

Monitoring obsahu vody v masíve skalných obydlí v Brhlovciach na základe merania termofyzikálnych parametrov

Lenka Kralovičová¹, Ivana Šimková¹, Ján Vlčko¹, Tatiana Durmeková¹, Martin Brček² & Vlastimil Boháč³

¹Katedra inžinierskej geológie, Prírodovedecká fakulta, Univerzita Komenského v Bratislave, Mlynská dolina G, 842 15 Bratislava; kralovicoval@fns.uniba.sk, simkova@fns.uniba.sk, vlcko@fns.uniba.sk, durmekova@fns.uniba.sk

²Katedra geotechniky, Stavebná fakulta STU v Bratislave, Radlinského 11, 813 68 Bratislava; martin.brcek@stuba.sk

³Fyzikálny ústav, Slovenská akadémia vied, Dúbravská cesta 9, 845 11 Bratislava; bohac@savba.sk

AGEOS The water content monitoring of rock mass' dwellings in Brhlovce village based on thermophysical parameters measuring

Abstract: In general, among the most significant exogenous factors causing the rock mass deterioration the temperature oscillations and water content have been considered. Monitoring and the interpretation of the water content inside the rock mass especially using non-destructive methods is relatively difficult. The aim of the paper is to evaluate the partial monitoring results of temperature and water content in the different depths of the tuff rock mass based on transient hot-ball method. In the rock mass three hot-ball sensors were inserted in different depths (10 cm, 37 cm and 53.5 cm). The hot-ball sensors were laboratory calibrated before final embedding into rock mass. The results obtained from the real in situ monitoring were compared with the laboratory obtained data and the correlation was set up. For the data presentation 8 month period of in situ monitoring was used (from April to December 2013). In the processing of real in situ data integrated precipitation data records from the weather station were implemented at the site under study. Partial results of in situ monitoring indicate the difference in water content and the temperature with the depth. The gradual decrease of water content with depth inside the rock mass has been recorded. Along with the temperature and coefficient of thermal conductivity measuring, the surface temperature and moisture at the rock face have been measured and the correlation was confirmed.

Key words: temperature and water content monitoring, hot-ball method, q/T_m parameter, tuffs, Brhlovce rock dwellings

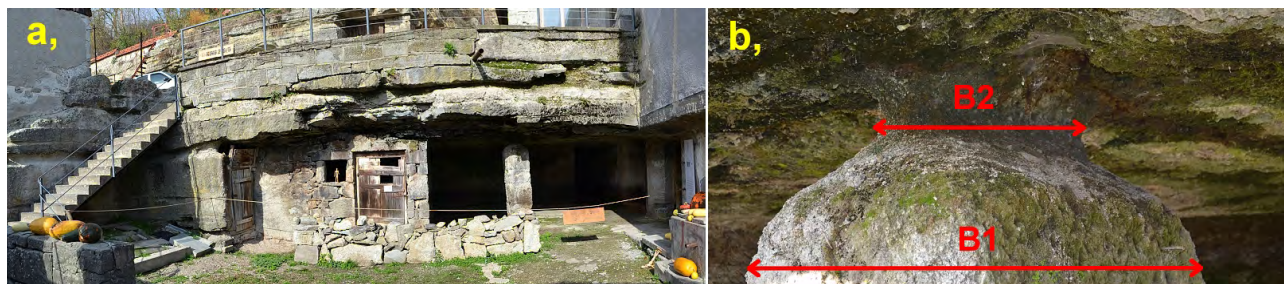
1. ÚVOD

K degradácii horninových masívov vplyvom pôsobenia jedného alebo viacerých exogénnych činiteľov dochádza v prírodných podmienkach permanentne. Intenzita a rozsah degradácie horninového masívu je podmienená predovšetkým mineralogickým zložením, štruktúrou a textúrou, stupňom zvetrania alebo alterácie, ako aj fyzikálno-mechanickými vlastnosťami horninového materiálu, z ktorého je masív tvorený. Z vonkajších faktorov výrazne vplyva na zhoršovanie stavu masívov simultánne pôsobenie klimatických činiteľov, z nich najmä cyklické striedanie teploty a zmeny obsahu vody v masíve. Obzvlášť dôležitým faktorom je prítomnosť vody v horninovom masíve nielen ako jedného z faktorov chemického zvetrávania (procesy rozpúšťania, hydratácie, hydrolyzy, oxidácie a i.), ale aj z hľadiska ovplyvnenia fyzikálnych procesov zvetrávania (tlaky pri zmene skupenstva v dôsledku zamrznania, napúšťacie tlaky pri zmene objemu minerálov, regelácia a pod.). Množstvo vody v hornine môže byť vyjadrené prostredníctvom hydrofyzikálnych atribútov akými sú napr. vlhkosť [w , %], stupeň nasýtenia [S_r , %] a hmotnostná nasiakavosť pri atmosférickom tlaku [N , %]. Kvantitatívne vyjadriť prítomnosť vody v skalnom masíve a zhodnotiť jej zmeny v hĺbke a čase je pomerne náročné. Jednou z možností je použitie metódy založenej na štúdiu termofyzikálnych vlastností

horninového materiálu (masívu). Nepriamym indikátorom zmeny obsahu vody v skúmanom materiáli je súčiniteľ tepelnej vodivosti [λ , $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].

Problemátike časovej a priestorovej distribúcie teploty a obsahu vody v horninovom masíve spojenej s potenciálnym následkom jeho degradácie sa v rámci Slovenska venovalo pomerne málo autorov – z najznámejších prác možno spomenúť napríklad štúdie Brčeka et al. (2009, 2012); Vlčka et al. (2009); Fidiríkovej et al. (2013); Kubičára et al. (2013^a, 2013^b).

Predložený príspevok nadväzuje na predchádzajúce výskumy a informuje o výsledkoch kontinuálneho merania vybraných termofyzikálnych parametrov (teploty a súčiniteľa tepelnej vodivosti) monitorovaných za účelom zistenia obsahu vody v horninovom masíve skalných obydlí v Brhlovciach. Monitoring uvedených parametrov sa realizuje pomocou metódy „hot-ball“ (Kubičár et al., 2006), v spolupráci s Fyzikálnym ústavom SAV v Bratislave. Do skalného masívu v areáli Tekovského múzea skalných obydlí v Brhlovciach boli osadené tri meracie sondy v troch rôznych hĺbkových úrovniach (v horizontálnom smere). Okrem monitorovania zmien termofyzikálnych parametrov vo vnútri horninového masívu, je súčasne na lokalite meraná aj teplota jeho povrchu a orientačná vlhkosť pripovrchovej časti masívu pomocou prístrojov Testo a Trotec. Na exaktné zistenie úhrnu zrážok bola na záujmovej lokalite zabudovaná zrážkomerná stanica.



Obr. 1. Staticky narušené skalné obydlie. a) panoramatický pohľad; b) detail narušeného piliera: B1 – pôvodná šírka, B2 – súčasná šírka skalného piliera (foto: Kralovičová, 2013).

Fig. 1. The structurally distorted rock dwelling. a) panoramic view; b) detail of distorted pillar: B1 – original width, B2 – current width of rock pillar (photo: Kralovičová, 2013).

Tab. 1. Fyzikálne vlastnosti tufu z Brhloviec.

Tab. 1. Physical characteristics of tuff from Brhlovce.

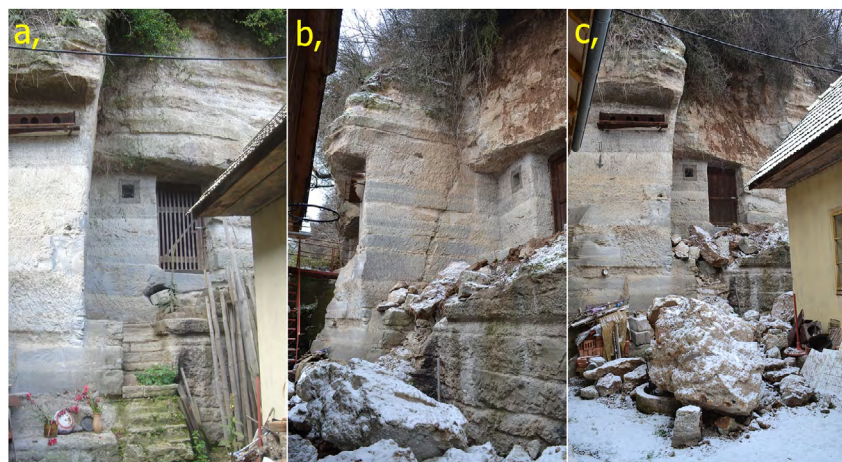
fyzikálne vlastnosti physical characteristics	symbol symbol	jednotka unit	hodnota value
merná hmotnosť specific density	ρ_s	[g.cm ⁻³]	2,452
objemová hmotnosť bulk density	ρ_d	[g.cm ⁻³]	1,420
pórovitosť porosity	n	[%]	41,6
hmotnostná nasiakavosť rock absorption capacity	N	[%]	28,2
pevnosť v prostom tlaku uniaxial compressive strenght	σ	[MPa]	17,0

2. STRUČNÁ CHARAKTERISTIKA LOKALITY

Skalné obydlia v Brhlovciach vybudované v tufovom komplexe predstavujú posledné zachované stavby svojho druhu na území Slovenska. Lokalita je od roku 1983 vyhlásená za Pamiatkovú rezerváciu ľudovej architektúry. Priestory vyhlbené v skalnom masíve nezodpovedajú požiadavkám súčasných obydľí, a preto sú využívané najmä ako skladové priestory, hospodárske budovy, resp. sú opustené a neutržiavané. Táto situácia vedie k zhoršovaniu ich stavu, predovšetkým zo stabilného hľadiska. Spolupôsobenie degradačných faktorov na viacerých objektoch dospelo až do štádia kolapsu ich jednotlivých častí. Jedným z negatívne pôsobiacich činiteľov je práve fyzikálne zvetrávanie.

Obr. 1 dokumentuje narušenie statiky objektu Pamiatkovej rezervácie vplyvom postupného zvetrania nosného skalného piliera, ktorý prenáša zvislé zaťaženie stropnej časti podzemnej miestnosti do podlažia (skalného masívu). Ďalší príklad porušenia skalného masívu v dôsledku fyzikálneho zvetrávania vedúceho až k zrúteniu skalného previsu je na obr. 2.

Skalné obydlia sú vybudované v brhloveckých tufoch, ktoré zaraďujeme do regiónu neogénnych vulkanitov, litologickej formácie neovulkanitov a do litologického komplexu andezitových tufov a tuftov (Matula & Pašek, 1986). Tuf je charakteristický svetlosivou farbou, vitrolitokryštaloklastickou štruktúrou a fluidálnou mikrotextrúrou. Podľa veľkosti klastov ide o tuf piesčitý až popolovitý, mikropórovitý. Na jeho zložení sa podieľa



Obr. 2. Zrútenie skalného previsu ohrožujúceho rodinný dom: a) pôvodný stav pred zrútením (foto: Brček, 2011); b, c) stav po zrútení v novembri 2012 (foto: Kralovičová, 2012).

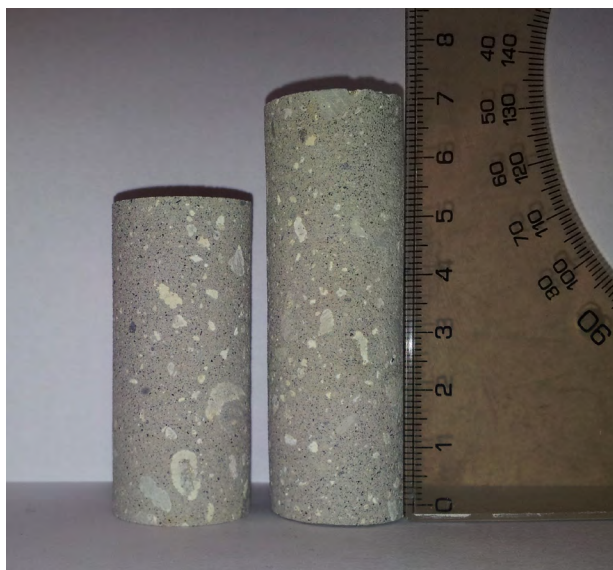
Fig. 2: Collapse of rock mass overhangs endangering family house: a) the view before the collapse (photo: Brček, 2011); b, c) the state of rock mass after the collapse in November 2012 (photo: Kralovičová, 2012).

vulkanické sklo (amorfná fáza), litoklasty a kryštaloklasty. Litoklasty sú zastúpené andezitmi a kryštaloklasty plagioklastmi. Porfýrické výrastlice plagioklastov a litoklastov sú chaoticky rozmiestnené vo vulkanickom skle (Obr. 3). Základné fyzikálne vlastnosti tufu z Brhloviec sú uvedené v tab. 1.

Na zistenie presnejšieho mineralogického zloženia „brhloveckého“ tufu bola vykonaná minerálna a röntgenová difrakčná prášková analýza na neorientovaných práškových preparátoch. Mikropetrografické štúdium tufu poukazuje na minerálne zloženie pozostávajúce z montmorillonitu, albitu, kalcitu a vulkanického skla. Dominantnou je práve amorfná fáza, teda vulkanické sklo. V poradí druhým najviac zastúpeným minerálom je montmorillonit – až 18 %.

3. METODIKA VÝSKUMU

In situ monitoring vybraných termofyzikálnych parametrov tufového masívu, t. j. teploty T [$^{\circ}\text{C}$] a súčiniteľa tepelnej vodivosti λ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$] sa v areáli Tekovského múzea realizuje od roku 2011. Vybrané parametre sú kontinuálne zaznamenávané pomocou „hot-ball“ sond pripojených k dataloggeru. Sondy pozostávajú zo senzorov, ktoré sú založené a skonštruované na princípe „hot-ball“ metódy (Kubičár et. al., 2006).



Obr. 3. Vzorok tufu zo skalných obydlí v Brhlovciach odobrané zo skalného masívu z hĺbky 25 až 37 cm (foto: Kralovičová, 2013).

Fig. 3. Samples of tuff from Brhlovce rock dwellings, taken from 25 to 37 cm depth (photo: Kralovičová, 2013).



Obr. 4. Lokalita Brhlovce skalné obydlie: a) lokalizácia osadenia „hot ball sond“ a zrážkomernej stanice (vľavo); b) detail priestorového rozmiestnenia „hot-ball“ sond spolu so solárne napájanou záznamovou jednotkou.

Fig. 4. Locality Brhlovce rock dwelling: a) location of „hot-ball“ probes and weather station (left); b) detail of the position of „hot-ball“ probes including solar datalogger.



Obr. 5. „Hot-ball“ sonda zostrojená na základe „hot-ball“ metódy. a) princíp „hot-ball“ metódy (upravené podľa Kubičár et al., 2006); b) „hot-ball“ senzor a teliesko horniny; c) „hot-ball“ sonda pripravená na osadenie do skalného masívu.

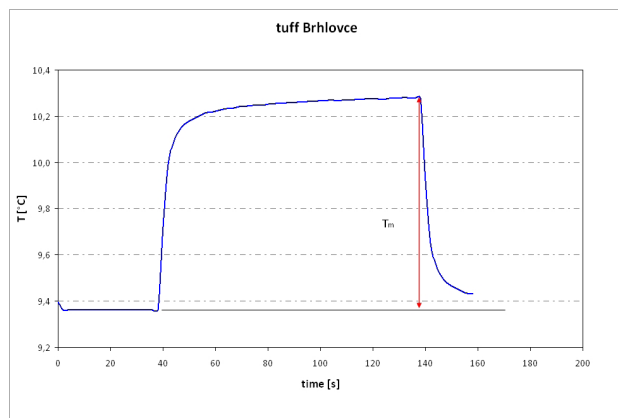
Fig. 5. Construction of hot-ball probe based on hot-ball method. a) principle of hot-ball method (according to Kubičár et al., 2006); b) small hot-ball sensor installed into the rock's sample; c) final hot-ball probe prepared for the embedding into the rock mass.

Na záujmovej lokalite boli do skalnej steny v horizontálnom smere osadené tri „hot-ball“ sondy (Obr. 4). Prvá sonda, inštalovaná v roku 2011, bola umiestnená do hĺbky 10 cm, zvyšné dve boli zabudované do hĺbky 37 a 53,5 cm v apríli 2013. Hlavným zámerom osadenia prvej sondy bolo inicializovať in situ merania a na základe získaných výsledkov pripraviť a optimalizovať ďalšie sondy.

3.1. Princíp „hot-ball“ metódy a konštrukcia „hot-ball“ sondy

Pre potreby monitoringu fyzikálnych parametrov – teploty a súčiniteľa tepelnej vodivosti boli použité „hot-ball“ senzory, ktoré sú založené na princípe transientnej, t. j. prechodovej metódy. Prechodové metódy sa vo všeobecnosti používajú na meranie termofyzikálnych vlastností materiálov pomocou generovania malého množstva tepla vo vnútri skúmaného média a následného zaznamenania teplotnej odozvy. Jednoduchý princíp metódy je uvedený na obr. 5a.

„Hot-ball“ sonda bola skonštruovaná v spolupráci s pracovníkmi Fyzikálneho ústavu SAV v Bratislave a pozostáva z dvoch častí: „hot-ball“ senzoru a telieska horniny, v ktorom je senzor umiestnený (Obr. 5b). Pri konštrukcii sondy je dôležité, aby teliesko horniny bolo litologicky, štruktúrne, a tým aj fyzikálne rovnomeré s okolitým prostredím (v našom prípade s horninovým masívom), do ktorého sa sonda plánuje umiestniť. Vlastný „hot-ball“ senzor

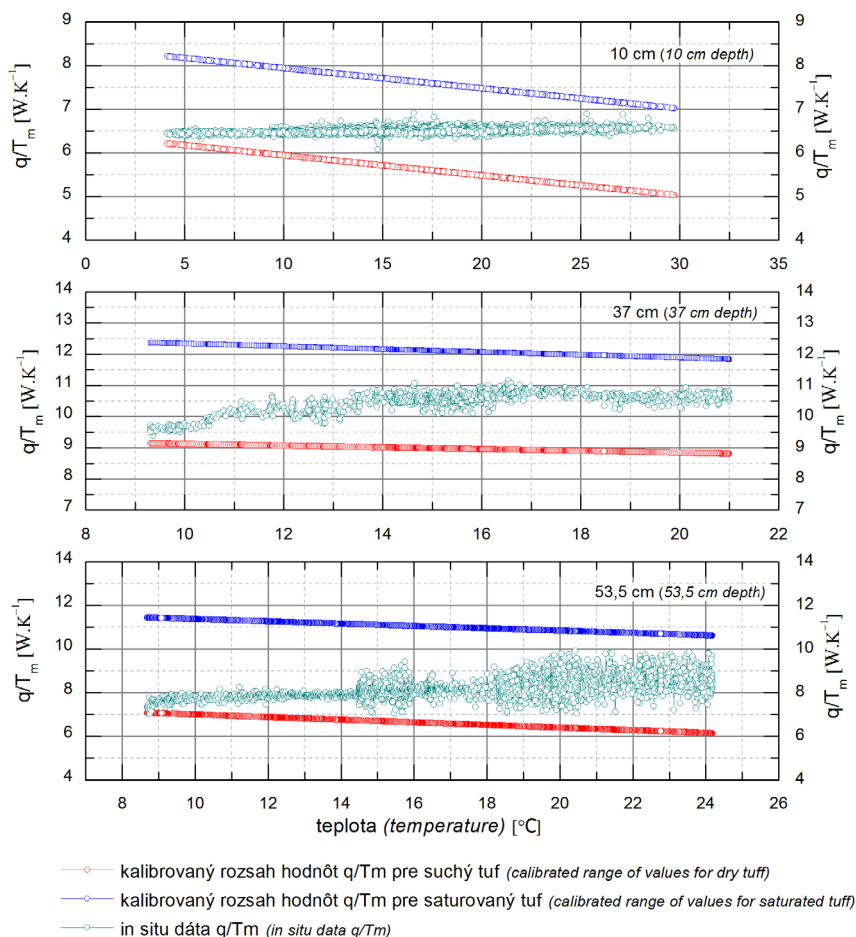


Obr. 6. Príklad jedného cyklu merania – teplotnej odozvy „hot-ball“ sondy.

Fig. 6. Example of measurement cycle – measured temperature response of „hot-ball“ probe.

je umiestnený do stredu valčeka (upraveného vrtného jadra) a fixovaný epoxidovou živicom (Obr. 5b). Proti mechanickému poškodeniu sondy počas jej inštalácie je sonda opatrená drôtenou výstužou vyrobenou z niklových drôtov (Obr. 5c).

Cyklus merania „hot-ball“ sondy pozostáva z niekoľkých krokov. Pred samotným meraním je potrebná stabilizácia teploty, aby gradient teploty medzi senzorom a jeho okolím bol nulový.

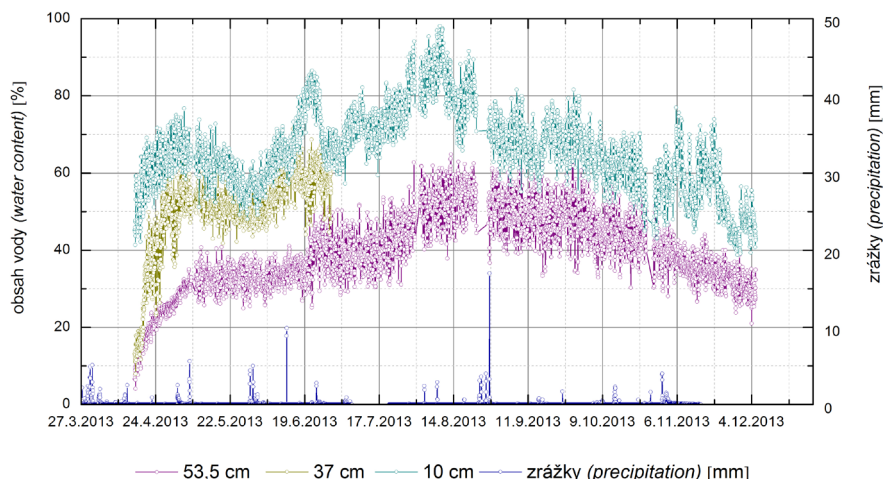


Obr. 7. Kalibračné krivky „hot-ball“ sond v suchých a vodou nasýtených podmienkach pre meranie priebehu zmeny q/T_m v závislosti od teplotných zmien.

Fig. 7. Calibration lines of hot-ball probes in dry and water saturated conditions for measurement course of the change of q/T_m with temperature change.

Obr. 8. Percentuálne vyjadrený priebeh zmeny prítomnosti vody v jednotlivých hĺbkových úrovniach skalného masívu a jeho odozva na zrážkový úhrn.

Fig. 8. Changes in the presence of water in percentage in different depths of rock mass and response to precipitation.



V prvom kroku sa „hot-ball“ senzorom zaznamenáva teplota pozadia, ktorá by mala byť podľa fyzikálneho modelu zhodná s teplotou prostredia v jeho bezprostrednom okolí. Vzápätí sa výkonovou časťou „hot-ball“ senzora generuje malý tepelný impulz vo forme funkcie jednotkového skoku (step-wise funkcia) a súčasne sa zaznamenáva teplotná odozva na generovaný teplotný impulz. Táto teplotná odozva charakterizuje odvod tepla zo sondy do okolitého prostredia. Teplo produkované senzorom preniká do okolitého prostredia v tvare gule, ktorej priemer je spravidla menší ako 20 mm. Nárast teploty je zaznamenávaný až do jej stabilizácie, teda možného maxima. V poslednej fáze, po prerušení tepelného impulzu, sa zaznamenáva pokles teplotnej odozvy, aby sa zaznamenal celý charakter priebehu cyklu. Uvedený cyklus sa potom opakuje. Vždy je však nutná stabilizácia teploty systému tak, aby boli splnené počiatočné podmienky fyzikálneho modelu. Teplotný rozdiel T_m [°C] vypočítaný na základe stabilizovanej teploty pozadia zaznamenananej v prvom kroku cyklu merania a maxima teplotnej odozvy v momente ukončenia tepelného impulzu (generovania tepla) je

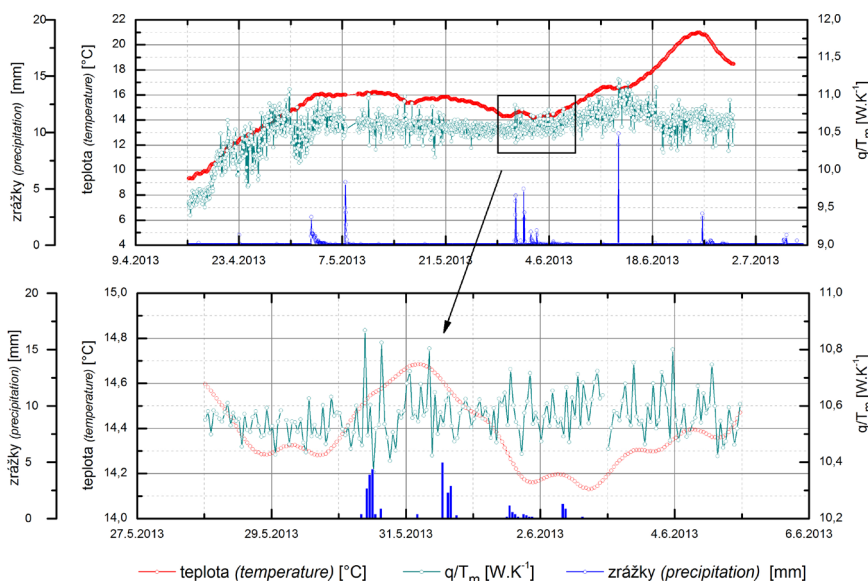
vstupným parametrom pre výpočet súčiniteľa tepelnej vodivosti λ [W.m⁻¹.K⁻¹] (Obr. 6).

Súčiniteľ tepelnej vodivosti λ [W.m⁻¹.K⁻¹] sa vypočíta na základe rovnice (1), kde q [W] reprezentuje konštantnú hodnotu generovaného tepelného impulzu, r_b [m] je polomer „hot-ball“ senzora a parameter T_m [°C] je nameraný teplotný rozdiel (Kubičár et al., 2006). Z rovnice vyplýva, že tepelná vodivosť λ je charakterizovaná pomerom generovaného tepla q a hodnotou T_m , čiže parametrom q/T_m .

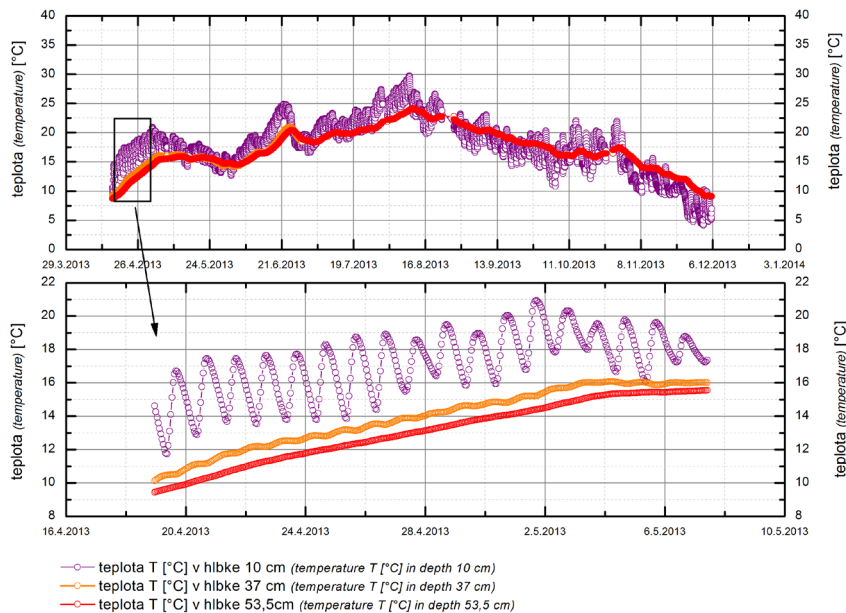
$$\lambda = \frac{q}{4\pi r_b T_m (t \rightarrow \infty)} \quad (1)$$

3.2. Kalibrácia „hot-ball“ sond

Každá nepriama metóda, tzn. aj metóda použitia „hot ball“ sondy predpokladá zostrojiť kalibračnú krivku, ako empirickú závislosť obsahu vody v horninovom materiáli (masíve) od meraného parametra (v našom prípade q/T_m). Kompletné „hot-ball“ sondy



Obr. 9. Priebeh zmien teploty a parametra q/T_m nameraných v sonde v hĺbke 37 cm vzhľadom na zrážkový úhrn.
Fig. 9. The change in temperature and q/T_m parameter measured at the depth of 37 cm with respect to the precipitation.



Obr. 10. Teplotný záznam v rôznych monitorovaných hĺbkach skalného masívu počas pozorovaného obdobia a detailnejší mesačný záznam.

Fig. 10. Temperature changes in different depths of rock mass measured during the observation period (above) and detail of monthly records (below).

(teplotný senzor a teliesko horniny) boli kalibrované pre suchý a plne saturovaný stav v teplotnom rozsahu od -20 do $+22^{\circ}\text{C}$ v klimatickej komore KD-20-T4.1 (Ekkertová et al., 2012). Teplota v klimatickej komore bola menená skokovito, a to vždy po 8 hodinách o 5°C , pričom interval merania „hot-ball“ sond bol nastavený na 60 min. Výsledky kalibračných meraní spolu s údajmi získanými z in situ meraní sú zobrazené na obr. 7. V uvedených grafoch je prezentovaná zmena termofyzikálneho parametra q/T_m pre daný materiál (horninové teliesko) v limitných, t. j. suchých a kompletne saturovaných podmienkach (červená a modrá krivka). V laboratórnych podmienkach namerané kalibračné hodnoty parametra q/T_m testovaných vzoriek v danom teplotnom rozsahu vykazujú negatívnu lineárnu závislosť voči teplote. Z kalibračných údajov taktiež vyplýva, že namerané hodnoty parametra q/T_m v prípade plne saturovaných sond sú vyššie, ako v prípade suchých sond. Značný rozdiel v hodnotách parametra q/T_m medzi suchým a saturovaným stavom poukazuje

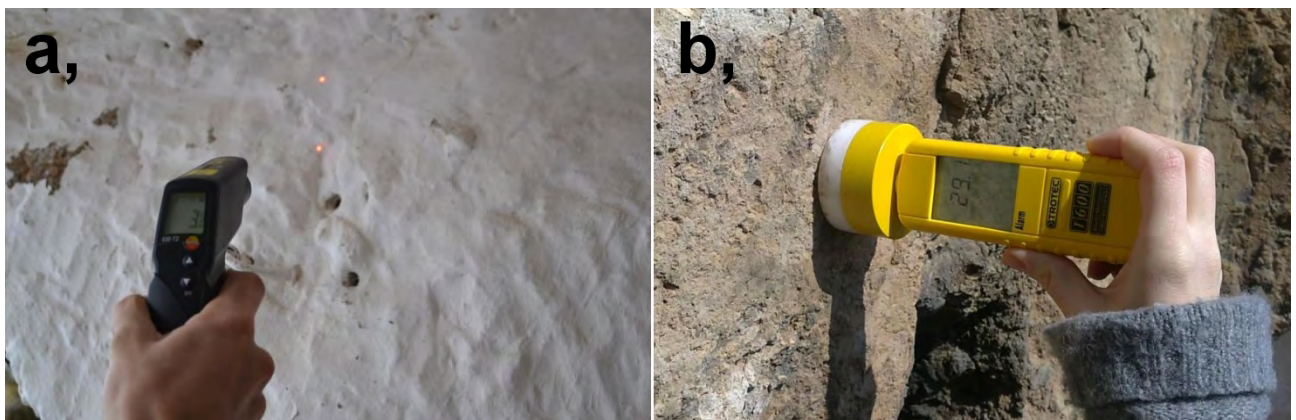
na pomerne vysokú pórovitosť tufov (viac ako 40%), a tým aj na ich vysokú absorpciu.

4. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY

Na základe kalibračných meraní je možné vyjadriť rozsah zmien obsahu vody v masíve v závislosti od zrážkovej činnosti a teplotných zmien. Získané a interpretované údaje sú za obdobie apríl 2013 až december 2013 (cca 8 mesiacov), tzn. keď v horninovom masíve boli inštalované všetky tri sondy.

4.1. Zmeny teploty a tepelnej vodivosti v masíve

Pri kalibrácii sond pre suchý a plne saturovaný stav v laboratórnych podmienkach bola preukázaná negatívna lineárna závislosť. V terénnych podmienkach však táto závislosť nebola



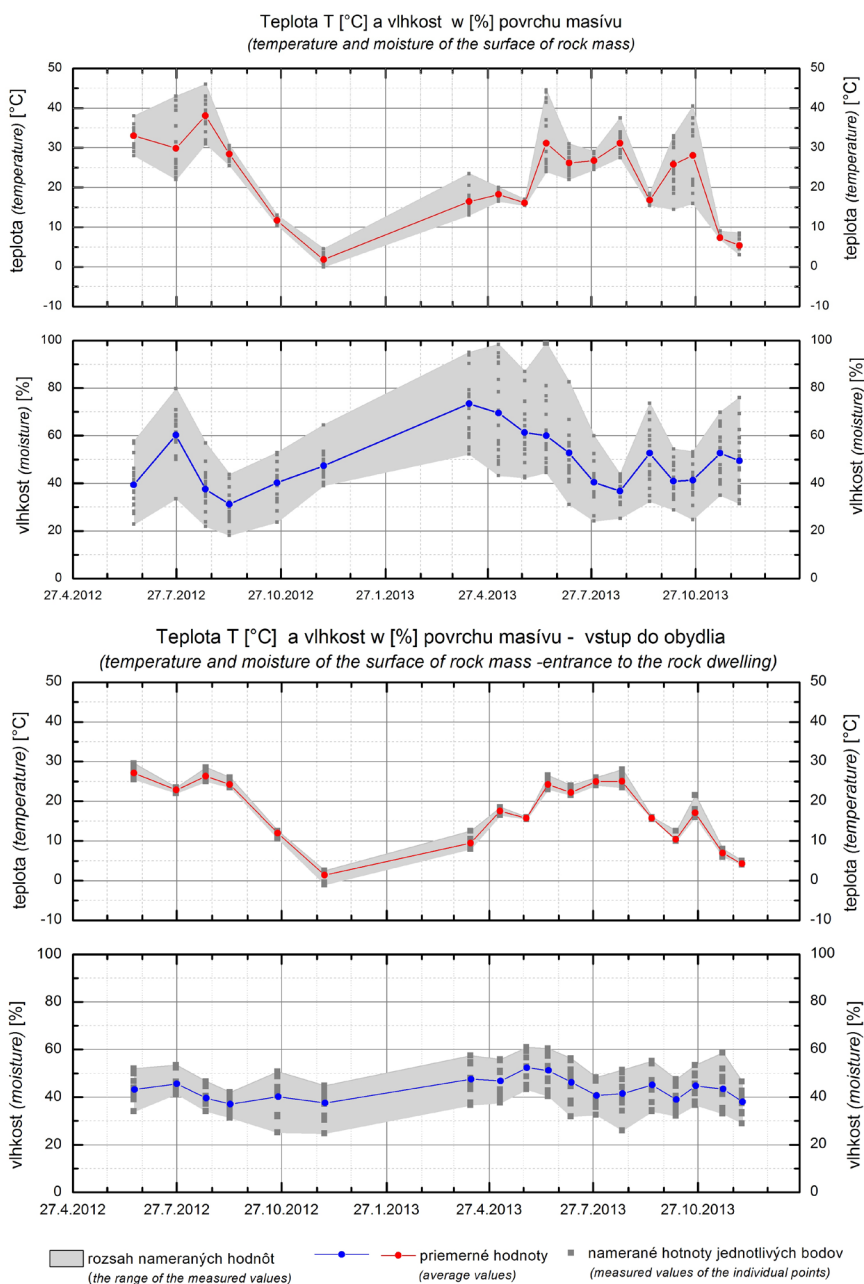
Obr. 11. Merania vybraných fyzikálnych parametrov povrchu skalného masívu: a) meranie povrchovej teploty masívu pomocou prístroja Testo (foto: Kralovičová, 2012); b) meranie orientačnej hodnoty vlhkosti pomocou prístroja Trotec T600 (foto: Brček, 2012).

Fig. 11. Measurement of selected physical parameters of rock mass surface: a) measurement of surface temperature of the rock mass using the Testo device (photo: Kralovičová, 2012); b) measurement of the informative value of moisture using the Trotec T600 (photo: Brček, 2012).



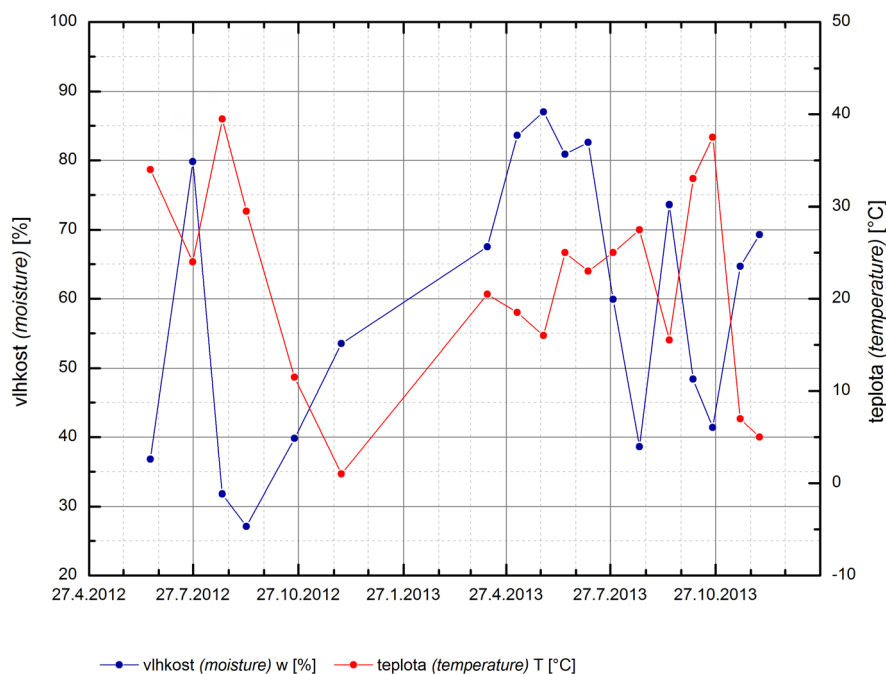
Obr. 12. Lokalizácia meraných bodov povrchovej teploty a vlhkosti: a) profil 1 – vonkajšia, čelná strana masívu; b) profil 2 – vstupný portál do skalného obydlia (foto: Brček, 2012).

Fig. 12. Location of measured points of the surface temperature and moisture: a) profile 1 – front view of rock mass; b) profile 2 – entrance to the rock dwelling (photo: Brček, 2012).



Obr. 13. Namerané hodnoty teploty a vlhkosti povrchu masívu; čelná stena odrezu (horná časť) a vstupná muzeálna časť (spodná časť).

Fig. 13. Temperature and moisture values record from the surface of rock mass; upper part – front side of rock mass; lower part – entrance to the rock dwelling.



Obr. 14. Závislosť orientačnej hodnoty vlhkosti prípravkovej časti masívu od zmeny teploty v bode 2, profil 1.

Fig. 14. Moisture vs. temperature relationship from measuring point no. 2, profile 1.

potvrdená. Napriek uvedenej skutočnosti sa in situ namerané hodnoty parametra q/T_m pohybujú v rozmedzí kalibračných kriviek (Obr. 7), z čoho vyplýva istá korelácia medzi laboratornými dátami a dátami získanými z in situ meraní.

Kalibráciou sond zadané extrémne suché a plne saturované podmienky umožňujú pomocou parametra q/T_m vyjadriť relatívny percentuálny podiel obsahu vody v masíve v jeho jednotlivých hĺbkových úrovniach. Citlivosť „hot-ball“ sond je dostatočne veľká na zaznamenanie (registráciu) zmien prítomnosti vody v masíve v rozmedzí od suchého až po plne saturovaný stav (rozsah od 0 po 100 % obsahu vody). Na obr. 8 je znázornená zmena, resp. priebeh kolísania obsahu vody v masíve zaznamenaný „hot-ball“ sondami spolu so zrážkovým úhrnom za celé pozorované obdobie.

Sonda situovaná v hĺbke 10 cm bola osadená v novembri 2011, teda skôr, ako ostatné sondy, čo dokumentuje približne 50 % obsiahnutej vody ku dňu 16.4.2013, keď boli do masívu osadené ďalšie dve sondy (Obr. 8). Novoinštalované sondy (v hĺbke 37 cm a 53,5 cm) v priebehu prvých 10 dní zaznamenali nárast obsahu vody o 25, resp. 40 %, čím sa postupne adaptovali prirodzeným podmienkam v masíve. Z grafu vyplýva, že adaptácia prebehla v dvoch „krokoch“. V prvej fáze obe sondy zaznamenali nárast z 0 na 10 % a v druhej fáze z 10 na 25 % (sonda v hĺbke 53,5 cm), resp. na 40 % (sonda v hĺbke 37 cm).

V priebehu monitorovaného obdobia, po 106 dňoch (29. 6. 2013) došlo k prerušeniu merania sondy inštalovanej v hĺbke 37 cm, a preto bola demontovaná. Počas fungovania všetkých sond bolo zaznamenané obdobie so zrážkovou činnosťou, ktoré sa s minimálnou časovou retardáciou prejavilo na zvýšení obsahu vody v masíve (Obr. 9).

Vzhľadom na rozsah monitorovaného obdobia, ako aj prerušenie merania sondy v hĺbke 37 cm, nie je možné s presnosťou tvrdiť, či je masív rovnomerne dotovaný vodou alebo sa smerom do hĺbky obsah vody znižuje, ako to dokumentuje obr. 8.

Počas monitorovaného obdobia (apríl až december 2013) boli „hot-ball“ sondami namerané len kladné teploty v skalnom masíve, a to v rozsahu od 4 do 30°C (sonda v hĺbke 10 cm). Na obr. 10 je uvedený priebeh zmeny teploty vo všetkých monitorovaných hĺbkach masívu, pričom najvýraznejšie teplotné zmeny boli zaznamenané sondou, ktorá je umiestnená v hĺbke 10 cm od povrchu, a naopak, najmenej výrazné zmeny boli namerané v hĺbke 53,5 cm. Graf na obr. 10 (spodná časť 19. 4.–7. 5. 2013) dokumentuje teplotné kolísanie v rámci periódy 24 hodín (deň/noc), ktoré sú zreteľne viditeľné najmä v hĺbke 10 cm, keď v priemere klesli/stúpili o 3,6°C/24 hod. Teplotné kolísania v rámci dňa sú ešte mierne viditeľné aj v sonde situovanej v hĺbke 37 cm (priemerná denná zmena je 0,3°C za vybrané obdobie), ale údaje zo sondy v hĺbke 53,5 cm už teplotné zmeny v rámci dňa nevykazujú. Naproti tomu, merania za dlhšie obdobie (8 mesiacov) poukazujú na pomerne výrazný rozdiel medzi minimálnou a maximálnou teplotou v tejto hĺbke, a to až 15,5°C.

4.2. Meranie teploty a vlhkosti povrchu masívu prístrojmi Testo a Trotec

Okrem meraní teploty a parametra q/T_m skalného masívu prostredníctvom „hot-ball“ sond je diskontinuálne meraná aj povrchová teplota a prípravková vlhkosť masívu pomocou prístrojov Testo (Obr. 11a) a Trotec (Obr. 11b). Meranie vlhkosti prípravkovej časti masívu je realizované pomocou vlhkomera Trotec T600, ktorý zaznamenáva túto veličinu na základe mikrovlnnej technológie. Prístrojom je možné určiť distribúciu vlhkosti v rozsahu hĺbky od 0 do 30 cm. Týmto spôsobom je však meraná len smerodajná hodnota vlhkosti, pomocou ktorej môžeme vlhkosť iba detekovať v relatívnej škále. Môžeme pozorovať jej zvýšenie, či zníženie v čase a v priestore, nie je však možné stanoviť jej konkrétnu hodnotu.

Povrchová teplota a vlhkosť masívu na lokalite je pozorovaná v dvoch profiloch. Rozmiestnenie bodov merania je uvedené na

obr. 12a,b. Prvý profil obsahuje 17 meraných bodov, ktoré sú situované v odreze nechráneného masívu (čelná strana), pričom merané sú aj miesta v okolí osadenia „hot-ball“ sond (Obr. 12a). V druhom profile je meraných celkovo 10 bodov, ktoré sa nachádzajú vo vstupnom portáli do skalného obydlia na prvom podlaží múzea (Obr. 12b). Miesta merania v tejto časti sú čiastočne chránené proti poveternostným vplyvom.

Merania povrchovej teploty a prípoверхovej vlhkosti masívu sa vykonávajú už od roku 2012, pričom doteraz bolo zrealizovaných celkovo 18 etáp meraní. Získané údaje sú uvedené v grafoch na obr. 13, kde sú okrem nameraných hodnôt uvedené aj ich priemerné hodnoty a rozptyl. Ak porovnáme obe merané plochy, môžeme konštatovať, že zatiaľ čo klimatickým pomerom vystavená časť skalnej steny vykazuje pomerne výrazné rozdiely v nameraných hodnotách prípoверхovej vlhkosti, vo vstupnom portáli boli počas celého pozorovaného obdobia zaznamenané hodnoty relatívne homogénne. Na rozdiel od vlhkosti, teplota masívu síce v závislosti od ročného obdobia kolísala, avšak v rámci jedného etapového merania neboli zaznamenané výrazné teplotné rozdiely. Najmenší rozptyl v nameraných hodnotách povrchovej teploty bol zaznamenaný v jesenných mesiacoch. Závislosť teploty od zmeny vlhkosti dokumentuje obr. 14.

5. ZÁVER

Monitoring priestorovej a hĺbkovej distribúcie obsahu vody v skalnom masíve je pomerne náročný. Pomocou „hot-ball“ metódy, ktorá nepriamo pomocou termofyzikálneho parametra q/T_m umožní stanoviť obsah vody v masíve sa otvára možnosť monitorovať jej zmeny v čase a priestore. V súčasnosti in situ vybudovaný monitorovací systém prináša výsledky korelovateľné s laboratórnym výskumom. Po zadeinovaní okrajových podmienok kalibrácie „hot-ball“ sond pre suchý a plne saturovaný stav je možné pozorovať percentuálny podiel obsahu vody v masíve, ako aj jej zmeny. Počas monitorovaného obdobia bol síce viditeľný postupný pokles obsahu vody v masíve s hĺbkou, ale vzhľadom na rozsah monitorovacieho obdobia nie je možné s presnosťou zistiť, či je masív rovnomerne dotovaný vodou alebo sa s hĺbkou obsah vody znižuje. Je zaujímavé, že vplyv zrážkovej činnosti sa prejavil takmer okamžite, avšak obsah vody v masíve (v hĺbkach 10 a 37 cm) stanovený na základe parametra q/T_m bol rozdielny. Tento fakt dokazuje to, že infiltračný obeh v rozsahu monitorovanej hĺbky nie je rovnaký, ďalej, že obsah ílových minerálov v hornine sa pravdepodobne mení a niektoré z nich sú schopné viazať infiltrovanú vodu (montmorillonit 18 %) a v neposlednej miere nielen vysoký obsah pórov (41 %), najmä však ich charakter (veľkosť, otvorenosť, prepojenosť) zohrávajú podstatnú úlohu pri premenlivosti obsahu vody v prípoверхovej časti tufového masívu skalných obydlí v Brhlovciach.

Závislosť vlhkosti od teploty (Obr. 14) bola zatiaľ preukázaná len povrchovými meraniami masívu. Merania prípoверхovej vlhkosti vo vstupnej časti skalného obydlia poukazujú na pomerne vyrovnanú vlhkosť. Kým vonkajšia strana masívu je priamo vystavená vonkajším klimatickým činiteľom a ich zmenám, vo vstupnej časti sú ich vplyvy čiastočne obmedzené. Hodnoty vlhkosti a teploty namerané na čelnej stene potvrdili,

že v rámci dňa, či mesiaca sú jednotlivé časti masívu odlišne vystavené účinkom klimatických činiteľov (slnečný osvit, smer vetra, zrážky), čo ovplyvňuje teplotno-vlhkostný režim vo vnútri masívu, s čím pravdepodobne súvisí aj fyzikálny proces degradácie horninového masívu.

Vzhľadom na uvedený fakt, bude ďalší výskum orientovaný na stanovenie vplyvu vlhkosti a teploty (predovšetkým ich cyklické striedanie a kolísanie) v interakcii s ostatnými prírodnými podmienkami, zameraný na zhodnotenie vlhkosti ako potenciálneho faktora porušenia stability skalných masívov.

Podakovanie: Táto práca bola podporovaná Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-0641-10 a APVV-0330-10.

Literatúra

- Brček M., Vlčko J., Kubičár L., Boháč V. & Adamcová R., 2009: Vlhkosť – negatívny faktor deteriorácie horninového masívu. *Acta Geologica Slovaca*, 1, 1, 1–8.
- Brček M., Vlčko J. & Kompaníková Z., 2012: Modelovanie teplotných zmien v skalnom masíve. *Geotechnika*, 15, 1–2, 15–20.
- Ekkertová P., Šimková I., Brček M., Durmeková T. & Boháč V., 2012: Influences of temperature change and moisture content on the thermal conductivity of rocks. In: Zmeskal O. (Ed.): Termohysics 2012 Meeting of the Thermophysical Society Working Group of the Slovak Physical Society, Podkylava, 33–40.
- Fidriková D., Greif V., Dieška P., Štofanič V., Kubičár L. & Vlčko J., 2013: Monitoring of the temperature–moisture regime in St. Martin’s Cathedral tower in Bratislava. *Environmental Earth Sciences*, 69, 4, 1481–1489.
- Kubičár L., Štofanič V., Vretenár V. & Bágel L., 2006: Thermophysical sensors: theory and application of the hot-ball. In: Matiašovský P. & Koronthályová O. (Eds.): Thermohysics 2006, Meeting of the Thermophysical Society Working Group of the Slovak Physical Society, Kočovce, 28–35.
- Kubičár L., Fidriková D., Štofanič V., Vretenár V., Vlčko J., Greif V., Brček M. & Šimková I., 2013: Monitoring of temperature–moisture regime of rock massive at Spis Castle. In: Zmeskal O. (Ed.): Termohysics 2013 Meeting of the Thermophysical Society Working Group of the Slovak Physical Society, Podkylava, 229–233.
- Kubičár L., Fidriková D., Štofanič V., Vretenár V., Šimková I., Greif V. & Vlčko J., 2013: Monitoring of the temperature – moisture regime of pillars in north and south orientation of the St. Jacobs Church in Levoca. In: Geophysical research abstracts. Vol. 15. EGU2013-10833, EGU General Assembly.
- Matula M. & Pašek J., 1986: Regionálna inžinierska geológia ČSSR. Alfa Bratislava. 295 p.
- Vlčko J., Greif V., Gróf V., Jezný M., Petro L. & Brček M., 2009: Rock displacement and thermal expansion study at historic heritage sites in Slovakia. *Environmental Geology*, 58, 8, 1727–1740.

Summary: The monitoring of the temperature and the water content changes inside the rock mass are relevant not only from the scientific aspect (specifically as the triggering factors) but it is also important for the protection of historical monuments. The changing of the moisture content and temperature of rock mass may cause faster degradation of structural bonds and mineral change inside the mass. For the research of the temperature and water content changes in different depth levels of rock mass, the tuff’s mass in Brhlovce rock dwellings museum has been selected. Our research followed previous studies in this domain, especially the study of Brček et al. (2009) and Kubičár et al. (2006).

The main aim of the paper was to evaluate the partial results from in situ monitoring of the temperature and thermal conductivity in different depth levels of rock mass and compare them with laboratory tested data. The information about the thermophysical parameters has been obtained using hot-ball probes which have been implemented inside the rock mass. Prior to the hot-ball probes installation into the mass, the probes had to be calibrated in laboratory for the limit values corresponding to full saturated and dry states. The results of calibration process of tested samples demonstrated the negative linear dependency of thermal conductivity on the temperature. However, in field conditions was not found this dependency. However, in the field conditions this dependence was not found. Despite this fact, the values of the thermal conductivity observed in situ at different depth levels of rock mass are in the range of the calibration curves (Fig. 7), which suggests certain correlation between laboratory testing data and data obtained from in situ measurements. Based on calibration measurements it was possible to present the progress in water content change inside the mass depending on precipitation and measured temperature changes. The data obtained from the 8 month time period of continual monitoring point to the difference in depth distribution of water content and temperature in the rock mass. There were recorded the gradual decreases of water content with depth, but given the short monitoring period it cannot be confirmed whether the rock mass is evenly saturated or the saturation degree is decreasing with depth. The change in climatic conditions, mainly in precipitation, was documented with minimum time retardation, and the percentage change of water content in mass was recorded not only in 10 cm depth but also in depth of 37 cm. In this case, the depth of probes implementation was admittedly different, but the thickness of overburden was the same, which led to change in the water content of mass in both probes (time and spatial infiltration of precipitation was the same).

In addition to measuring temperature and thermal conductivity within the massif, the surface temperature and moisture has been measured and the dependence between temperature and moisture was confirmed (Fig 14).

Nevertheless, using the spatial and depth differentiation of continual long-term monitoring of thermophysical parameters of rock mass, it will be possible to determine the spatial and depth distribution of water content in mass more precisely.