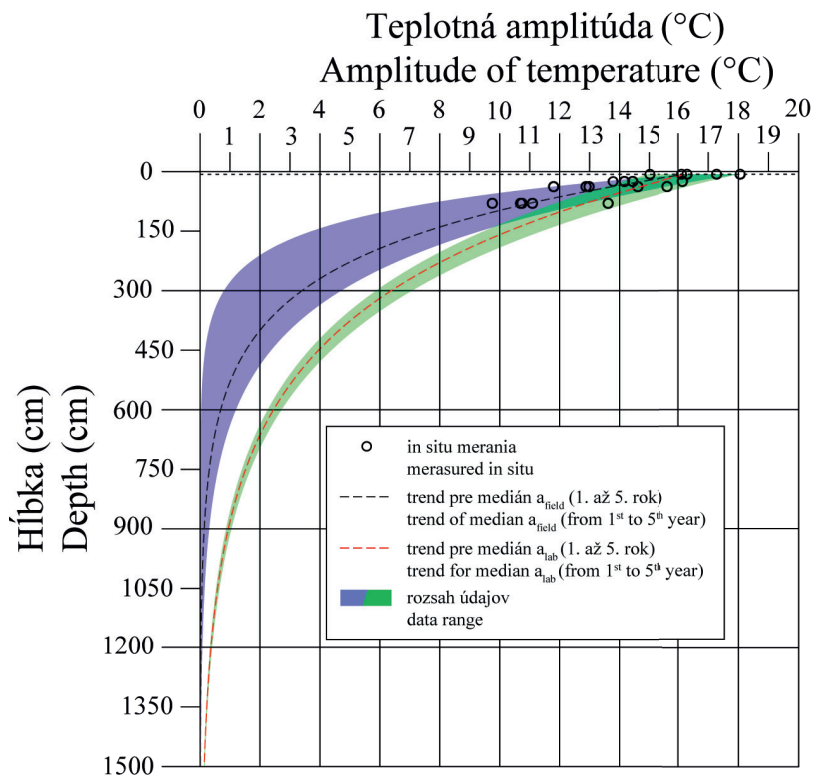
1. Regresná rovnica trendovej čiary pre medián a_{field} (1. rok): $\ln(Y) = -0,05123776335 * X + 1,28677576$
Regression equation for median a_{field} (1st year): $\ln(Y) = -0,05123776335 * X + 1,28677576$
2. Regresná rovnica trendovej čiary pre medián a_{field} (2. rok): $\ln(Y) = -0,02654046524 * X + 1,218386039$
Regression equation for median a_{field} (2nd year): $\ln(Y) = -0,02654046524 * X + 1,218386039$
3. Regresná rovnica trendovej čiary pre medián a_{field} (3. rok): $\ln(Y) = -0,02800954169 * X + 1,1566784$
Regression equation for median a_{field} (3rd year): $\ln(Y) = -0,02800954169 * X + 1,1566784$
4. Regresná rovnica trendovej čiary pre medián a_{field} (4. rok): $\ln(Y) = -0,02992654355 * X + 1,276615197$
Regression equation for median a_{field} (4th year): $\ln(Y) = -0,02992654355 * X + 1,276615197$
5. Regresná rovnica trendovej čiary pre medián a_{field} (5. rok): $\ln(Y) = -0,02907315938 * X + 1,059690933$
Regression equation for median a_{field} (5th year): $\ln(Y) = -0,02907315938 * X + 1,059690933$
6. Regresná rovnica trendovej čiary pre medián a_{field} (1. až 5. rok): $\ln(Y) = -0,03077477403 * X + 1,194586952$
Regression equation for median a_{field} (from 1st to 5th year): $\ln(Y) = -0,03077477403 * X + 1,194586952$
7. Regresná rovnica trendovej čiary pre medián a_{lab} (1. až 5. rok): $\ln(Y) = -0,06087215643 * X + 1,387782233$
Regression equation for median a_{lab} (from 1st to 5th year): $\ln(Y) = -0,06087215643 * X + 1,387782233$

z in situ meraní teplotno-vlhkostnej sondy umiestnenej v hĺbke 0,1 m. V pozorovaných dňoch bola zaznamenaná rozličná intenzita zrážkovej činnosti, ktorá sa menila v rozsahu od 0 do $12,5 \text{ mm} \cdot \text{deň}^{-1}$ (Obr. 12). Počas dní so žiadnym, resp. minimálnym t.j. $\leq 1,5 \text{ mm} \cdot \text{deň}^{-1}$ úhrnom zrážok, dosah denných teplotných zmien sa prejavil do hĺbky 1,05, resp. 1,18 m (reprezentovaný plnou a prerušovanou čiarou v obr. 11). V dňoch so zrážkovou činnosťou väčšou ako $1,5 \text{ mm} \cdot \text{deň}^{-1}$ sa tento vplyv prejavil do hĺbky o 0,3 m väčšej, čím prekročil hranicu 1,35 m (bodkovaná čiara). Ak sa pozornosť zacieli na priebeh kriviek zistíme, že majú rozdielny spád. V čase bez zrážok klesá krivka (plná čiara) strmšie, v porovnaní s obdobím so zvýšenou (bodkovaná čiara), ako i s miernou zrážkovou činnosťou (prerušovaná čiara). Na základe týchto pozorovaní sa dá usudzovať, že čím je priebeh krivky teplotných zmien strmší, tým je hĺbkový dosah zmien teploty v skalnom masíve menší a naopak, čím je priebeh plytší, tým je dosah teplotných zmien väčší. Predstavu o veľkosti úbytku na intenzite teplotných zmien v závislosti od narastajúcej hĺbky zohľadňuje tab. 11. V hĺbke 0,4 m je útlm analyticky vypočítanej teplotnej amplitúdy v období bez zrážok blízko hranice 80%, pričom v dňoch so zvýšenou zrážkovou činnosťou (nad $1,5 \text{ mm} \cdot \text{deň}^{-1}$) je len necelých 65%.

5. INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV

Určenie hĺbky prieniku teplotných zmien v skalnom masíve je v prevažnej miere založené na nepriamych metódach. Napriek tomu, že aplikované výpočty založené na rovnici vedenia tepla sú relatívne jednoduché, náročné je spracovanie vstupných parametrov. To všetko si vyžaduje určitú mieru skúsenosti a odborných vedomostí, nielen z oblasti termofyziky, ale aj z iných odborov (štatistiky, informatiky a ďalších). Všetky pracovné postupy týkajúce sa výpočtov sú napriek jednoduchosti veľmi časovo náročné. Na dosiahnutie čo najkvalitnejšieho výsledku je potrebné venovať veľkú pozornosť úvodnej etape týkajúcej sa verifikácie a úpravy databázy údajov, ktorá pozostáva z in situ nameraných dát.

Na skúmanie teplotných zmien v zónach blízko povrchu geologických telies je potrebné modelovať prienik teploty v rôznych časových periódach (denná, ročná). Ak predpokladáme, že teplotné zmeny sú kvázi periodické, potom prostredníctvom rovnice vedenia tepla je možné stanoviť priebeh teplotnej vlny v čase a priestore, ako aj fázové posuny periodických zmien teploty v horninovom masíve. Keďže horninové prostredie je nehomogénne je pochopiteľné, že pri porovnávaní výsledkov



Obr. 10. Priebeh a dosah ročných teplotných zmien.

Fig. 10. Annual temperature curve and penetration depth of temperature changes.

Poznámka/Note:

1. Regresná rovnica trendovej čiary pre medián a_{field} (1. až 5. rok): $\ln(Y) = -0,005328953868 * X + 2,823637363$
Regression equation for median a_{field} (from 1st to 5th year): $\ln(Y) = -0,005328953868 * X + 2,823637363$
2. Regresná rovnica trendovej čiary pre medián a_{lab} (1. až 5. rok): $\ln(Y) = -0,003187459575 * X + 2,809329626$
Regression equation for median a_{lab} (from 1st to 5th year): $\ln(Y) = -0,003187459575 * X + 2,809329626$

zistených numerickým modelovaním s in situ nameranými hodnotami sme zistili isté odchýlky. Je to pravdepodobne preto, že matematický model založený na rovnici vedenia tepla platí pre homogénny polpriestor.

Priebeh intervalu (spodné polia; Obr. 9) analyticky vypočítaných hodnôt denných teplotných amplitúd vykazuje rozšírenie v jeho centrálnej časti. Táto časť, ohraničená hĺbkou 0,3 až 0,6 m, predstavuje oblasť širšieho diapazónu vypočítaných teplotných zmien. V týchto hĺbkových úrovniach skalného masívu bolo zistené, podľa in situ nameraných teplôt, zvýšené rozpätie teplotných amplitúd. Môže to byť spôsobené vplyvom vnútornej štruktúry travertínového masívu napr. pórovitosťou, ktorá sa u travertínov, ako sedimentárnej horniny výrazne priestorovo mení.

Väčšiu pozornosť si vyžaduje výsledok analytických výpočtov dosahu prieniku denných teplotných zmien do hĺbky horninového masívu, ktoré boli vypočítané podľa laboratórne stanoveného koeficienta teplotnej vodivosti (a_{lab}). Prejav teplotných zmien vyznel v hĺbke 0,9 m (vrchná prerušovaná čiara v obr. 9). V porovnaní s hĺbkou 1,5 m, vypočítanou podľa koeficienta teplotnej vodivosti stanoveného z in situ meraní teplôt (a_{field}), je to výrazné zníženie hĺbky prieniku denných teplotných zmien. Taktiež rozsah, resp. interval vypočítaných teplotných amplitúd (vrchné pole) je oveľa užší a dosahuje omnoho nižších hodnôt v porovnaní s už explikovaným intervalom (spodné pole). Dôležité je poznamenať, že žiadna z referenčných hodnôt denných teplotných amplitúd nameraných in situ, z ktorejkoľvek pozorovanej hĺbkovej úrovne, ne-

prislúcha vypočítaným rozsahom, resp. intervalom teplotných amplitúd stanovených na základe a_{lab} . Výnimkou sú amplitúdy a to vždy z prvej (od povrchu skalného masívu) in situ pozorovanej hĺbkovej úrovne, pretože tieto boli použité ako vstupný parameter v analytických výpočtoch. Hlavná príčina tohto nesúladu spočíva v nízkych hodnotách koeficienta teplotnej vodivosti stanoveného v laboratórnych podmienkach na vysušenej vzorke veľkosti 5 x 5 x 2,5 cm, čím spôsobila redukciu reálnych podmienok horninového prostredia, od ktorých závisí priestorové rozloženie teploty v masíve. Vzorka takejto veľkosti nereprezentuje celú škálu vlastností a nehomogenity prírodného horninového masívu. Treba však poznamenať, že laboratórne stanovenie bolo vykonané v zmysle štandardov pre pórovitú materiál bežne používaných vo výskumných laboratóriách SAV (napr. Fyzikálneho ústavu SAV). Je viac ako pravdepodobné, že vypočítané priebehy teplotných zmien na základe a_{lab} (vrchná prerušovaná čiara na obr. 9) a a_{field} (spodná prerušovaná čiara na obr. 10) sa odlišujú z vyššie uvedených dôvodov. Minimalizovať zistené rozdiely môže napr. iný spôsob určenia denných, a najmä ročných, amplitúd teplotných zmien, príp. zmena výpočtových postupov. Nemožno však vylúčiť aj isté „šumy“, ktoré môžu byť súčasťou našich meraní, resp. monitorovania, ktoré v tejto etape výskumu nevieme identifikovať.

Jednou zo závažných otázok, ktorú sme počas výskumu riešili, a na ktorú nie je doposiaľ daná spoľahlivá odpoveď sa týka vplyvu vlhkosti, v interakcii s teplotou a ostatnými prírodnými činiteľmi, na degradáciu fyzického stavu skalného horninového

Tab. 10. Porovnanie útlmu a oneskorenia mediánu ročnej teplotnej amplitúdy. Poznámka: 1. a) in situ nameraná teplotná amplitúda; 2. *) teplotná amplitúda A vypočítaná pre danú hĺbku podľa regresnej rovnice $\ln(Y) = -0,005533033061 * X + 2,801585549$; 3. b) analyticky vypočítaný atribút (teplotná amplitúda, oneskorenie, útlm) na základe parametra a_{field} ; 4. c) analyticky vypočítaný atribút (teplotná amplitúda, oneskorenie, útlm) na základe parametra a_{lab} .

Tab. 10. Comparison of the attenuation and time lag of the median annual temperature amplitude. Note: 1. a) amplitude of temperature measured in situ; 2. *) amplitude of temperature calculated for that one depth by the regression equation $\ln(Y) = -0,005533033061 * X + 2,801585549$; 3. b) analytically calculated attribute (amplitude of temperature, time lag, attenuation) by the parameters a_{field} ; 4. c) analytically calculated attribute (amplitude of temperature, time lag, attenuation) by the parameters a_{lab} .

Hĺbka (cm) Depth (cm)	Amplitúda (°C) Amplitude (°C)			Oneskorenie Time lag						Útlm (%) Attenuation (%)		
				(deň) (day)		(hod) (hr)		(min) (min)				
	a	b	c	b	c	b	c	b	c	a	b	c
6,5	16,30	16,30	16,30	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00
25	14,16	14,70	15,34	5	3	17	10	26	11	13,13	9,83	5,89
38	12,98	13,72	14,67	9	5	18	19	1	56	20,36	15,82	10,01
80	10,74	10,92	12,89	22	13	18	14	2	32	34,10	32,98	20,91
150	* 7,18	7,59	10,30	44	26	10	13	5	32	55,94	53,46	36,84
300	* 3,13	3,41	6,36	90	54	20	7	27	58	77,88	79,07	61,00
500	* 1,04	1,18	3,38	152	91	18	8	17	32	93,65	92,79	79,25
700	* 0,34	0,40	1,78	214	128	16	9	8	6	97,90	97,52	89,10

Tab. 11. Rozdiely denných teplotných zmien. Pozn.: 1. a) analyticky vypočítaná teplotná amplitúda v období s úhrnom zrážok 0 mm; 2. b) analyticky vypočítaná teplotná amplitúda v období s úhrnom zrážok $\leq 1,5$ mm; 3. c) analyticky vypočítaná teplotná amplitúda v období s úhrnom zrážok $> 1,5$ mm.

Tab. 11. Differences for the diurnal temperature changes. Note: 1. a) analytically calculated amplitude of temperature during period without precipitation; 2. b) analytically calculated amplitude of temperature during precipitation ≤ 1.5 mm; 3. c) analytically calculated amplitude of temperature during precipitation > 1.5 mm.

Hĺbka (cm) Depth (cm)	Amplitúda (°C) Amplitude (°C)			Útlm (%) Attenuation (%)		
	a	b	c	a	b	c
10	2,85	2,61	1,79	0,00	0,00	0,00
40	0,59	0,63	0,64	79,41	75,72	64,43
80	0,07	0,11	0,19	97,47	95,97	89,47
150	0,00	0,01	0,03	99,93	99,79	98,19

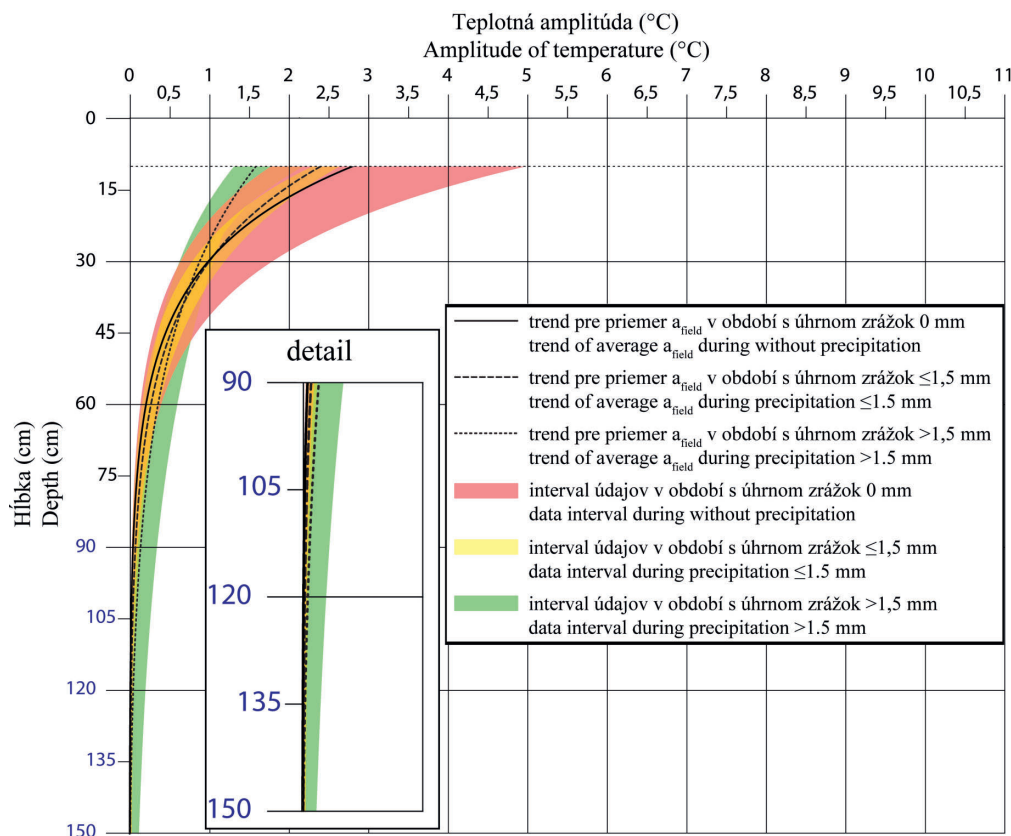
masívu. Ústredná hypotéza sa zakladá na existujúcej závislosti medzi vlhkosťou, resp. nasýtením skalného masívu vodou a prienikom teploty do hĺbky horninového masívu. Výsledky analýz in situ nameraných údajov o teplotách z monitorovaných hĺbkových úrovní a zrážkovej činnosti z lokality Perúnovej skaly Spišského hradu (kap. 4.4) tento predpoklad potvrdzujú. V čase od 25.5. do 5.6. 2009 vypočítaný dosah denných teplotných zmien v dňoch so zrážkovou činnosťou $> 1,5 \text{ mm.deň}^{-1}$ prenikol o 0,17 m hlbšie, oproti vypočítanému dosahu teplotných zmien v dňoch s úhrnom zrážok $\leq 1,5 \text{ mm.deň}^{-1}$ (Obr. 11). Je dôležité poznamenať, že hĺbka prieniku v daždivých dňoch (úhrn zrážok $> 1,5 \text{ mm.deň}^{-1}$) v porovnaní s dňami bez zrážok bola o 0,3 m väčšia aj napriek tomu, že amplitúda zmien teploty bola v daždivých dňoch oveľa menšia.

6. ZÁVER

V predkladanom príspevku je prezentovaný pomerne bohatý súbor informácií o teplotnom režime jednej časti travertínového telesa Spišského hradu, tzv. Perúnovej skaly. Týka sa

predovšetkým analýzy in situ zistených teplôt a numerického modelovania, ich hĺbkového dosahu, ako aj fázového posunu, resp. časového oneskorenia teplotných zmien v horninovom masíve.

Našu pozornosť sme zamerali hlavne na získanie predstavy o teplotnom režime, o špecifikácii koeficienta teplotnej vodivosti ($a_{\text{field}}, a_{\text{lab}}, \text{m}^2\text{s}^{-1}$), ako aj o osciláciách teplotných zmien, či už krátkodobých (denných) alebo dlhodobých (ročných), v horninovom masíve ($A, ^\circ\text{C}$). Stanovenie týchto atribútov bolo nevyhnutnou podmienkou pre modelové riešenia založené na rovnici vedenia tepla. Tie, ktoré boli stanovené z in situ nameraných teplôt, viedli k získaniu pomerne presnej predstavy o priebehu a hĺbkovom dosahu teplotnej vlny v horninovom masíve. Výskumom bolo zistené, že vplyv denných teplotných zmien sa prejavuje do hĺbky 1,5 m, dosah ročných teplotných zmien sa prejavuje do hĺbky 10,5 m. Treba zdôrazniť, že nameraný a vypočítaný priebeh teplotných zmien podľa a_{field} v pozorovaných hĺbkových úrovniach nadobúda primeranú zhodu. Naopak, značne veľké rozdiely dosahuje priebeh teplotných zmien počítaný s parametrom teplotnej vodivosti a_{lab} , stanovenej štandardne v laboratóriu (kap. 3).



Poznámka/Note:

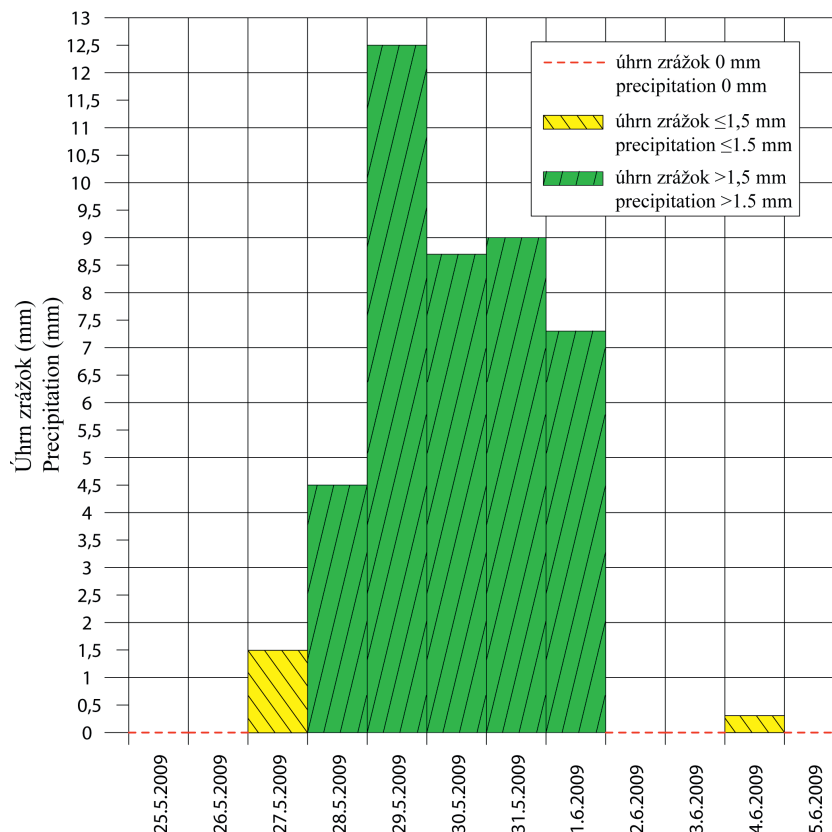
1. Regresná rovnica trendovej čiary pre priemer a_{field} v období s úhrnom zrážok 0 mm: $\ln(Y) = -0,05213000626 * X + 1,54550483$
Regression equation for median a_{field} during without precipitation: $\ln(Y) = -0.05213000626 * X + 1.54550483$
2. Regresná rovnica trendovej čiary pre priemer a_{field} v období s úhrnom zrážok $\leq 1,5 \text{ mm}$: $\ln(Y) = -0,0439249009 * X + 1,315524849$
Regression equation for median a_{field} during precipitation $\leq 1.5 \text{ mm}$: $\ln(Y) = -0.0439249009 * X + 1.315524849$
3. Regresná rovnica trendovej čiary pre priemer a_{field} v období s úhrnom zrážok $> 1,5 \text{ mm}$: $\ln(Y) = -0,028930104 * X + 0,7685933527$
Regression equation for median a_{field} during precipitation $> 1.5 \text{ mm}$: $\ln(Y) = -0.028930104 * X + 0.7685933527$

Obr. 11. Priebeh a dosah denných teplotných zmien od 25.5. do 5.6.2009.

Fig. 11. Daily temperature curve and penetration depth in the period from May 25th to June 6th, 2009.

Obr. 12. Denné úhrny zrážok z meteorologickej stanice Spišské Vlachy od 25.5. do 5.6.2009.

Fig. 12. Daily precipitation at Spišské Vlachy in the period from May 25th to June 6th, 2009.



V práci sú integrované aj výsledky analýz z in situ nameraných údajov o teplotách monitorovaných hĺbkových úrovni a zrážkovej činnosti (kap. 4.4). Tieto potvrdili závislosť medzi vlhkosťou, resp. nasýtením skalného masívu vodou a prienikom teplotných zmien do hĺbky horninového masívu.

Autori príspevku sú si vedomí, že v budúcnosti je potrebné vykonať i ďalšie štúdie pre čo najpodrobnejšie vysvetlenie problematiky vplyvu teplotných zmien na zhoršenie vlastností skalných horninových masívov. V tomto ohľade bude potrebné ozrejmiť teplotný režim vzhľadom na orientáciu skalného telesa voči insolácii, a to najmä pri dlhodobých (viacročných) cykloch, keď je možné predpokladať aj teplotnú interferenciu (vplyv obojstranného osvetlenia). Ďalej bude potrebné objasniť závislosť teplotnej rozťažnosti skúmanej horniny na teplotno-vlhkostnom režime, ako aj výskumnú činnosť zamerať na ozrejmienie existencie trvalej teplotnej deformácie, ako dôsledku teplotne indukovaných napätí vzniknutých v dôsledku teplotných zmien. Táto oblasť výskumu vo významnej miere závisí od použitej prístrojovej techniky, frekvencie zberu dát a pod. Avšak oveľa dôležitejšie je dokonalé poznanie prírodného horninového masívu, najmä jeho látkovej podstaty, ďalej mikrotexturných a mikroštruktúrnych parametrov, vplyvu vlhkosti a pod. Spomínané aspekty, spolu s tými uvedenými vyššie, sú námetom pre ďalšiu orientáciu výskumu pri skúmaní teplotného režimu horninového masívu.

Získané poznatky budú v konečnom dôsledku viesť k podrobnému inžinierskogeologickému posúdeniu stability geologického telesa Perúnovej skaly, a najmä k prognóze ďalšieho vývoja celej blokovej rozpadliny Spišského hradu.

Podakovanie: Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0641-10 a čiastočne projektom Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaŠ, grant VEGA 1/0331/09.

Literatúra

- Brček M. Vařilová Z. Greif V. & Vlčko J., 2010: Stanovenie teplotného poľa pieskovcového masívu Pravčickej brány (ČR) na základe zhodnotenia denných a ročných teplotných cyklov. *Mineralia Slovaca*, 42, 2, 205-216.
- Carslaw H.S. & Jaeger J.C., 1959: Conduction of heat in solids. Second edition. Oxford University Press, Oxford, 517 p.
- Faško P. & Štátný P., 2002: Priemerné ročné úhrny zrážok, 1:2 000 000. In: Zaňko M. (Ed.): Atlas krajiny Slovenskej republiky, 2002: 1. vyd. Bratislava: Ministerstvo Životného prostredia SR, Banská Bystrica: Slovenska agentúra životného prostredia, 344 p.
- Goudie A.S., 1989: Weathering Processes. In: Thomas D.S.G. (Ed.): Arid Zone Geomorphology. Process, Form and Change in Drylands. London, Belhaven Press, 11-24.
- Gross P., Buček S., Ďurkovič T., Filo I., Maglay J., Halouzka R., Karoli S., Nagy A., Spišák Z., Žec B., Vozár J., Borza V., Lukáčik E., Janočko J., Jetel J., Kubeš P., Kováčik M., Žáková E., Mello J., Polák M., Siráňová Z., Samuel O., Snopková P., Raková J., Zlinská A., Vozárová A. & Žecová K. 1999: Vysvetlivky ku geologickej mape Popradskej kotliny, Hornádskej kotliny, Levočských vrchov, Spišsko-šarišského medzihorie, Bachurne a Šarišskej vrchoviny (M 1:50 000). Ministerstvo životného prostredia, Geologická služba Slovenskej republiky, Bratislava, 239 p.
- Hall K. & André M.-F., 2001: New insights into rock weathering from high-frequency rock temperature data: an Antarctic study of weathering by thermal stress. *Geomorphology*, 41, 1, 23-35.

- Hall K. & Hall A., 1991: Thermal gradients and rock weathering at low temperatures: Some simulation data. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2, 2, 103-112.
- Ingersoll R.L., 2007: Heat conduction – with engineering and geological applications. The Maple Press, York, PA, 292 p.
- Jenkins K.A. & Smith B.J., 1990: Daytime rock surface temperature variability and its implications for mechanical rock weathering: Tenerife, Canary Islands. *Catena*, 17, 4-5, 449-459.
- Jezný M., Vlčko J. & Hvoždara M., 2007: Teplota ako faktor štruktúrneho oslabenia horninových masívov. *Geotechnika*, 10, 3, 8-15.
- Kubičár L., Vretenár V., Štofanič V. & Bágeľ L., 2006: Thermophysical sensors: Theory and application of the hot ball. In: Kleja, P. (Ed.): Proceedings of the seminar Thermophysics 2006. Meeting of the Thermophysical Society Working Group of the Slovak Physical Society, Kočovce, 28-35, Vydavateľstvo STU, Bratislava, 28-35.
- Lapin M., Faško P., Melo M., Šťastný P. & Tomlain J., 2002: Klimatické oblasti, 1:1 000 000. In: Zaňko M. (Ed.): Atlas krajiny Slovenskej republiky, 2002: 1. vyd. Bratislava: Ministerstvo Životného prostredia SR; Banská Bystrica: Slovenska agentúra životného prostredia, 344 p.
- Mazúr E. & Lukniš M., 1986: Geomorfologické členenie SSR a ČSSR. In: Zaňko M. (Ed.): Atlas krajiny Slovenskej republiky, 2002: 1. vyd. Bratislava: Ministerstvo Životného prostredia SR; Banská Bystrica: Slovenska agentúra životného prostredia, 344 p.
- McGreevy J.P., 1985: Thermal rock properties as controls on rock surface temperature maxima, and possible implications for rock weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10, 2, 125-136
- McGreevy J.P. & Smith B.J., 1982: Salt weathering in hot deserts: observations on the design of simulation experiments. *Geografiska Annaler, Series A*, 64, 3-4, 161-170.
- McKay C.P. & Friedmann E.I., 1985: The cryptoendolithic microbial environment in the Antarctic cold desert: Temperature variation in nature. *Polar Biology*, 4, 1, 19-25.
- Nemček A. & Svatoš A., 1974: Gravitačný rozpad Dreveníka. *Geografický časopis*, 26, 3, 253-266.
- Smith B.J., 1977: Rock temperature measurements from the northwest Sahara and their implications for rock weathering. *Catena*, 4, 1-2, 41-63.
- STN EN 1926: 2007: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie jednoosej pevnosti v tlaku.
- STN EN 1936: 2007: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie mernej hmotnosti, objemovej hmotnosti a celkovej a otvorenej pórovitosti.
- STN EN 13755: 2008: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie nasiakavosti pri atmosférickom tlaku.
- STN EN 14580: 2005: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie statického modulu pružnosti.
- Šťastný P., Nieplová E. & Melo M., 2002: Priemerná ročná teplota vzduchu (1:2 000 000). In: Zaňko M. (Ed.): Atlas krajiny Slovenskej republiky, 1. vyd. Bratislava: Ministerstvo Životného prostredia SR; Banská Bystrica: Slovenska agentúra životného prostredia, 344 p.
- Vlčko J., 2002: Monitoring – an effective tool in safeguarding the historic structure. In: International Symposium: Landslide Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage, Kyoto University, Kyoto, Japan, 267-278.
- Vlčko J., Petro L. & Košťák B., 1998: Monitorovanie skalných blokov na Spišskom hrade. In: Wagner P. & Durmeková T. (Eds.): Geológia a životné prostredie, ŠGÚDŠ, Bratislava, 102-104.
- Vlčko J., Greif V., Grof V., Jezný M., Petro L. & Brček M., 2009^a: Rock displacement and thermal expansion study at historic heritage sites in Slovakia. *Environmental Geology*, 58, 8, 1727-1740.
- Vlčko J., Brček M., Vařilová Z. & Zvelebil J., 2009^b: Deformation monitoring at cultural and natural heritage sites. In: World Danxia, 2nd Collection, First International Symposium on Danxia Landform, 26 – 28 May, Danxiashan, Guangdong China, 317-324.
- Winkler E.M., 1977: Insolation warmed over: comment and reply: COMMENT: Insolation of rock and stone, a hot item. *Geology*, 5, 3, 188-189.

Summary: The northern part of Podhradská kotlina Basin is characteristic with presence of relative huge (15 to 55 m in thickness) travertine mounds, upon on one of them stands the ruin of Spiš Castle. The climate is mild warm and mild humid with a cold winter (Lapin et al., 2002). Annual temperature average is 6,8 °C and annual average precipitation rate is 600–700 mm (Faško & Šťastný, 2002). Geological bedrock is composed by Mesozoic and Palaeogene rocks, while superficial parts consist of Quaternary and Neogene deposits forming the elevations, including travertine mounds. A travertine mound forming the subgrade of Spiš Castle and Dreveník Hill are well documented in literature as lateral spreads (Nemček & Svatoš, 1974). Travertines are grey-white to white in colour, fine-grained with characteristic porosity which ranges from micropores to cavities frequently filled with calcite or aragonite (Vlčko et al., 1998; Vlčko, 2002).

A continual monitoring of creep deformation of selected travertine blocks of Spiš Castle started in 1980. Additional measurements, at different locations were executed using portable crack-gauges in irregular intervals (Vlčko et al., 2009^a). In the southern part of Spiš Castle (Perun's rock), five temperature probes were added in 2003 (Fig. 1) for measurement of temperature gradient inside the rock mass. The main goal was to clarify the effect of temperature on kinematics and rate of movement of this rock block. Four temperature sensors were placed at different depths of travertine mass while the fifth one records the temperature of the rock surface.

Two methods of heat transfer determination in a rock mass were adopted: (i) direct in-situ measurements and (ii) analytical computation. Temperature data were collected at 1 hour intervals. In this manner, the daily maximum and minimum values were recorded, in order to estimate a temperature range (amplitudes) in different time periods (days, year). The recordings allowed the determination of the spatial and temporal variations in heat transfer.

From these data sets, the mean diurnal and annual amplitudes (Tab. 3, chapter 4.2) and thermal conductivity (Tab. 4, chapter 4.2) were calculated. The manifestation of temperature changes (difference between maximum and minimum diurnal temperatures) in rock mass are at its maximum during the summer and winter seasons and at minimum during spring and fall. The diurnal temperatures control the changes, particularly near the rock face parts of the rock mass. The inner, deeper parts are influenced mainly by the temperature changes with longer periods (e.g., annual cycles). The amplitude of temperature decreases with the depth.

The results of the analytical calculation based on the thermal conduction formula (1) in which the parameters A , °C; a_{field} ($m^2 \cdot s^{-1}$) determined from in-situ measurements show, that the diurnal temperature changes estimated in rock mass are acting approximately up to the depth of 1.50 m (chapter 4.3), the annual temperature changes up to the depth of 10.5 m.

The parameter of thermal diffusivity (a_{labr} $m^2 \cdot s^{-1}$) determined in the laboratory conditions was used in both calculations. The penetration depth of diurnal temperature changes calculated from laboratory meas-

urements in rock mass under study were 0.90 m beneath the surface. In contrary, annual temperature penetration depths were estimated much deeper, approximately up to 15 meters.

Measured and calculated diurnal (Tab. 7) and annual (Tab. 9) temperature changes according to a_{field} in observed and monitored depth levels show appropriate agreement. The difference in the travertine rock mass is in the depth of 0.80 m, where an increased temperature contrast was observed (Tab. 7). Significant differences were observed in the temperature changes calculated using the parameter a_{lab} . The thermal attenuation together with the temperature changes time lag is related to the aforementioned observation (Tabs. 8, 10). The time lag is more than two times larger, in case, where the parameter a_{lab} was taken into account in the formula (5).

The authors also dealt with the influence of the precipitation rate on temperature changes at monitored depths within the travertine rock mass. The results confirmed the relation between moisture or rock saturation and penetration depths of temperature changes.

The penetration depth for days with precipitation rate $\geq 1.5 \text{ mm.day}^{-1}$ was about 0.17 m larger comparing to calculated depth in days with precipitation rate $\leq 1.5 \text{ mm.day}^{-1}$ (Fig. 11). Furthermore, note the deeper penetration of the temperature changes for "rainy days" (precipitation rate $> 1.5 \text{ mm.day}^{-1}$) compared to "the period without precipitation" of about 0.30 m, even though the amplitude of the temperature changes is much lower for the "rainy days".

The knowledge of temperature penetration depth is important information for better understanding thermal behaviour of rocks as initial factor for rock deterioration processes. In this respect more attention should be devoted to orientation of the rock body, especially in long-term observations of temperature changes (taking into account thermal interference), further clarify permanent thermal dilation as a consequence of thermally induced strain in relation to thermal regime of the rock mass.