

Stanovenie teplotného poľa pieskovcového masívu Pravčickej brány (ČR) na základe zhodnotenia denných a ročných teplotných cyklov

MARTIN BRČEK^{1,2}, ZUZANA VAŘILOVÁ³, VLADIMÍR GREIF¹ a JÁN VLČKO¹

¹Katedra inžinierskej geológie, Prírodovedecká fakulta UK v Bratislave, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava

²Štátny geologický ústav D. Štúra, Mlynská dolina 1, 817 04 Bratislava

³Správa NPČS České Švýcarsko, Pražská 52, 407 46 Krásná Lípa

Temperature field determination at the Pravčická brána sandstone rock arch (Czech Republic) from the diurnal and annual temperature waves

Surficial parts of rock masses undergo daily and annual changes of temperature which are of quasi-periodic character. Such periodic heat flow is transmitted into a rock mass according to the Fourier's conduction law. Here-in, our attention is focused on the study of surface temperature variations and the distribution of the heat flow in the interior of the rock mass at the Pravčická brána rock arch in Czech Republic. Results from this study confirmed that the diurnal thermal cycles are transmitted up to the depth of 150 cm while annual thermal cycles thermally influence the rock up to the depth of 950 cm.

Key words: Pravčická brána rock arch, heat flow, diurnal and annual thermal cycles, penetration depth, rock mass

Úvod

Degradáciu horninového materiálu, resp. horninového masívu, spôsobujú geologické procesy, ktoré môžu mať okamžitý deštruktívny efekt alebo pomalý – dlhodobý priebeh s často kumulatívnym účinkom nadobúdajúcim až ničivý charakter. Všeobecne platí, že zvetrávanie, resp. horniny, ktoré vznikli hypergénnymi procesmi, predstavujú produkty fyzickej i chemickej degradácie a svojou povahou sa stávajú iniciálnym štádiom ďalších geologických procesov. Mnohé aspekty procesu zvetrávania sú známe. Všeobecne sú späté s vnútornými podmienkami hornín, najmä s ich litologickou a štruktúrnou povahou, ako aj s vonkajšími podmienkami prostredia, ku ktorým zaraďujeme predovšetkým pôsobenie podzemnej vody, deštruktívne účinky rôznych solí, klimatické, biologické, geomorfologické činitele a ďalšie. Vplyv teploty, resp. teplotou generovaných procesov, patrí k javom, ktoré okrem pôsobenia mrazu nebývajú často súčasťou štúdií o zvetrávaní. Poznanie tohto javu môže otvoriť cestu k pochopeniu procesov sukcesie v podobe vzniku mikrotrhlín, fragmentácie, separácie a pohybu horninových blokov.

Predložený príspevok uvádza čiastkové výsledky monitoringu teplotného poľa pieskovcového masívu Pravčickej brány (ČR). Týka sa predovšetkým analýzy *in situ* zistenej teploty a numerického modelovania jej hĺbkového dosahu i fázového posunu, resp. časového oneskorenia teplotných vln v horninovom masíve.

Teplota – faktor štruktúrneho oslabenia horninových masívov

Horniny na zemskom povrchu sú vystavené teplotným zmenám, ktoré prispievajú k ich mechanickému rozpadu. Využitie energie priameho slnečného žiarenia je závislé nielen od intenzity slnečného žiarenia dopadajúceho na zemský povrch, ale i od celkovej dĺžky slnečného osvetlenia. Keďže horniny nie sú dobrými vodičmi tepla, povrchové časti sa otepľujú podstatne viac, než časti hlbšie pod povrchom. Tým vzniká v horninách napätie, ktoré postačuje na to, aby sa v nich vytvorila sústava puklín.

Názory, že povrchové teplotné zmeny v skalnom masíve (spôsobené zmenami teploty vzduchu atď.) môžu viesť k jeho deštrukcii, sa čoraz častejšie stávajú predmetom výskumu geológov, a to i napriek tomu, že účinky termo-mechanických procesov sú zväčša makroskopicky nepostrehnuteľné. Skutočnosť, že zamrzanie a topenie vody, ktorá vyplňa póry a diskontinuity horninového masívu, môže vyvolať porušenie, je známy fakt (Torraca a Weber, 1986; Winkler, 1994; Scheffler a Normandin, 2004; Ruedrich a Siegesmund, 2007). V priebehu rokov štúdiom týchto procesov (*frost shattering, cryogenic weathering*) odštartovalo publikovanie prác prezentujúcich meranie teploty v skalných stenách, a to hlavne v horských regiónoch (Matsuoka, 1994; Matsuoka et al., 1997, 1998; Hall, 1999; Hall a André, 2001; Stewart a Moore, 2002; Watson et al., 2004; Vlčko et al., 2005; Gunzburger et al., 2004, 2005; Meiklejohn et al., 2009).

Vargas et al. (2004) uvažovali, že cyklické zmeny teploty by mohli byť príčinou tzv. teplotnej únavy hornín. Táto skutočnosť už bola pozorovaná ako prejav povrchového mikroskopického teplotno-mechanického zvetrávania obkladových kameňov (poruchy z únavy sú v podstate spôsobené rozdielnou teplotnou expanziou minerálov) pri deštrukcii historických stavieb (Kirschner et al., 2003). Gunzburger et al. (2004, 2005) skúmali, či prírodné teplotné zmeny môžu zohrávať nejakú úlohu pri vzniku skalného rútenia. Svoj výskum zamerali na región južných francúzskych Álp, presnejšie oblasť Rochers de Valabres. Svoju ideu podporili numerickým modelom, ktorým potvrdili danú hypotézu a vyslovili názor, že tepelne vzniknuté deformácie môžu byť dostatočnou príčinou zmeny krípkového pohybu na translačný a z hľadiska kinematiky na rúťový. Kvôli dôkladnejšiemu preskúmaniu tejto myšlienky postihnutú časť svahu snímali nainštalované vysoko citlivé geodetické monitorovacie systémy (totálna stanica), pomocou ktorých namerané hodnoty svahových pohybov porovnávali s výsledkami z numerického modelovania. Závbery ich dlhotrvajúceho štúdia naznačujú, že povrchové teplotné zmeny zohrávajú dôležitú úlohu v dlhodobom procese prípravy skalného zrútenia. Podobné úvahy vo svojom príspevku vyslovili aj Vlčko et al. (2009).

Z vyššie uvedeného textu je badateľné, že teplotno-mechanické procesy v horninových masívoch vedú k ich oslabeniu, resp. až deštrukcii. V menšom rozsahu (Carslaw a Jaeger, 1959; Ingersoll, 2007; Jezný et al., 2007) sa v odbornej literatúre podrobnejšie hovorí o trvalej teplotnej deformácii a o priebehu teplotného poľa v horninovom masíve, na základe ktorých sa dá stanoviť hĺbkový dosah denného a sezónneho kolísania teplôt na zmenu vnútorných napätostných pomerov, ďalej na dezintegráciu horninového materiálu, ako i na zmenu štruktúrnych parametrov horniny.

Študovaná lokalita – Pravčická brána v NP České Švýcarsko

Pravčická brána (obr. 1) je budovaná vrchnokriedovými pieskovecami s kvádrovitou odlučnosťou a predstavuje najväčší pieskovcový oblúk v Európe. Samotné skalné teleso s bránou sa nachádza v nadmorskej výške 447 m n. m. Ide o výrazne obojstranne exponovaný (v smere SSV až JJZ pretiahnutý) skalný chrbát. Rozpätie brány je 26,5 m a výška 16 m. Relatívne subtilný horninový strop je široký 7,5 m, pričom najmenšia hrúbka klenby má len 2,5 m. Teleso Pravčickej brány je tvorené prevažne kremennými pieskovecami vyšších častí jizerského súvrstvia (vek str. až vrch. turon – Valečka, 1979, 1989). Zmeny v litologickej stavbe telesa umožňujú vyčleniť základné fyzikálno-mechanické kvázi homogénne celky masívu Pravčickej brány. Päť masívu v úrovni základne skalného oblúka tvoria jemnozrnné až strednozrnné pieskovce s ostro nasadajúcimi zlepenčovými polohami. Smerom nahor sa počet spomínaných polôh znižuje. Väčšia časť skalného oblúka sa tak vytvorila v stredne až hrubozrnných pieskovecoch. Vrchol hrubnutej sekvencie leží v tesnom podloží klenby. Samotnú klenbu a masív v jej výškovej úrovni tvoria strednozrnné pieskovce s ostro nasadajúcimi zlepenčovými polohami. Hlavná pozornosť bola venovaná práve najvyššej úrovni telesa zodpovedajúcej mocnosti klenby skalnej brány. Vzhľadom na svoju geometriu a expozíciu je Pravčická brána ohrozovaná nielen namáhaním vlastnou ťažkou, ale aj teplotnými a klimatickými činiteľmi.

Pre Národný park České Švýcarsko (NPČŠ; obr. 2) je typický relatívne oceánický charakter klímy, daný najmä vyrovnaným ročným priebehom zrážok (Glöckner, 1995). O zrážkových pomeroch existuje pomerne detailná predstava, pretože na území sa nachádza či v minulosti sa nachádzala hustá sieť zrážkomerných staníc (Härtel



Obr. 1. Pravčická brána, pohľad zo západu.

Fig. 1. Pravčická brána arch, western view.

Tab. 1

Maximálne a minimálne výkyvy vonkajšej teploty evidované v rokoch 2007 – 2009 v troch meteorologických staniciach situovaných najbližšie k Pravčickej bráne (zdroj: databáza Českého hydrometeorologického ústavu a Správy Národního Parku České Švýcarsko)
 Maximal and minimal outside temperature variation recorded within the period 2007 – 2009 at three weather stations closest to the Pravčická brána rock arch (Source: Czech Meteorological Institute and Administration of NP Czech Switzerland)

Mesiac	Rok 2007				Rok 2008				Rok 2009			
	Stanica Děčín		Stanica Varnsdorf		Stanica Děčín		Stanica Varnsdorf		Stanica Tokáň		Stanica Tokáň	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.
I.	-10,60	14,30	-13,10	13,20	-7,00	13,60	-5,60	10,70	-	-	-20,20	2,90
II.	-1,60	11,60	-3,10	10,00	-9,60	19,20	-9,60	15,90	-	-	-12,00	7,00
III.	-1,80	19,60	-1,90	18,20	-5,80	19,40	-5,30	18,20	-	-	-8,00	12,20
IV.	-2,40	28,00	-3,20	24,90	0,40	22,80	-1,70	20,80	-	-	-2,70	21,40
V.	-0,40	31,00	-1,20	28,90	3,00	31,20	1,10	28,90	-	-	-1,30	26,90
VI.	8,00	32,80	6,10	29,60	5,80	31,60	5,30	29,40	-	-	-	-
VII.	9,20	38,00	8,00	34,40	10,00	33,40	7,10	30,90	5,50	31,30	-	-
VIII.	5,40	32,00	3,30	30,00	7,60	33,00	6,70	30,60	4,80	29,30	-	-
IX.	3,00	25,40	2,00	23,00	2,20	28,60	0,90	27,00	0,30	26,50	-	-
X.	-0,40	22,00	-2,90	20,10	-0,20	20,00	-1,40	17,60	-1,10	17,10	-	-
XI.	-5,80	15,00	-6,00	12,20	-4,80	19,20	-6,00	16,30	-5,30	16,10	-	-
XII.	-5,80	13,20	-9,30	10,50	-9,00	10,40	-8,00	10,00	-10,20	9,10	-	-

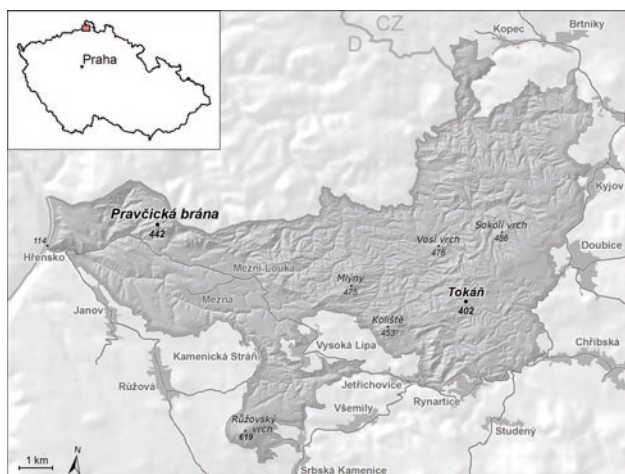
et al., 2008). Na druhej strane presnejší opis teplotných pomerov je do značnej miery sťažený skutočnosťou, že na území NPČŠ nebola v minulosti žiadna klimatická stanica s dlhodobým pozorovacím záznamom. Najbližšie sa vyskytujú v Děčíne (Březiny – Libverda) v nadmorskej výške 157 m n. m. a na východe je stanica Varnsdorf (nadmorská výška 365 m n. m.). Obidve však predstavujú do istej miery extrémne klimatické pomery v okrese Děčín (Glöckner, 1995). Od polovice roku 2008 je v prevádzke stanica Tokáň (402 m n. m., nezalesnená, celodenne oslnená lokalita), ktorá sa nachádza v strednej časti NPČŠ (Hostýnek, 2009), necelých 10 km vzdušnou čiarou od Pravčickej brány.

Vonkajšia teplota v skúmanom regióne v zimnom období klesala od začiatku roku 2007 do polovice roku 2009 až na $-20,20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a letné maximá dosahovali $+34,40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Celkový prehľad maximálnych a minimálnych teplotných výkyvov za pozorované obdobie je v tab. 1. Je nutné zdôrazniť, že s ohľadom na výškovo členitý reliéf sú pre konkrétne lokality pieskovcovej oblasti (teda aj teleso Pravčickej brány) určujúce pomery mikro- až mezoklimatické, ktoré sa zvlášť v podobných polohách môžu zásadnejšie líšiť od regionálnych klimatických charakteristík.

Klimatické pôsobenie na pieskovcové horniny je buď priame, vo forme dynamických objemových zmien materiálu, alebo tiež nepriame ako hnacia sila fyzikálneho i chemického zvetrávania. Vzhľadom na tieto okolnosti existujú obavy o stabilitu telesa Pravčickej brány a strach z jej poškodenia (Košťák et al., 1993; Vařilová et al., 2005; Čílek et al., 2006; Härtel et al., 2008). Informácie o súčasnej aktivite a kinematike deformačného správania sa telesa brány sú od roku 1993 získavané z dilatometrických meraní pohybov na vybraných diskontinuitách masívu. Navyiac boli priamo na telese brány opísané prejavy súčasného intenzívneho chemického zvetrávania (Vařilová et al., 2005; Zvelebil et al., 2002; Vařilová, 2002).

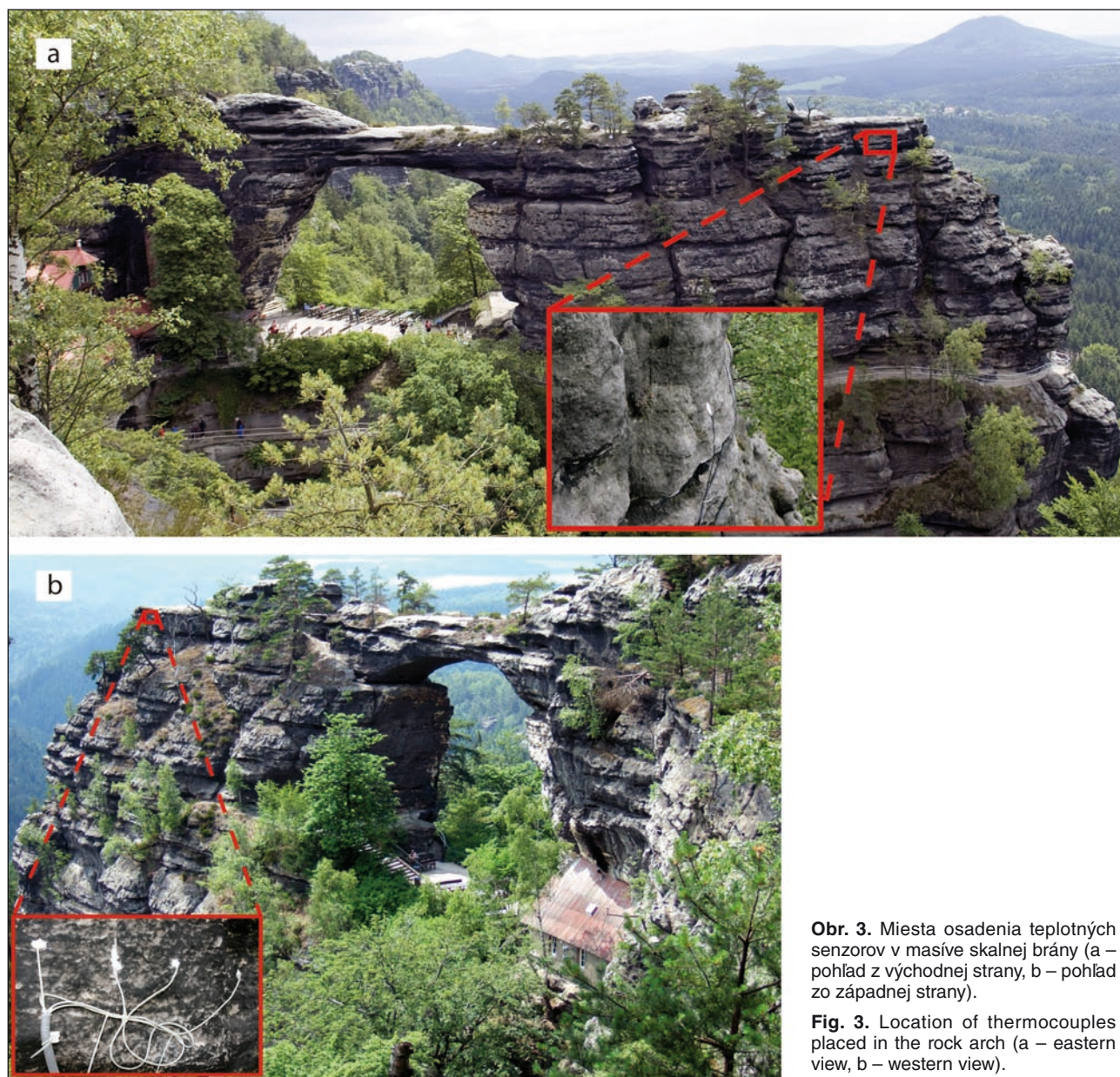
Priebeh teplotného poľa v skalnom masíve Pravčickej brány

Priebeh teplotného poľa v skalnom masíve je možné stanoviť dvoma spôsobmi: priamymi meraniami *in situ* a analytickým výpočtom. Oba spôsoby sa vyznačujú kauzalitou a je potrebné ich vykonávať najmä preto, že výsledky *in situ* meraní sčasti poskytujú vstupné údaje pre analytický výpočet, na strane druhej výpočet platí pre ideálne teleso a takto získané informácie poskytujú akýsi etalón priebehu teplotného poľa. Vzájomným porovnaním môžeme zistiť, či teplotné pole v horninovom masíve zostavené na základe výpočtov má reálny priebeh alebo je



Obr. 2. Národní park České Švýcarsko s lokalizáciou Pravčickej brány a meteostanice Tokáň (Mapový podklad: © Technická univerzita Drážďany; © NASA (SRTM); © Správa NP České Švýcarsko).

Fig. 2. National Park Czech Switzerland with the weather station located at Tokáň hill (Map © Technical University Dresden; © NASA (SRTM); © NP Czech Switzerland Administration).



Obr. 3. Miesta osadenia teplotných senzorov v masíve skalnej brány (a – pohľad z východnej strany, b – pohľad zo západnej strany).

Fig. 3. Location of thermocouples placed in the rock arch (a – eastern view, b – western view).

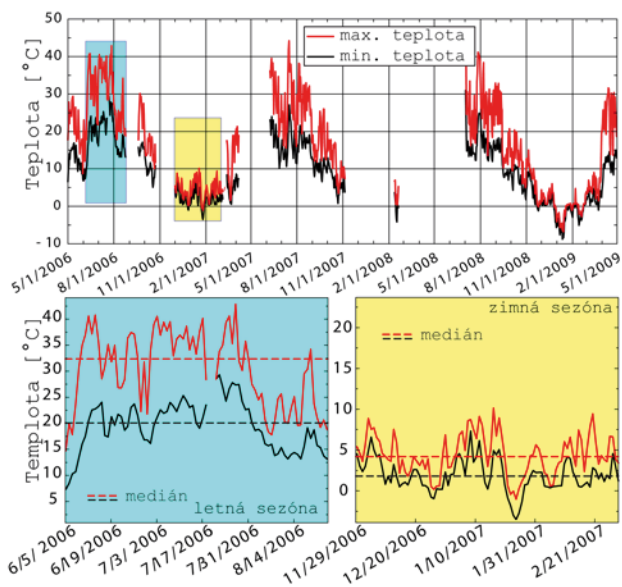
zaťažené chybami (v meraniach, v neznalosti štruktúrno-textúrnych parametrov, vlhkosti i ďalších aspektov týkajúcich sa horninového materiálu i masívu).

Stanovenie teplotného poľa *in situ*

Merania teplotného poľa *in situ* sme začali realizovať v polovici roku 2006, keď na východnej stene, v priestore najvyššej partie južného piliera Pravčickej brány, boli v polohe stredne zrnitých pieskovcov inštalované tri teplotné snímače v hĺbkach 10, 40 a 90 cm, na západnej stene dva teplotné snímače v hĺbkach 40 a 90 cm (obr. 3). Teploty sa v pravidelných časových sekvenciách (každú hodinu) zaznamenávajú a dáta sa ukladajú na pamäťové médium. Hodinový interval snímania teploty bol navrhnutý

preto, aby sa zachytili teplotné maximá a minimá, ktoré sú dôležité pre určenie teplotných amplitúd v pozorovaných hĺbkových úrovniach skalného masívu. Na ich základe je možné určiť priebeh teplotného poľa v čase a v priestore, ako aj stanoviť fázový posun periodických zmien teploty.

Medzi základné parametre, ktoré sa pri analýze denných a ročných teplôt využívajú, patria maximálne a minimálne teploty. Rozloženie teploty v telese Pravčickej brány vhodne vystihuje graf priebehu teplôt na obr. 4. Vyplýva z neho, že prejavy teplotných zmien, resp. rozpätia medzi maximálnymi a minimálnymi dennými teplotami, sú najväčšie v letných mesiacoch, v zime zas najmenšie. S narastajúcou hĺbkou však v istom bode dochádza ku konvergencii medzi dennými teplotnými maximami a minimami (obr. 5). To signalizuje, že pre povrch horninového telesa,



Obr. 4. Graf priebehu teplôt v hĺbke 10 cm.

Fig. 4. Temperature diagram at the depth of 10 cm.

ako i hĺbky plytko pod jeho povrchom majú veľký význam denné zmeny teploty, pričom pre hlbšie úrovne sú dôležité teplotné zmeny za dlhšie časové obdobie, napr. jedného roka.

Stanovenie teplotného poľa výpočtom na základe rovnice vedenia tepla

Pre objektívne zistenie priebehu teplotného poľa v pri-povrchových zónach horninového masívu je nevyhnutné modelovať priebeh teplotných zmien v rozdielnych časových periódach; tu sa využila denná a ročná časová perióda. Ak sú teplotné zmeny periodické, resp. kvázi periodické, potom stanovenie teploty v čase t a hĺbke z definované rovnicou vedenia tepla umožní presne vypočítať priebeh teplotnej vlny v čase a priestore (uvažujeme s homogénnym polpriestorom), ako aj zistiť fázové posuny periodických zmien teploty.

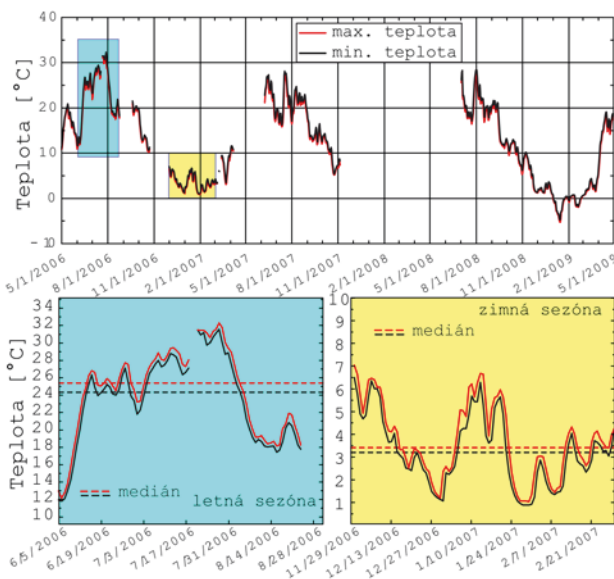
Pri modelovaní priebehu teplotného poľa v horninovom masíve analytickým výpočtom je potrebné poznať vstupné parametre – teplotnú amplitúdu A ($^{\circ}\text{C}$) a koeficient teplotnej vodivosti (teplotná vodivosť) a ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$).

Analytické riešenie rovnice vedenia tepla

Matematická formulácia parciálnej diferenciálnej rovnice neustáleného vedenia tepla, ktorá má tvar

$$c \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + q \cdot \rho \quad (1),$$

kde ρ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) je hustota, c ($\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je merná tepelná kapacita, T ($^{\circ}\text{C}$) je teplota, t (s) je čas, λ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) je tepelná vodivosť (koeficient tepelnej vodivosti), ∇ je operátor divergencie a gradientu a q (J) je objemový zdroj tepla, napomáha k získaniu predstavy o rozložení teploty



Obr. 5. Graf priebehu teplôt v hĺbke 90 cm.

Fig. 5. Temperature diagram at the depth of 90 cm.

vo vnútri horninového masívu (všeobecne Zeme). Táto rovnica určuje časové a priestorové zmeny teploty $T(x, y, z, t)$ v prostredí s materiálovými konštantami ρ , c , λ pri rozložení zdroja tepla q . Pre homogénne teleso je tepelná vodivosť nezávislá od súradníc, preto rovnicu (1) možno vyjadriť v tvare

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T + \frac{q}{c} \quad (2),$$

kde $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$

je tzv. teplotná vodivosť (charakterizujúca rýchlosť, ktorou sa šíri teplotná zmena) a

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

je tzv. Laplaceov operátor pre trojrozmerný priestor.

Pri pozorovaní teplotných zmien v povrchových častiach Zeme sa skúma zohrievanie povrchu slnečným žiarením. Zemeguľa v zjednodušenej forme predstavuje ideálne teleso (homogénny polpriestor s teplotnou vodivosťou a), ktorého povrch je vystavený vonkajším teplotným zmenám, a v ktorom nie sú iné zdroje tepla, pričom rozloženie teploty závisí iba od vertikálnej súradnice z a času t . Zistenia meteorológov ukazujú, že teplota pri zemskom povrchu sa rovná súčtu 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 teplotu pri povrchu $z = 0$ platí okrajová podmienka

$$T|_{z=0} = A \cos \omega t \quad (3),$$

kde ω je kruhová frekvencia časových zmien, $\omega = 2\pi/\tau$; τ je perióda. Rovnicu vedenia tepla (2) pre nami zvolené ideálne teleso možno upraviť na jednoduchší tvar:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}; T = T(z, t) \quad (4).$$

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

$$\lim_{z \rightarrow \infty} T(z, t) = 0 \quad (5).$$

Derivovaním rovnice (4) podľa t a z pri dodržaní spomenutých okrajových podmienok dostaneme funkciu

$$T(z, t) = A e^{-z/\delta} \cos(\omega t - z/\delta) \quad (6),$$

kde

$$\delta = \sqrt{2a/\omega} = \sqrt{\tau a/\pi}$$

je tzv. *prieniková hĺbka* teploty do uvažovaného telesa polpriestoru, v našom prípade do horninového masívu. Toto riešenie súčasne ukazuje, že amplitúda teplotných zmien je exponenciálne tlmená s rastúcou hĺbkou. V hĺbke $z = \delta$ je amplitúda teplotných zmien $A e^{-1}$, t. j. približne 1/3 z amplitúdy teploty na povrchu. Dochádza aj k fázovému oneskorenému teplotných vln s hĺbkou. Zatiaľ čo na povrchu $z = 0$ je maximum teploty v čase $t = 0$, v hĺbke z ($z > 0$) je maximálna teplota až v čase

$$t_z = z/(\omega\delta) = z/\sqrt{2a\omega} = \sqrt{\tau/4\pi a} \quad (7).$$

Teplotná amplitúda a teplotný rozsah

Informáciu o teplotnej amplitúde A ($^{\circ}\text{C}$) vymedzuje teplotný rozsah, ktorý sa určuje na základe priamych meraní *in situ*. Základ správneho stanovenia spočíva v optimálnom intervale zaznamenávania teploty, ďalej vo vhodne zvolenom metodickom postupe štatistického spracovania dát. Čím vyššia je frekvencia meraní, tým skôr možno v prírodných zónach skalných masívov, obzvlášť v zimných mesiacoch, keď i krátkodobý slnečný osvit môže spôsobiť náhly nárast teploty, postrehnúť nepatrné extrémny vo výkyve teploty (Hall a André, 2001; Mc Kay a Friedmann, 1999). Vzhľadom na dostupné technické vybavenie a potreby nášho výskumu možno považovať za postačujúcu časovú frekvenciu zberu dát v hodinových intervaloch. Sčasti to vyplýva aj z toho, že záujmové územie sa nachádza v miernom klimatickom pásme, kde sa nepredpokladajú extrémne výkyvy. Veľkú dôležitosť je potrebné venovať i vhodnému štatistickému postupu na určenie hodnôt teplotných amplitúd. 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, napr. ak sa meranie

uskutočňuje každú hodinu, potom najkratší pravidelne sa opakujúci časový úsek, z ktorého je možné stanoviť teplotnú amplitúdu, je deň (24 hod.). Rozdiel medzi max. a min. hodnotou vyjadruje rozsah teploty, t. j. $R = T_{\max} - T_{\min}$ pre jeden konkrétny časový úsek; polovica z vypočítaného rozsahu definuje amplitúdu. Referenčnú, resp. priemernú hodnotu z celého súboru vypočítaných amplitúd získame aritmetickým priemerom

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i \quad (8),$$

kde A_i sú teplotné amplitúdy ($^{\circ}\text{C}$) a n je ich celkový počet. V tabuľke 2 sú uvedené priemerné denné i ročné teplotné amplitúdy zistené na základe trojročných meraní pre všetky monitorované hĺbkové úrovne telesa Pravčickej brány.

Teplotná vodivosť

Na zistenie teplotnej vodivosti a ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) sa použil výpočet z *in situ* nameraných teplotných amplitúd, ktorý je založený na poznatku, že smerom do hĺbky horninového masívu sa teplotné amplitúdy znižujú. Na základe uvedeného potom platí nasledovný vzťah:

$$\delta = (Z_j - Z_i) / \ln(A_j / A_i) \quad (9),$$

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

Pre výpočet teplotnej vodivosti a ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) bol využitý vzorec

$$a = (\delta^2 \pi) / \tau \quad (10),$$

kde τ je perióda (s).

Z niekoľkoročných meraní teplotných amplitúd (1. rok: máj 2006 – apríl 2007, 2. rok: máj 2007 – apríl 2008 a 3. rok: máj 2008 – apríl 2009), ktoré boli vykonávané v rôznych hĺbkových úrovniach pieskovcového masívu Pravčickej brány, sa podľa vyššie spomenutého postupu stanovili hodnoty teplotnej vodivosti pre dennú a ročnú periódu (tab. 3). Najprv je potrebné pre každý deň v roku vymedziť teplotnú vodivosť podľa vzťahu (10), t. j. 365 dní, nezávisle od počiatku merania, resp. kalendárneho roku. Dátový súbor sa ďalej rozdelí do tried početností. Vykonanie váženého priemeru zohľadní dôležitosť, resp. váhu tried početnosti, ale len pri tých, ktorých kumulatívne zastúpenie predstavuje 75 % všetkých hodnôt:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_i x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (11),$$

kde w predstavuje početnosť a x priemernú hodnotu teplotnej vodivosti danej triedy a \bar{x} je výsledná priemerná teplotná vodivosť zvoleného časového úseku (denná, resp. ročná perióda).

Tab. 2

Hodnoty priemerných teplotných amplitúd stanovené z trojročného monitorovacieho obdobia pre dennú a ročnú periódu
Mean values of diurnal and annual temperature amplitudes estimated from three years monitoring period

		Priemerná teplotná amplitúda (°C)					
		1. rok merania (máj 2006 – apríl 2007)		2. rok merania (máj 2007 – apríl 2008)		3. rok merania (máj 2008 – apríl 2009)	
	Hĺbka (cm)	Denná	Ročná	Denná	Ročná	Denná	Ročná
Východná strana	10 cm	3,49	23,19	4,27	24,18	2,90	25,40
	40 cm	1,21	17,70	1,38	16,02	1,22	19,26
	90 cm	0,35	15,71	0,46	11,48	0,32	16,89
Západná strana	40 cm	1,12	16,95	0,97	17,77	1,04	18,55
	90 cm	0,38	16,21	0,38	15,84	0,34	15,69

Tab. 3

Priemerná teplotná vodivosť za jednotlivé roky i za celé obdobie monitorovania vypočítaná z *in situ* nameraných teplôt
Mean thermal diffusivity (conductivity) for individual years and for the whole monitoring period

Periódka	Teplotná vodivosť a ($m^2 \cdot s^{-1}$)			
	1. rok merania (máj 2006 – apríl 2007)	2. rok merania (máj 2007 – apríl 2008)	3. rok merania (máj 2008 – apríl 2009)	Priemer
Denná	$3,67066 \cdot 10^{-6}$	$4,55210 \cdot 10^{-6}$	$3,84838 \cdot 10^{-6}$	$4,02372 \cdot 10^{-6}$
Ročná	$4,20344 \cdot 10^{-7}$	$1,14871 \cdot 10^{-7}$	$3,82665 \cdot 10^{-7}$	$3,05960 \cdot 10^{-7}$

Tab. 4

Priemerné denné a ročné povrchové teplotné amplitúdy pre jednotlivé roky stanovené z trojročného monitoringu
Mean diurnal and annual surface temperature amplitudes for individual years estimated from three years monitoring period

Amplitúda povrchovej teploty A (°C)				
	1. rok merania (máj 2006 – apríl 2007)	2. rok merania (máj 2007 – apríl 2008)	3. rok merania (máj 2008 – apríl 2009)	Priemer
Priemerná denná teplotná amplitúda	4,77	5,67	3,95	4,79
Priemerná ročná teplotná amplitúda	24,32	26,42	26,69	25,81

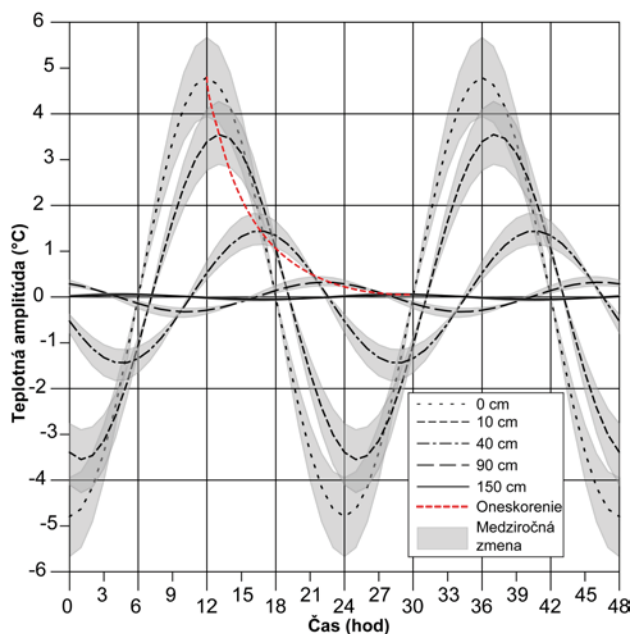
Denná a ročná teplotná vlna

V nadväznosti k vyššie uvedenému riešeniu bol pokus prostredníctvom numerického modelovania stanoviť rozsah, resp. variáciu teploty pre dennú i ročnú periódu v rôznych hĺbkach. Nevyhnutným vstupným parametrom tohto javu je amplitúda povrchovej teploty (tab. 4) a teplotná vodivosť (tab. 3).

Jednotlivé amplitúdy priemernej dennej a ročnej povrchovej teploty boli stanovené nepriamo, tzn. boli dopočítané na základe analytického riešenia pomocou rovníc vedenia tepla a výpočtu hĺbky prieniku teplotných zmien. Ak priemerná denná teplotná amplitúda dosiahne na povrchu hodnotu $A = 4,79$ °C, potom, opierajúc sa o výpočty, sa v hĺbke 10 cm teplotná amplitúda rovná 3,55 °C, v 40 cm je rovná hodnote 1,43 °C, v 90 cm nadobúda hodnotu 0,32 °C a v hĺbke 150 cm sú teplotné zmeny minimálne, rovnajúce sa hodnote 0,05 °C.

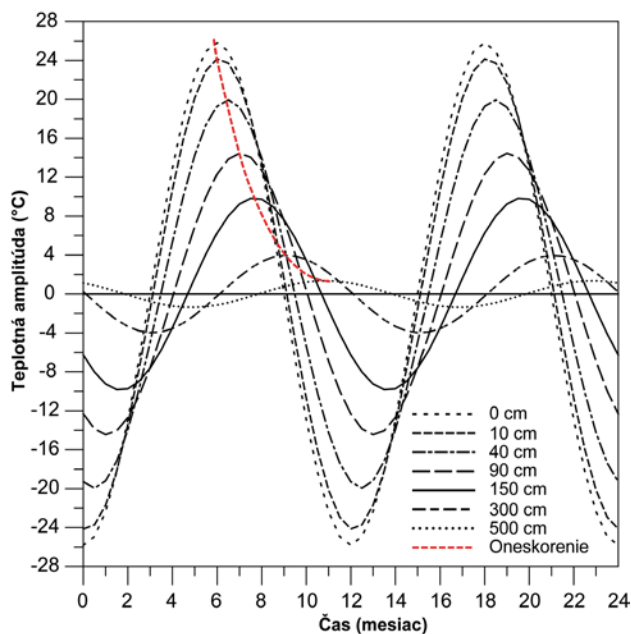
Pri zameraní pozornosti na maximálnu hodnotu teplotnej amplitúdy zistenej na povrchu a jej porovnaní s maximom teplotných vln v rozličných hĺbkach sa zistilo, že sú navzájom od seba fázovo posunuté, tzn. došlo k časovej retardácii, ktorej veľkosť i útlm prehľadne vystihuje obr. 6 i tab. 5. Sivé polia (interval) v obrázku zahŕňajú teplotné vlny analyticky vypočítané pre dennú periódu za celé obdobie monitoringu (1.–3. rok merania); prerušovaná čiara vo vnútri polí zobrazuje ich priemer; časové oneskorenie priebehu teplotnej vlny je znázornené červenou prerušovanou čiarou.

Z vykonaných trojročných výskumov vyplýva, že priemerná ročná teplotná amplitúda povrchu horninového masívu je rovná hodnote $A = 25,81$ °C. Aplikáciou rovnakého postupu ako pri stanovení dennej teplotnej vlny, s výnimkou použitia periódy jedného roka a teplotnej vodivosti pre ročnú periódu $a = 3,05960 \cdot 10^{-7} m^2 s^{-1}$, sa dospelo k zisteniu, že v hĺbke 0,9 m pod povrchom



Obr. 6. Graf priebehu priemerných denných teplotných zmien v rôznych hĺbkach pieskovcového telesa Pravčickej brány.

Fig. 6. Diagram of the mean diurnal temperature at different depths of sandstone body at Pravčická brána arch.



Obr. 7. Graf priebehu priemerných ročných teplotných zmien v rôznych hĺbkach pieskovcového telesa Pravčickej brány.

Fig. 7. Diagram of the mean annual temperature at different depths of the sandstone body of Pravčická brána arch.

Tab. 5

Útlm a fázový posun dennej teplotnej amplitúdy pre vybrané hĺbky pieskovcového telesa Pravčickej brány
Temperature attenuation and time lag of diurnal temperature amplitude for chosen depths of the sandstone body of Pravčická brána arch

Hĺbka (cm)	Oneskorenie (hod.)	Oneskorenie (min.)	Útlm (%)
0	0	0	0,00
10	1	8	25,98
40	4	35	70,08
90	10	20	93,30
150	17	13	98,89

dôjde k redukcii teplotnej amplitúdy na 14,44 °C a v hĺbke 5 m dokonca až na 1,35 °C (obr. 7). Podľa rovnice (7) dosiahne maximum alebo minimum teplotnej amplitúdy v hĺbke 0,9 m časovú retardáciu oproti povrchu 29 dní 19 hodín a 59 minút (tab. 6).

Porovnanie výsledkov numerického modelovania s laboratórnymi a *in situ* meraniami

Zobrazenie priestorového rozloženia teplotných amplitúd (nameraných i vypočítaných) v plošnom grafe (obr. 8) sa javí ako dostatočný spôsob vyjadrenia prieniku teplotných zmien. Ak graf zobrazuje nielen teplotné amplitúdy získané z *in situ* meraní, ale taktiež hodnoty analyticky vypočítané, potom sa ponúka

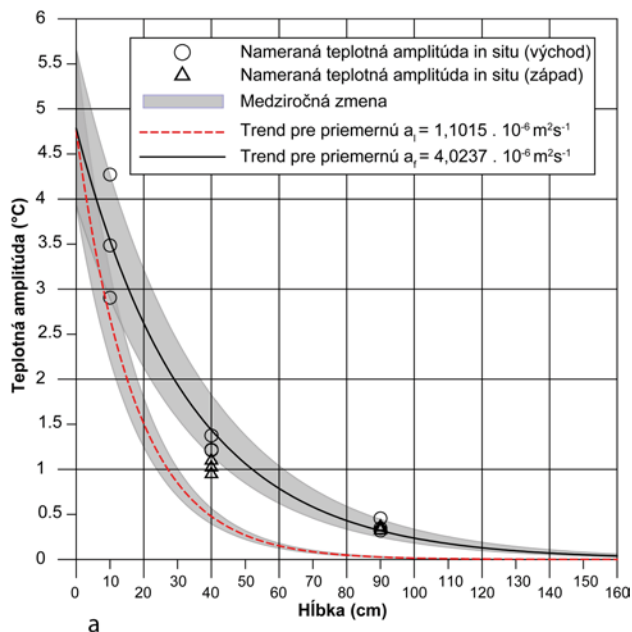
Tab. 6

Útlm a fázový posun ročnej teplotnej amplitúdy pre jednotlivé hĺbky pieskovcového telesa Pravčickej brány
Temperature attenuation and time lag of annual temperature amplitude for different depths of the sandstone body of Pravčická brána arch

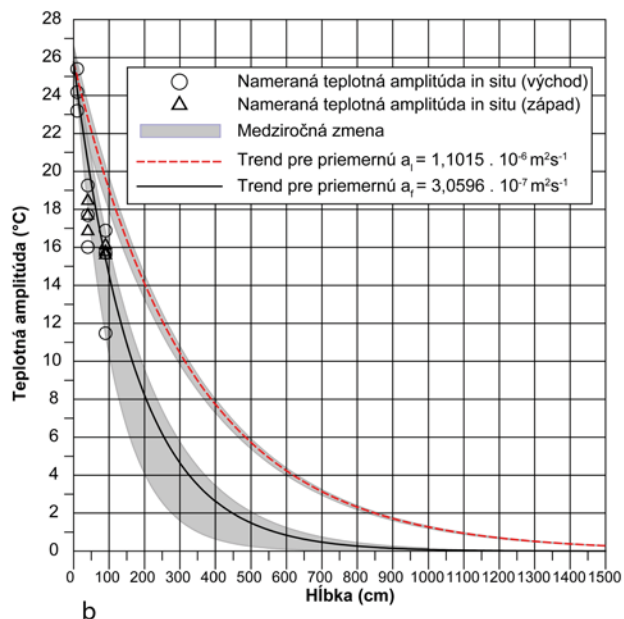
Hĺbka (cm)	Oneskorenie (deň)	Oneskorenie (hod.)	Oneskorenie (min.)	Útlm (%)
0	0	0	0	0,00
10	3	7	33	6,45
40	13	6	13	22,78
90	29	19	59	44,04
150	49	17	18	61,95
300	99	10	37	84,59
500	165	17	42	94,76

možnosť vzájomného porovnávania a určenia ich zhody, resp. odchýlky. Polia s odtieňom sivej farby znázorňujú interval analyticky vypočítaných kriviek (hodnôt) priebehu teplotných zmien za monitorované obdobie troch rokov. Krivka nachádzajúca sa vo vnútri sivého poľa znázorňuje ich priemer (priemerné hodnoty). V prípade čiernej krivky sa ako dôležitý vstupný parameter pre výpočet priebehu teplotných zmien použil koeficient teplotnej vodivosti stanovený z *in situ* nameraných teplotných amplitúd (kap. 4.2.3). Okrem toho v grafe (obr. 8) je dôležitá doplňujúca informácia, ktorú reprezentuje krivka prieniku teplotných amplitúd vypočítaná na základe *laboratórne* stanovenej teplotnej vodivosti (červená prerušovaná krivka). Podobne ako krivka v predchádzajúcom prípade vyjadruje priemer za monitorované obdobie troch rokov. Z takto zobrazených

výsledkov vyplýva, že dosah **denných** teplotných zmien sa prejavuje približne do hĺbky **150 cm** pieskovcového masívu Pravčickej brány (čierna plná čiara). Taktiež treba zdôrazniť, že namerané a vypočítané teplotné zmeny v pozorovaných hĺbkových úrovniach sú v plnej zhode, iba v hĺbke 40 cm je menší teplotný rozdiel. Pri porovnaní oboch znázornených kriviek je zreteľný rozdiel v dosahu prieniku



a



b

Obr. 8. Priebeh a dosah teplotných zmien v pieskovcovom telese Pravčickej brány. a – deň (24 hod.), b – ročný (365 dní).

Fig. 8. Temperature curve and penetration depth in sandstone body of Pravčická brána arch. a – diurnal (24 hr.), b – annual (365 days).

teplotných zmien, ktorý má pôvod v teplotnej vodivosti. Ak použijeme pre modelovanie priebehu teplotných zmien teplotnú vodivosť určenú v laboratóriu, musíme zohľadniť to, že bola stanovená pri teplote 25 °C, a čo je ešte dôležitejšie, že bola stanovená na vysušenej vzorke malých rozmerov. Je teda pochopiteľné, že i dosah teplotných zmien bude menší v porovnaní s dosahom krivky počítanej na základe dát meraných priamo v telese Pravčickej brány pri prirodzenej vlhkosti skalného masívu. Zaujímavosťou zostáva, že opačný trend nastal pri modelovaní prieniku ročných teplotných zmien. Z hľadiska ročnej periódy je numericky vypočítaná teplotná vodivosť menšia ako laboratórne stanovená. Môže to vyplývať z toho, že v zimnom období klesá teplota a zároveň i vlhkosť. Taktiež sa zníži schopnosť prirodzenej infiltrácie atmosférických zrážok a pôdnej vlhkosti v dôsledku zmeny ich kvapalného skupenstva na tuhý stav. Teplotná vodivosť bude preto v zimnom období nižšia, čo sa prejaví i vo výpočte teplotnej vodivosti pre ročnú periódu.

Interpretácia výsledkov

Pre skúmanie teplotných zmien v zónach blízko povrchu geologických telies je potrebné modelovať prienik teploty v rôznych časových periódách (denná, ročná). Ak sa predpokladá, že teplotné zmeny sú kvázi periodické, potom je možné prostredníctvom rovnice vedenia tepla zistiť priebeh tepelnej vlny v priestore, v našom prípade v horninovom masíve. Z takto získaných hodnôt je možné v čase a priestore určiť presne a stanoviť tiež fázové posuny (priestorovú retardáciu teploty) v periodických zmenách teploty. Treba si však uvedomiť, že vytvorený matematický model pre zistenie časového a priestorového priebehu teplotného poľa, v ktorom sa aplikoval analytický výpočet, platí pre homogénny polpriestor. Keďže horninové prostredie je nehomogénne, je pochopiteľné, že pri porovnávaní výsledkov zistených numerickým modelovaním a z *in situ* nameraných hodnôt sa zistili isté odchýlky. Na nepresnosti výsledkov sa môže podieľať i vplyv zemského tepla, tzv. geotermického gradientu. Treba zvážiť i fakt, že *in situ* merania (a súvisiace výpočty) boli realizované v horninách, ktoré sú situované v najvyššej polohe skalného masívu (vertikálne zodpovedajúce spodnej polovici klenby skalného telesa), teda len v jednom kvázi homogénnom celku v rámci Pravčickej brány. Vzhľadom na litologickú heterogenitu skalného masívu je možné predpokladať rozdiely v teplotnej vodivosti ďalších, v skalnom telese zastúpených litologických celkov (v závislosti na zmene zrnitosti či charaktere a množstve tmelu a pod.). Z tohto dôvodu nie je možné zistené fakty teoreticky aplikovať na celé teleso skalného útvaru. Z praktického hľadiska (poznajúc termofyzikálne parametre rozdielnych typov pieskovcov) však rozdiely v teplotnom režime v rozsahu celého skalného telesa budú len minimálne už aj preto, že podstatnejšiu úlohu zohrávajú štruktúrno-textúrne prvky ako mineralogicko-petrografická povaha pieskovcov. V tomto smere by bolo účelné detailizovať realizované práce a inštalovať ďalšie monitorovacie stanoviská. Žiaľ, tu dochádza k obmedzeniu prísnu ochranou skalného objektu

(vyplývajúcou z platných zákonov a bližších ochranných podmienok v ČR), a to nielen v smere inštalácie viacerých snímačov, ale i v smere odberu reprezentatívnych vzoriek zo všetkých výškových úrovní skalného masívu.

Záver

Pre lepšie pochopenie termo-mechanických procesov vedúcich k deštrukcii telesa Pravčickej brány bol preskúvaný doposiaľ trochu opomínaný teplotný režim skalnej brány spôsobený klimatickými činiteľmi vyvolávajúcimi objemové zmeny v denných a ročných cykloch. Na štúdium priebehu teplotného poľa v horninovom masíve sa použili záznamy teplôt zachytené teplotnými snímačmi osadenými v rôznych hĺbkach pieskovcového masívu (10, 40 a 90 cm), a to v dvoch expozíciách (V, resp. Z). Monitoringom teplotných zmien v horninovom masíve v období od mája 2006 až do apríla 2009 sa získal rad dát objasňujúcich časový a hĺbkový priebeh teplôt v telese brány.

Prejavy teplotných zmien (rozdiely medzi max. a min. dennými teplotami) sú najväčšie v letnom období, zatiaľ čo v zime sú minimálne. Denné teplotné zmeny ovplyvňujú najmä časť horninového masívu v blízkosti jeho povrchu, pre hlbšie časti majú naopak význam hlavne zmeny s dlhšou periódou (napr. ročnou). Amplitúda teplotných zmien je tlmená rastúcou hĺbkou. Na základe získaných dát sa stanovilo časové oneskorenie zohľadňujúce postupný prenik teploty smerom do hĺbky pieskovcového telesa skalnej brány. Fázový posun (oneskorenie) denných teplotných amplitúd v porovnaní s povrchom horninového masívu (0 cm) predstavuje v hĺbke 10 cm časový posun 1 hod. a 8 min. a v hĺbke 90 cm až 10 hod. a 20 min. Pre ročnú amplitúdu je veľký rozdiel v hĺbke 10 cm, oneskorenie 3 dni, 7 hod. a 33 min. a v hĺbke 90 cm oneskorenie až 29 dní, 19 hod. a 59 min.

Z analytického výpočtu vyplýva, že dosah teplotných zmien v pieskovcovom masíve telesa Pravčickej brány sa prejavuje približne do hĺbky 150 cm, pri ročných zmenách až do hĺbky 9,5 metra.

Vplyv procesov zvetrávania a degradácie Pravčickej brány bol skúmaný predovšetkým z aspektov geochemickej degradácie, menej priestoru sa doposiaľ venovalo štúdiu termo-mechanických vplyvov na potenciálne oslabenie tohto skalného útvaru. Prvým a nevyhnutným predpokladom poznania vplyvov cyklických teplotných účinkov na pieskovcový masív je zistenie teplotného režimu, ktorý vychádza z určenia (stanovenia) teplotných amplitúd, ďalej hĺbkového dosahu teploty v signifikantných časových úsekoch (deň, rok), ako i časovej retardácie a útlmu teploty v monitorovaných hĺbkových úrovniach.

V ďalšej etape výskumu je nevyhnutné zistiť teplotné pole vzhľadom na orientáciu skalného telesa, a to najmä pri dlhodobých (viacročných) cykloch, kedy je možné predpokladať aj teplotnú interferenciu (vplyv obojstranného osvetlenia), ďalej bude potrebné sústrediť sa na zistenie teplotnej rozťažnosti hornín a trvalej teplotnej deformácie ako výsledku teplotných napätí v horninovom masíve. Až po zostrojení termo-

-mechanického modelu skalného telesa a porovnaní kinematiky zistenej modelovým riešením s kinematikou dilatometrických meraní bude možné zistiť skutočný vplyv teplotných dynamických účinkov na kinematiku a tým i stabilitu tohto zaujímavého prírodného skalného útvaru.

Autori príspevku sú si vedomí, že v budúcnosti bude potrebné vykonať veľa ďalších prieskumov na komplexné vysvetlenie tejto problematiky, ktorej sa v domácej i zahraničnej vedeckej literatúre venuje pomerne málo priestoru. Vzhľadom na to sme sa už vydali istým smerom, a to popri ozrejmnení termo-mechanického správania pieskovcového útvaru. Venovať pozornosť by sme chceli teplotno-vlhkostnému režimu ako jednému z faktorov podmieňujúcich priebeh teploty v horninovom masíve, a teda ovplyvňujúcim aj termo-mechanické správanie horninových telies. Aj napriek tomu, že *in situ* monitorovanie takých parametrov – ako sú vlhkosť a teplota – je nesmierne ťažké technicky a náročné na čas, zber dát a ich spracovanie, sme presvedčení, že takýto prístup umožní detailnejšie pochopiť kinematiku správania horninových telies a vysloviť predikciu dynamiky ich ďalšieho vývoja.

Podakovanie. Príspevok bol vypracovaný čiastočne z prostriedkov Vedeckej grantovej agentúry MŠ SR (VEGA grant č. 1/0499/08, VEGA grant č. 1/0331/09) a čiastočne z grantov pre doktorandov a mladých vedeckých pracovníkov Univerzity Komenského (UK/344/2008, UK/340/2009).

Literatúra

- CARSLAW, H. S. & JAEGER, J. C., 1959: Conduction of heat in solids. Second edition. *Oxford University Press, Oxford*, 517.
- CÍLEK, V., ADAMOVIČ, J. & VAŘILOVÁ, Z., 2006: Pravčická brána a vznik pískovcových skalných bran. *Minulosti Českého Švýcarska III. Manuskript. Správa NPČŠ, Krásná Lípa*, 5 – 19.
- GLÖCKNER, P., 1995: Fyzickogeografické a geologické pomery okresu Děčín. *Vlastivěda okresu děčínského. Ser. Příroda, Děčín*, 191.
- GUNZBURGER, Y., MERRIEN-SOUKATCHOFF, V., SENFAUTE, G. & PIGUET, J. P., 2004: Field investigations, monitoring and modelling in the identification of rock fall causes. *In: Lacerda, W., Ehrlich, M., Fontoura, S. & Sayão, A. (eds.): Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides (ISL), Rio de Janeiro (Brasil), June 28 – July 2*, 557 – 556.
- GUNZBURGER, Y., MERRIEN-SOUKATCHOFF, V., SENFAUTE, G. & PIGUET, J. P., 2005: Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: Case study of the Rochers de Valabres slope (France). *Inter. Journal of Rock Mechanics and Mining Sci.*, 42, 3, 331 – 349.
- HALL, K., 1999: The role of thermal stress fatigue in the breakdown of rock in cold regions. *Geomorphology*, 31, 47 – 63.
- 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.
- HÄRTEL, H., ŠTEFLOVÁ, D. & DROZD, J. (eds), 2008: Plán péče o Národní park České Švýcarsko 2009 – 2016. *Manuskript. Správa NPČŠ, Krásná Lípa*, 217.
- HOSTÝNEK, J., 2009: Studie klimatických poměrů lokality Tokaň. *Manuskript. Správa NPČŠ, Krásná Lípa*, 89.
- INGERSOLL, R. L., 2007: Heat Conduction – With Engineering and Geological Applications. *York, PA, The Maple Press*, 292.
- JEZŇÝ, M., VLČKO, J. & HVOŽDÁRA, M., 2007: Teplota ako faktor štruktúrneho oslabenia horninových masívov. *Geotechnika (Praha)*, 10, 3, 8 – 15.

- ONDRAŠINA, J., KIRCHNER, D. & SIEGESMUND, S., 2002: Freeze-thaw cycles and their influence on marble deterioration: A long-term experiment. In: Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A. (eds.): *Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case studies*. Geol. Soc., London, Spec. Publ., 205, 9 – 18.
- KOŠŤÁK, B., ZVELEBIL J., STEMBERK, J. & NOVOTNÝ, J., 1993: Stabilita Pravčické brány. Inženýrskogeologický výzkum a kontrolní sledování. Dílčí zpráva I. etapy. *Manuskript. Ústav geotechniky AVČR, Praha, 1 – 6*.
- MATSUOKA, N., 1994: Diurnal freeze-thaw depth in rockwalls: Field measurements and theoretical considerations. *Earth surface processes and landforms*, 19, 423 – 435.
- MATSUOKA, N., HIRAKAWA, K., WATANABE, T. & MORIWAKI, K., 1997: Monitoring of periglacial slope processes in the Swiss Alps: The first two years of frost shattering, heave and creep. *Permafrost and Periglacial Processes*, 8, 155 – 177.
- MATSUOKA, N., HIRAKAWA, K., WATANABE, T., HAEBERLI, W. & KELLER, F., 1998: The role of diurnal, annual and millennial freeze-thaw cycles in controlling alpine slope instability. In: Lewkowicz, A. G. & Allard, M. (eds.): *Proceedings of 7th International Conference on Permafrost, Centre d'études nordiques, Université Laval, 711 – 718*.
- MEIKLEJOHN, K. I., HALL, K. & DAVIS, J. K., 2009: Weathering of rock art at two sites in the KwaZulu-Natal Drakensberg, southern Africa. *J. Archaeological Sci.*, 36, 4, 973 – 979.
- RUEDRICH, J. & SIEGESMUND, S., 2007: Salt and ice crystallisation in porous sandstones. *Environ. Geol.*, 52, 2, 225 – 249.
- SCHEFFLER, S. M. & NORMADIN, C. K., 2004: Dimension stone durability: Evaluation of climatic data for several European and North American cities. In: Příkryl, R. (ed.): *Dimension Stone 2004 – New Perspectives for a Traditional Building Material: Proceedings of the International Conference in Dimension Stone, 14 – 17 June, Prague, Czech Republic, 203 – 210*.
- STEWART, T.W. & MOORE, D.P., 2002: Displacement behaviour of the Checkerboard creek rock slope. In: Jordan, P. & Orban, J. (eds.): *Terrain stability and forest in the interior of British Columbia. Workshop Proceedings, May 23 – 25, B. C. Ministry of Forests, Canada, Technical Report 003, 178 – 190*.
- TORRACA, G. & WEBER, J., 1986: Poröse Baustoffe: Eine Materialkunde für die Denkmalpflege. (Reihe: Restaurierung, Konservierung, Technologie; 2). *Wien, Verlag Der Apfel, 130*.
- VALEČKA, J., 1979: Paleogeografie a litofaciální vývoj severozápadní části české křídové pánve. *Sbor. geol. Věd, Geol.*, 33, 47 – 81.
- VALEČKA, J., 1989: Sedimentology, stratigraphy and cyclicity of Jizera Formation (Middle-Upper Turonian) in the Děčín area (N Bohemia). *Věst. Ústř. Úst. geol., Praha, 64, 77 – 91*.
- VARGAS JR., E., CASTRO, J. T., AMARAL, C. & FIGUEIREDO, R. P., 2004: On mechanisms for failure of some rock slopes in Rio de Janeiro, Brasil: thermal fatigue? In: Lacerda, W. A., Ehrlich, M., Fontoura, S. A. B. & Sayão, A. S. F. (eds.): *Landslides evaluation and stabilization. Proceedings of the Ninth International Symposium on Landslides, London. Taylor and Francis Group, 1, 1 007 – 1 013*.
- VÁŘILOVÁ, Z., 2002: A Review of selected sandstone weathering forms in the Bohemian Switzerland National Park, Czech Republic. In: Příkryl, R. & Viles, H. A. (eds.): *Understanding and managing of stone decay (SWAPNET 2001)*. Karolinum Press, Praha, 233 – 242.
- VÁŘILOVÁ, Z., ŠTEFLOVÁ, D., HARTEL, H., MARKOVÁ, I., TRÝZNA, M., MAURICOVÁ, J., VOTÁPEK, A., MAREK, J. & BELISOVÁ, N., 2005: Plán péče o NPP Pravčická brána 2005 – 2014. *Manuskript. MŽP Praha, SNP ČŠ Krásná Lípa, 24*.
- VLČOK, J., JEZNY, M. & PAGÁČOVÁ, Z., 2005: Influence of Thermal Expansion on Slope Displacements. In: Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, F. & Wang, G. (eds.): *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*.
- VLČOK, J., BRČEK, M., VÁŘILOVÁ, Z. & ZVELEBIL, J., 2009: Deformation monitoring at cultural and natural heritage sites. In: *World Danxia, 2nd Collection, First International Symposium on Danxia Landform, Danxiashan, Guangdong China, 317 – 324*.
- WATSON, A. D., MOORE, D. P. & STEWART, T. W., 2004: Temperature influence on rock slope movements at Checkerboard Creek. In: Lacerda, W. A., Ehrlich, M., Fontoura, S. A. B. & Sayão, A. S. F. (eds.): *Landslides: evaluation and stabilization. Proceedings of Ninth International Symposium on Landslides London. Taylor and Francis Group, 1, 1 293 – 1 298*.
- WINKLER, E. M., 1994: Stone in architecture, properties, durability. Third, Completely Revised and Extended Edition. *Berlin, Springer Verlag, 280*.
- ZVELEBIL, J., ČÍLEK, V. & STEMBERK, J., 2002: Partial results of monitoring of stability deterioration on Pravčice Rock Arch, NW Bohemia. In: Příkryl, R. & Viles, H. A. (eds.): *Understanding and managing of stone decay (SWAPNET 2001)*. Karolinum Press, Prague, 243 – 261.

Rukopis doručený 17.12.2009

Revidovaná verzia doručená 12.2.2010

Rukopis akceptovaný red. radou 7.9.2010

Temperature field determination at the Pravčická brána sandstone rock arch (Czech Republic) from the diurnal and annual temperature waves

The Pravčická brána rock arch, the best known attraction of the Bohemian Switzerland, is located at the Czech-Germany border (415 meters above sea level) about 20 km north of the town Děčín. The Pravčická brána rock arch is formed by the Upper Cretaceous thick-bedded sandstones. It is the biggest rock arch in Europe. It spans 26.5 m and its height is 16 m. The rock ceiling is relatively subtle (its width at the narrowest point is 7.5 m and the thickness of the rock beam is 2.5 m (Fig. 1). Because of its geometry and exposition, the Pravčická brána rock arch is strained not only by the load that is due to its own weight but also by temperature variations

and other climatic factors. The climatic factors affect the arch both directly in the form of dynamic impacts, and indirectly, acting as the driving force of physical and chemical weathering. Accounting these circumstances, serious concerns arise regarding the stability of the arch body and there are the fears that it could become damaged (Čílek et al., 2006). Since the arch is declared as a National Nature Monument, its protection has become one of the main management tasks of the Bohemian Switzerland National Park Administration (Vařilová et al., 2005; Härtel et al., 2008). Information on the current activity and the kinematics of the deformation behavior of

the arch body have been collected since 1993 by means of dilatometric measurements of displacements carried out at the selected locations within the arch body.

The heat transfer is related to the kinetic energy of molecules. The greater a material's temperature, the greater thermal agitation of its constituent molecules as manifested both in linear motion and vibration modes. It is natural for regions containing greater molecular kinetic energy to pass this energy to regions with the less kinetic energy. This mechanism is expressed by the *Fourier's Law of Heat Conduction*.

Two methods to determine heat transfer in a rock mass can be used: direct *in situ* measurements and analytical computation. Both procedures although biased by the causality, are necessary, because the results gained from *in situ* measurements provide input data for analytical calculation, while computed results refer to ideal bodies and provide important standards concerning heat transfer in solid bodies. When these results are compared, it can be determined if the heat transfer in the rock mass measured *in situ* is realistic or error laden.

In 2006, altogether five thermocouples were installed in the Pravčická brána rock arch; three of these were placed at 10, 40 and 90 cm depths in the eastern section of the rock body and two other were placed in the western section at

the depths 40 and 90 cm (Fig. 3). The temperature data was collected at 1 hour intervals in a manner which acquired data record outside the daily maximum and minimum as highly important data in order to estimate temperature range (amplitudes) in the different time periods (days, year). These values allow to determine the spatial and temporal variations in the heat transfer; e.g. velocity, time lags, etc.

From the data sets we calculated mean diurnal and annual amplitudes (Tab. 2, chapt. Temperature amplitude and temperature range), thermal conductivity (Tab. 3, chapt. Thermal conductivity) as well as mean surface temperature amplitudes (Tab. 4, chapt. Daily and annual thermal wave). Mean annual amplitude of the rock surface (A) corresponds to 25.81 °C and the thermal conductivity (α) for annual period was estimated to $3.05960 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

In Fig. 8 we can distinguish the diurnal and annual penetration depth within the sandstone rock body. Diurnal thermal cycles are manifested up to a depth of 150 cm, annual thermal cycles penetrate to the depth up to 950 cm. The comparison of the two applied procedures proved that there is a relevant relationship between the calculated and the *in situ* measurements, and both essentially follow the same trend; a slight difference was found only at the 40 cm depth level which is probably due to structural heterogeneity of the sandstone rock mass.