

Fyzikálne modelovanie rozvoľnenia skalných masívov mechanizmom vkladovania blokov vplyvom cyklických teplotných zmien

Ivana Šimková, Vladimír Greif, Ján Vlčko & Patricia Ekkertová

Katedra inžinierskej geológie PRIF UK, Mlynská dolina, 842 15 Bratislava; simkova@fns.uniba.sk, ekkertova@fns.uniba.sk, greif@fns.uniba.sk, vlcko@fns.uniba.sk

AGEOS Physical modelling of rock mass loosening caused by wedging mechanism of rock blocks in response to cyclic temperature changes

Abstract: Cyclic diurnal and annual temperature variations acting upon rocks belong to the permanent factors rarely considered as triggering factors of slope movements. The importance of temperature changes is viewed mainly as the precursor of failures where triggers are rainfall, seismic activity or other natural factors. This paper aims to determine the limit conditions where plastic deformation develops in situation where the block or several blocks fallen into open discontinuity create a “wedge-like” behaviour causing non-elastic displacement of block resting on an inclined plane. A physical model was prepared to study this phenomenon. The study was performed in thermal dilatometer where the displacements were measured using LVDT sensors for blocks with different block/wedge ratios, while the temperature cycled in a controlled manner. Together 9 physical models of sandstone blocks were tested within range of $\Delta T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, which corresponds to annual temperature change and permanent displacements of the block was measured in order to confirm the existence of expected type of failure mechanism. Further series of cyclic tests at 9 models were performed in order to determine the threshold temperature change at which the plastic deformation for different block/wedge ratios occurs. The results confirmed the existence of plastic deformation resulting from cyclic wedging mechanism for block/wedge ratio 0.4 and total model size of 50mm reached permanent displacement of 2.23×10^{-3} mm for a block resting on an inclined plane of 7° . For the same conditions the temperature change which causes permanent displacement of the block by wedging mechanism was found out to be as low as $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. The results of physical model are in agreement with proposed analytical solution by Pasten (2013) and measurements of Bakun-Mazor et al., (2013) at Masada site in Israel. A thorough testing of the rock material in saturated conditions together with physical models was carried out, which confirmed the existence of the plastic deformations with amplitudes ten times larger compared to the dry conditions.

Key words: thermal wedging, rock stability, failure mechanism, cyclic temperature change

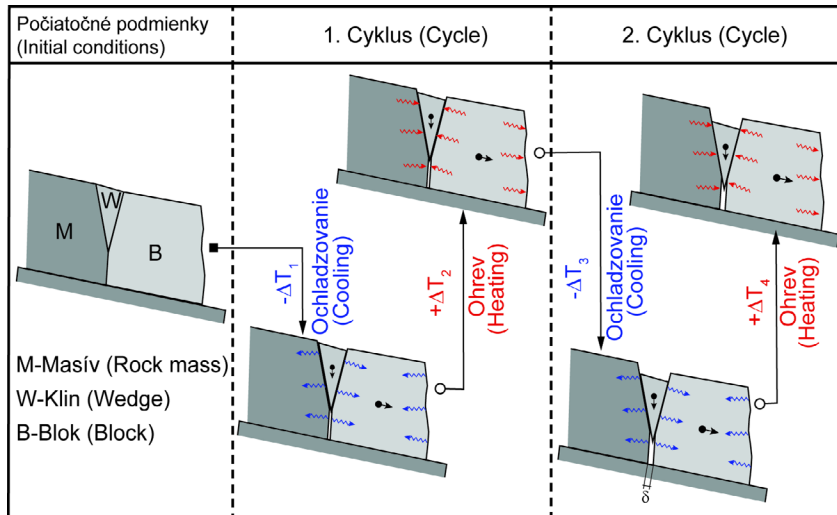
1. ÚVOD

Vplyv opakovaných teplotných zmien a nimi indukovaných termodynamických napätí na vznik a vývoj svahových pohybov bol pozorovaný alebo skôr pocitovo vnímaný už dávnejšie. Prvé poznatky v tomto smere prezentoval Davison (1880), ktorý sa už v 19. storočí zaoberal problematikou posunu skalných blokov po naklonenej rovine spôsobených teplotnými zmenami. Ďalšími, ktorí zastávali názor, že svahový pohyb môže byť vyvolaný teplotnými zmenami boli Redlich, Terzaghi a Kampe (1929) a Záruba (1932).

Napriek, počiatočnému záujmu geológov, resp. stavebných inžinierov o štúdium vplyvu termomechanického efektu na mobilizáciu svahových gravitačných javov v skalnom horninovom prostredí, aj v súčasnosti, napriek viacerým publikovaným prácam vychádzajúcich z terénnych či laboratórnych meraní, matematického modelovania a pod., možno konštatovať, že tento proces je nielen pomerne málo preskúmaný, ale najmä výrazne subjektívny (Günzburger et al., 2005; Watson et al., 2004; Vlčko et al., 2005, 2009; Jezný et al., 2007; Brček et al., 2009, 2010; Gishig et al., 2011a, 2011b; Mufundirwa, 2011; Vargas et al.,

2013). Príčinou tohto stavu je fakt, že cyklické zmeny teploty povrchu horniny patria medzi permanentne pôsobiace prírodné faktory, ktorých prejav je pomerne ťažko odlišiteľný od ostatných, pôsobiacich na skalné svahy simultánne (vibrácie, seizmicita, zvetrávanie, podzemná voda a pod.), ako aj to, že každý skalný svah je osobitý svojim litologickým zložením, štruktúrnymi parametrami a nakoniec i geografickou polohou (klimatické pásmo, nadmorská výška a pod.). Pasten (2013) bol medzi prvými, kto sa pokúsil o kvantifikáciu teplotným napätím indukovaného posunu horninových blokov pomocou zjednodušeného analytického modelu (Obr. 1), v ktorom mechanizmus zosúvania skalného bloku (B v Obr. 1) po naklonenej rovine (šmykovej ploche) je generovaný vkladovaním horninových úlomkov, resp. ich poklesávaním do pukliny dilatujúcej vplyvom cyklických teplotných zmien. Zmena objemu okolitej horniny vplyvom teploty, vďaka objemovej zmene horninových blokov (vrátane bloku tvaru klinu) v bezprostrednom okolí, ako aj vďaka tiaži horninového bloku umožňuje poklesávanie klinu.

Poklesom a následným pohybom bloku (B), v dôsledku zmeny termodynamických podmienok, nastáva vo svahu relatívna



Obr. 1. Princíp mechanizmu vkladovania počas cyklickej teplotnej zmeny.

Fig. 1. Principle of the thermally induced wedging mechanism.

rovnováha, ktorá je opätovne narušená zmenou teploty, pričom celý proces sa môže znovu opakovať. Pastenov zostavený analytický model je založený na zostavení série rovníc stanovujúcich výpočet posunu bloku horniny. Pastenov upravený model aplikovali Bakun-Mazor et al. (2013) na skalnom svahu v Masade (Izrael), kde došlo k zrúteniu veľkého skalného bloku, pričom snahou autorov bolo zistiť, či spúšťacím faktorom posunu skalného bloku bol seizmický otras alebo vplyv teplotne indukovaných napätí.

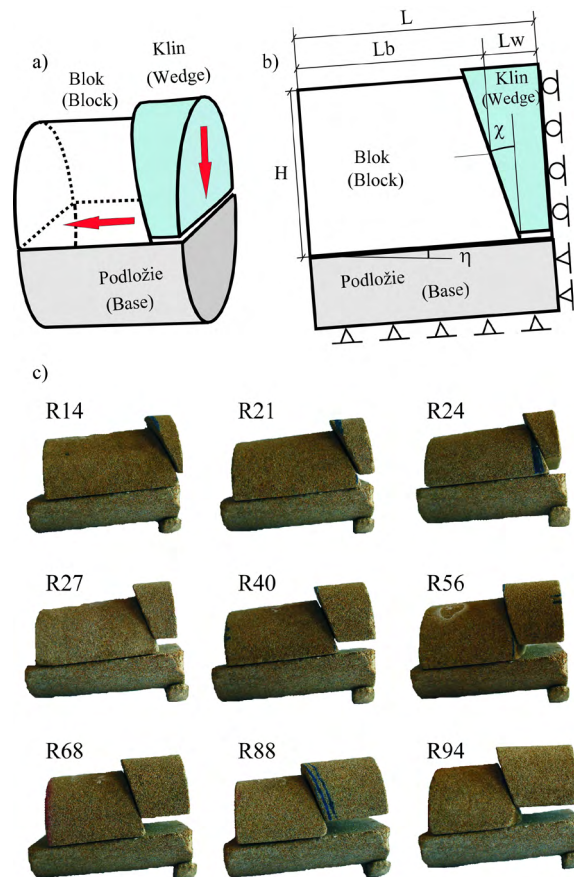
Autori tohto príspevku si dali za cieľ overiť Pastenove analytické riešenie experimentálne, pomocou deviatich zostáv analógových fyzikálnych modelov v suchom stave, ktorých konfigurácia vychádzala z predstavy Pastenovho analytického riešenia.

Vzhľadom na to, že horninový masív sa v prírodných podmienkach nenachádza v ideálnom suchom stave, bol pri výskume, počas cyklickej zmeny teploty, v rovnakom rozsahu teplôt ako pri modeloch na vysušených horninových vzorkách testovaný horninový materiál aj v nasýtených podmienkach. Voda ako jeden z hlavných faktorov podieľajúcich sa na zvetrávacích procesoch má podstatný význam pre dlhodobú stabilitu hornín, resp. horninových masívov, čo potvrdzujú aj štúdie autorov Snethlage (1984), Weiss (1992), Künzel (1994), Krus (1995), Künzel a Krus (1995), Mirwald (1997).

2. ANALYTICKÉ RIEŠENIE

Pastenov model predpokladá vkladovanie skalných úlomkov do otvorenej pukliny s otvorenosťou L_w (Obr. 2). Pre jednoduché riešenie Pastenov vkladujúci blok má tvar pravouhlého bloku rozmeru L_w a H , pričom rozmery odsúvaného bloku sú L_b a H . Keďže v analytickom riešení skalný blok predstavuje litologicky homogénne teleso, potom na vyrovnanie teploty v jeho celom objeme je potrebný čas t^* [s]. Časovú homogenizáciu teploty zosúvaného bloku a klinu definoval vzťahmi: $t_b^* = L_b^2/D_T$ a $t_w^* = L_w^2/D_T$ (Carslaw a Jaeger, 1986), kde $D_T = \lambda/(\rho \cdot C_p)$ [$m^2 \cdot s^{-1}$] je teplotná vodivosť horniny, ktorá je priamo úmerná tepelnej vodivosti λ [$W \cdot m \cdot ^\circ C^{-1}$], nepriamo úmerná objemovej hmotnosti ρ [$kg \cdot m^{-3}$] a mernej tepelnej kapacite C_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$] bloku.

Ak doba expozície horninového bloku teplotnej zmene ΔT je dlhšia ako čas potrebný na jeho teplotnú homogenizáciu platí vzťah $t_{exp} \geq t^*$, potom podľa Pastena (2013) je možné určiť prienik



Obr. 2. Schematické znázornenie fyzikálneho modelu (a,b) a 9-tich zostáv fyzikálneho modelu (c) s rôznym pomerom klinu/bloku (L_w/L_b) s použitím označenia podľa tab. 1.

Fig. 2. Geometry of the models (a,b) and the nine models (c) prepared with various block/wedge (L_w/L_b) ratios named in accordance with tab.1.

teploty do hĺbky horniny alebo bloku počas jednoročného cyklu (S_d) [m] podľa vzťahu:

$$S_d \approx L/2 \text{ pre } t_{\text{exp}} \geq 2L^2 / D_T \quad (1)$$

Pasten (2013) odvodil tri zložky teplotnej deformácie, ktoré sa zúčastňujú na výslednom posune bloku: teplotná expanzia δ_T [m] a teplotná kontrakcia skalného materiálu δ_s [m], ako aj elastický šmykový účinok na klznom rozhraní, tzv. elastická deformácia δ_j [m].

Teplotná expanzia pri sezónnej teplotnej zmene môže byť vyjadrená ako

$$\delta_T = \alpha \cdot \Delta T \cdot (L_w + \xi \cdot L_B + \beta \cdot S_d) \quad (2)$$

kde α [$\text{mm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$] je lineárna teplotná rozťažnosť skalného materiálu, ΔT [$^\circ\text{C}$] je sezónna teplotná zmena a β [$^\circ\text{C}^{-1}$] je koeficient predstavujúci nerovnomerné rozloženie teploty vo vnútri odsúvajúceho sa bloku a horninového masívu s hodnotami v rozmedzí od 0 do 1. V prípade homogenizovaného bloku je hodnota tohto súčiniteľa rovná 1, čo je aj prípad testovaných modelov. Bezrozmerný koeficient $\xi \leq 1,0$ je zavedený pre výpočet teplotnej expanzie voľnej (pravej) časti odsúvaného bloku (Obr.1), ktorý neprispieva k znižovaniu teplotnej rozťažnosti systému.

Pre výpočet teplotnej kontrakcie Bakun-Mazor et al. (2013) definovali tzv. pružnú silu F_{max} vznikajúcu pozdĺž puklín počas zahrievania/ochladzovania bloku a spôsobujúcu jeho posun, pričom silový odpor voči pohybu zosúvaného bloku F_{max} [N.m⁻¹] možno definovať vzťahom:

$$F_{\text{max}} = \gamma L_b \cdot (H - \frac{1}{2} L_b \tan \eta) \cdot (\tan \varphi \cos \eta - \sin \eta) \quad (3)$$

kde $\gamma = \rho \cdot g$ [N.m⁻³] je objemová tiaž horniny, π [$^\circ$] je uhol vnútorného trenia na šmykovej ploche a η [$^\circ$] je uhol sklonu podložja (šmykovej plochy).

Výsledná teplotná kontrakcia δ_σ [m] generovaná v bloku a v kline vplyvom účinku F_{max} je:

$$\delta_\sigma = \frac{F_{\text{max}} \cdot \cos \eta}{H \cdot E} \cdot (L_w + \frac{L_b}{2}) \quad (4)$$

kde E [Pa] je modul pružnosti horninového materiálu (Pasten, 2013).

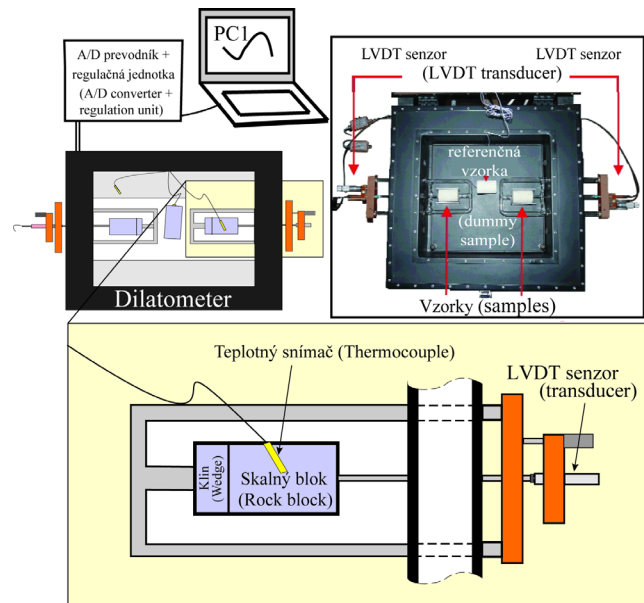
Poslednou zložkou pre výpočet plastickej teplotnej deformácie δ_p [m] je elastická deformácia δ_j [m], ktorá môže byť vyjadrená ako:

$$\delta_j = \frac{1}{K_j} \cdot (\frac{F_{\text{max}}}{L_b}) \cdot \cos \eta \quad (5)$$

kde parameter K_j [Pa.m⁻¹] je koeficient šmykovej tuhosti na pukline, ktorý predstavuje napätostno-deformačnú charakteristiku pukliny vytvorenej v horninovom masíve (Barton, 1977).

Ak poznáme všetky zložky teplotnej deformácie je možné vzťahom [6] vyjadriť trvalý posun bloku δ_p [m] ako:

$$\delta_p = \delta_T - \delta_\sigma - \delta_j \text{ pre } (\delta_T - \delta_\sigma - \delta_j) \geq 0 \quad (6)$$



Obr. 3. Schematické znázornenie dilatometra VLAP04 s detailom umiestnenia teplotných snímačov.

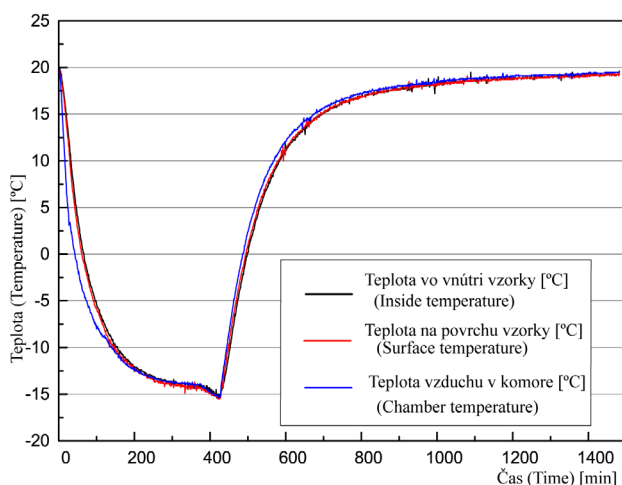
Fig. 3. Scheme of the dilatometric device VLAP04 with the detail of the testing configuration and thermocouples placement.

Trvalý posun bloku nastane, ak je dosiahnutá tzv. limitná teplotná zmena ΔT_{lim} [$^\circ\text{C}$], vyjadrená pomocou nasledovného vzťahu (Pasten, 2013):

$$\Delta T_{\text{lim}} = \frac{F_{\text{max}}}{\alpha \cdot (L_w + \xi \cdot L_b + \beta \cdot S_d) \cdot E} \times \left[\frac{E}{K_j \cdot L_b} + \frac{L_w}{H} + \frac{L_b}{2H} \right] \quad (7)$$

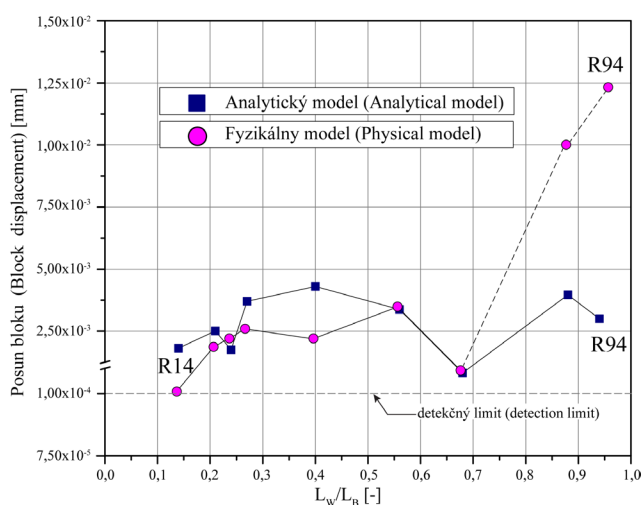
kde všetky parametre boli zistené z geometrie skúmaného modelu (L , L_w , L_b , H , η) z jeho fyzikálnych vlastností (ρ , χ , C , λ , E , α) alebo experimentálne (K_j).

Aby bolo možné vypočítať či už trvalý posun bloku δ_p [m] alebo limitnú teplotnú zmenu, bolo potrebné stanoviť koeficient tuhosti na pukline K_j [Pa.m⁻¹]. Tento parameter bol stanovený šmykovými skúškami na šmykovom ráme vyrobenom na účely testovania šmykového odporu povrchu zrezaného modelu pri nízkom normálovom napätí. Jeho výsledná hodnota, spolu s výsledkami experimentu, tzv. „sklonového testu“, pomocou ktorého bol určený uhol trenia na pukline, sú uvedené v tabuľke 2. Ďalší neštandardný parameter, ktorý musel byť zisťovaný osobitne bol koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti α [$\text{mm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$]. Jeho stanovenie bolo realizované v dilatometri VLAP04, v prístroji, ktorý predstavuje prototyp vyvinutý v spolupráci medzi autormi príspevku a firmou Applied Precision, s.r.o. Obr. 3 znázorňuje schému dilatometrického zariadenia a detail modelovej zostavy (blok, klin) pripravenej na test. Detailný opis prístroja pre obmedzený priestor neuvádzame, nachádza sa v príspevkoch Vlčeku et al. (2005) a Šimkovej et al. (2012). Napokon bola realizovaná aj skúška na zistenie modulu pružnosti E [Pa] z pomeru medzi napätím a korešpondujúcou pomernou pružnou deformáciou horniny v smere pôsobenia napätia.



Obr. 4. Záznam teplotných meraní v priebehu skúšky na povrchu, uprostred modelu a s komorovou teplotou.

Fig. 4. Records of the temperature measurements at the model surface, center and chamber temperature during the test.



Obr. 5. Porovnanie hodnôt posunov pieskovcového bloku nameraných na fyzikálnych modeloch a vypočítaných na základe analytického koncepčného modelu Pastena (2013) v suchom stave.

Fig. 5. Comparison of plastic displacements of sandstone blocks measured on physical models and calculated based on analytical conceptual model of Pasten (2013) in dry conditions.

3. FYZIKÁLNY ANALÓGOVÝ MODEL

Fyzikálnemu modelovaniu predchádzala príprava horninových vzoriek pieskovca cylindrického tvaru s priemerom 35 mm a dĺžkou 50 mm. Základom modelu bolo vytvorenie systému: klin (v Pastenovom riešení, ako uvádzame vyššie, vклиujúci blok má tvar pravouhlého bloku) – zosúvaný blok – naklonená rovina (Obr. 2), rozrezaním cylindrickej vzorky na tri časti, pričom systém klin a zosúvaný blok bol vytvorený pod uhlom $\chi=15^\circ$. Naklonená rovina pre posun bloku mala sklon $\eta=7^\circ$. Proporcionalita medzi veľkosťou klinov a blokov vyjadrená pomerom L_w/L_b je v rozsahu $0 < L_w/L_b \leq 1$, pri zachovaní

pôvodnej dĺžky vzorky 50 mm v každej zostave. Pri zväčšovaní rozmeru L_w sa dĺžka bloku $L_b = 50 - L_w$. Na základe meniaceho sa pomeru medzi šírkou klinu L_w a šírkou bloku L_b (L_w/L_b) bolo pripravených deväť skúšobných zostáv modelov (Obr. 2c). Rozmery všetkých modelových zostáv sú uvedené v Tab. 1 a ich označenie (R14, R21, ... až R94) korešponduje s pomerom L_w/L_b (rovnako uvedené v Tab. 1). Vlastnosti modelového materiálu sú zosumarizované v Tab. 2. Všetky pripravené modelové zostavy boli testované v termodilatometri VLAPO4, pozostávajúcom z rámu z borosilikátového skla, ktorý bol vložený do kontrolovanej tepelnej komory. Rozsah meranej teploty bol nastavený v rozmedzí -15 až +20°C, pričom jej meranie bolo uskutočnené na povrchu horniny a uprostred referenčnej vzorky, ktorú tvoril rovnaký materiál ako samotný model (Obr. 3).

Meranie posunu blokov v rámci jednotlivých modelových zostáv vplyvom cyklického teplotného zaťaženia (poklesávaním klinu) bolo realizované pomocou LVDT snímača s rozlíšením 1×10^{-4} mm.

Pri tvorbe fyzikálneho modelu sa vychádzalo z predpokladu simulácie sezónnej teplotnej zmeny, čo znamená, že doba expozície bola nastavená dostatočne dlho na to, aby bola dosiahnutá teplotná homogenita v celom modeli. Potvrďuje to aj porovnanie nameraných teplotných kriviek vnútri modelu a na jeho povrchu (Obr. 4). Relatívne malá veľkosť fyzikálneho modelu bola zvolená zámerné na úplné vyrovnanie teploty vo vnútri modelu.

Postup skúšok bol zameraný na určenie dvoch charakteristických hodnôt: veľkosť posunu bloku (B) – δ_p [m] v dôsledku vклиňovania počas jedného teplotného cyklu v suchom stave pri zmene teploty $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ a zistenie limitnej zmeny teploty ΔT_{lim} [°C] potrebnej na vznik posunu bloku v jednotlivých zostavách modelov.

Pri zisťovaní veľkosti posunu bloku (B) – δ_p [m] v jednotlivých zostavách bola v teplotnom intervale +20 až -15°C dodržaná rovnaká rýchlosť zmeny teploty, pričom táto bola nelineárna, s vyššími hodnotami v počiatočných fázach chladenia/ohrievania a pomalšia v priebehu vyrovnávania teploty (Obr. 4). Na zistenie limitnej zmeny teploty ΔT_{lim} [°C] skúšobný postup pozostával z opakujúcich sa teplotných cyklov so zvyšovaním teplotného rozdielu ΔT [°C] po každom cykle o 1°C. Posun bloku (B) bol meraný na konci každého cyklu a skúška bola zastavená po dosiahnutí posunu 1×10^{-3} mm, ktorý bol zvolený ako detekčný limit vzhľadom na presnosť merania. Teplotný rozdiel ΔT [°C] pri ktorom nastal posun s vyššie uvedenou hodnotou bol stanovený ako limitná hodnota ΔT_{lim} [°C], ktorá spôsobuje posun bloku v danej modelovej zostave.

4. POROVNANIE VÝSLEDKOV FYZIKÁLNEHO MODELOVANIA A ANALYTICKÉHO RIEŠENIA V PODMIENKACH ZA SUCHA

Pri analýze vplyvu teploty na posun horninových blokov cyklickým vклиňovaním boli využité metódy, ktoré sa od seba odlišujú nielen v spôsobe realizácie, ale aj fungovania. Fyzikálny model, resp. jeho deväť modelových zostáv bolo navrhnutých tak, aby dokázal reálne nasimulovať skúšaný proces v laboratórnych podmienkach pomocou tzv. analógového modelovania, ktoré rieši problematiku skúšaného javu dodržaním tých istých

Tab. 1. Rozmery modelu a ich geometrická charakteristika.

Tab. 1. Model dimensions and geometry.

Rozmery modelu Model dimensions	R14	R21	R24	R27	R40	R56	R68	R88	R94
$L = L_b + L_w$ [cm]	4.45	4.48	4.49	4.43	4.51	4.51	4.24	4.50	4.54
L_b [cm]	3.90	3.70	3.62	3.48	3.13	2.88	2.52	2.39	2.34
L_w [cm]	0.55	0.78	0.87	0.95	1.38	1.63	1.72	2.12	2.20
L_w/L_b [-]	0.14	0.21	0.24	0.27	0.4	0.56	0.68	0.88	0.94
H [cm]	1.94	1.88	1.94	1.76	1.74	1.81	1.88	1.75	1.84
χ [°]	15	18	17	15	15	13	12	11	17
η [°]	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Tab. 2. Vlastnosti fyzikálneho modelu.

Tab. 2. Physical model properties.

Vstupné parametre modelu Model material properties	
Uhol vnútorného trenia ϕ [°] Joint friction angle	23,7
Objemová hmotnosť ρ [kg/m ³] Mass density	2410
Koeficient lineárnej teplotnej rozťažnosti α [°C ⁻¹] Thermal expansion coefficient	1,09x10 ⁻⁵
Teplotná vodivosť χ [m ² s ⁻¹] Thermal diffusivity	8,44x10 ⁻⁷
Špecifické teplo C_p [J.Kg ⁻¹ °C ⁻¹] Specific heat	1,01x10 ³
Tepelná vodivosť λ [Wm ⁻¹ °C ⁻¹] Thermal conductivity	2,09
Modul pružnosti E [GPa] Young's modulus	8,2

zákonitostí, aké reálne existujú v prírodných podmienkach, avšak v zmenšenej mierke (Denkhaus, 1970).

K dôležitému faktoru, ktorý rozhoduje o veľkosti trvalého posunu bloku, patrí rozdielny pomer klinov/blokov (L_w/L_b), pomocou ktorého možno dôjsť k jednoznačnému záveru, že priebeh nameranej a vypočítanej teplotnej deformácie má podobný trend, okrem rozdielov v hodnotách posunu posledných dvoch vzoriek R88 a R94 (Obr. 5). Na základe realizovaných experimentov a z nich rezultujúcich grafov je možné potvrdiť existenciu vzniku svahovej deformácie vplyvom sezónnych teplotných zmien.

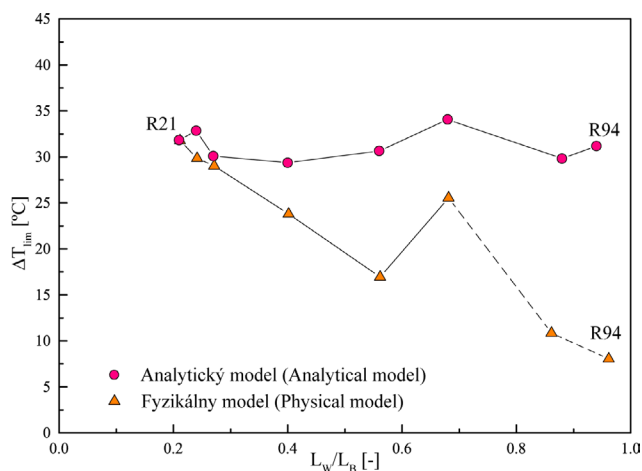
Ak je pozornosť upriamená na analýzu limitnej teplotnej zmeny ΔT_{lim} [°C], ktorá je chápaná ako hraničná teplota, pri ktorej boli jednotlivé varianty fyzikálneho a analytického modelu v stabilnej pozícii, resp. po jej dosiahnutí nastal posun, tak je možné konštatovať, že hodnoty ΔT_{lim} boli veľmi podobné v modeloch s malým klinom L_w oproti veľkosti bloku L_b , avšak s narastajúcou veľkosťou klinu L_w sa hodnoty ΔT_{lim} v prípade fyzikálneho modelu znižovali (Obr. 6).

Nejednoznačný výsledok limitnej teplotnej zmeny, prezentovaný v článku, by mohol byť prípadne pripisovaný nelineárnemu

trendu koeficientu šmykovej tuhosti na pukline K_p , ktorého odhad bol založený na testovaní variantu modelu s veľkosťou odsúvaného bloku 3,70 cm (model R21). Existuje tu však reálny predpoklad, že daný jav môže súvisieť aj s možnosťou, že kontakt klin – skalný masív bol vo fyzikálnych modeloch reprezentovaný kontaktom pieskovca so sklenným držiakom vzorky, charakterizovaným menším uhlom vnútorného trenia ako predpokladalo analytické riešenie.

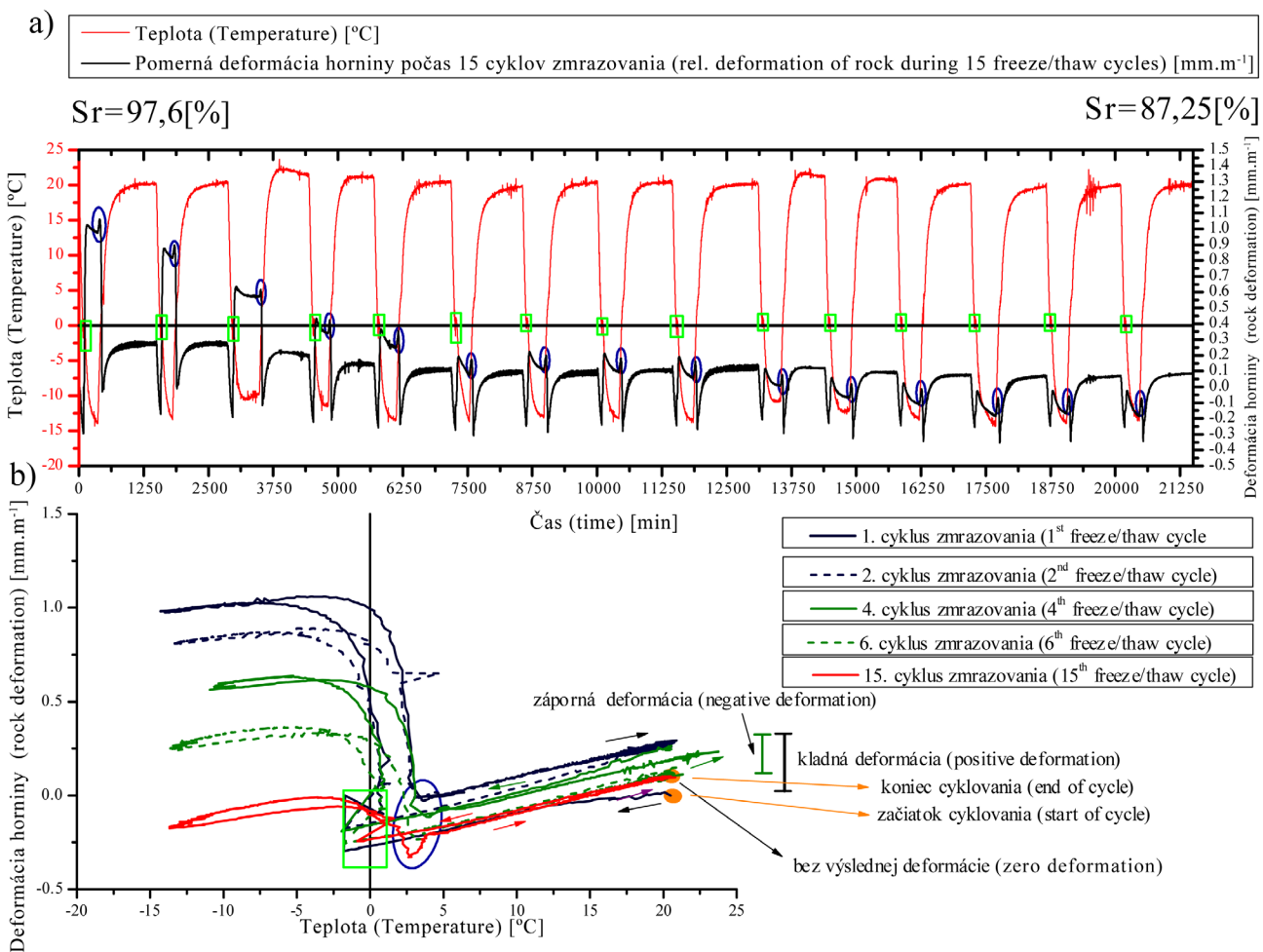
5. TEPLTNÁ DEFORMÁCIA HORNINOVÉHO MATERIÁLU V NASÝTENOM STAVE

Po komparácii fyzikálneho modelu s analytickým riešením v suchom stave bol fyzikálny model pri rovnakej teplotnej zmene $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ podrobený simulácii podmienok s určitým stupňom nasýtenia. Cieľom zmeny fyzikálnych podmienok bolo zistiť vplyv obsahu vody na veľkosť zmeny teplotnej deformácie horninového materiálu, ktorá ovplyvňuje posun bloku (B) v zostavených fyzikálnych modeloch.



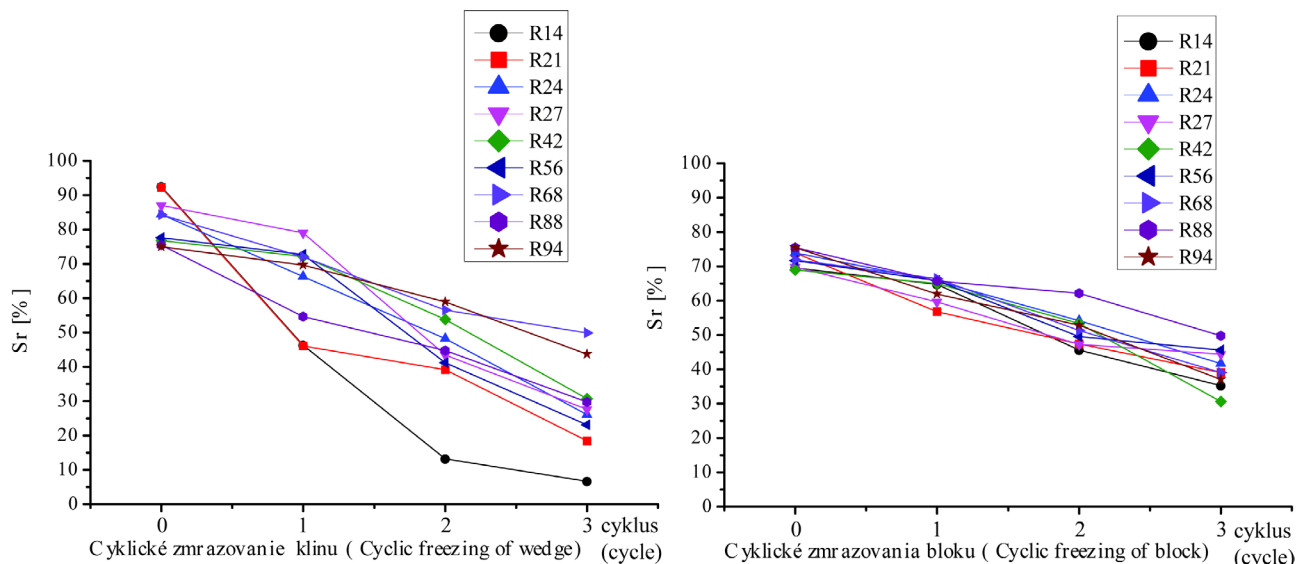
Obr. 6. Porovnanie limitných zmien teploty ΔT_{lim} modelu, od ktorých dochádza ku vzniku posunu pieskovcových blokov, meraných na fyzikálnych modeloch a vypočítaných na základe analytického konceptného modelu Pastena (2013) v suchom stave.

Fig. 6. Comparison of limit temperature changes ΔT_{lim} the model can withstand without observing plastic deformations of sandstone blocks measured on physical models and calculated based on analytical conceptual model of Pasten (2013) in dry conditions.



Obr. 7. Grafický priebeh deformácie vzorky pieskovca počas 15 cyklov zmrazovania s vyznačením miesta, kde dochádza ku kryštalizácii ľadu (obdĺžniky) a miesta kde dochádza k topeniu ľadu – elipsy (a), skúmaná vzorka mala na začiatku stupeň nasýtenia $S_r = 97,6\%$ a na konci experimentu jej stupeň nasýtenia bol $87,25\%$. Pri postupnej strate stupňa nasýtenia horninovej vzorky boli namerané tri typy deformácie po každom cykle zmrazovania: kladná deformácia, záporná deformácia a nulová deformácia (b)

Fig. 7. Graph of sandstone sample deformation during 15 freeze/thaw cycles with highlighted place where ice crystallization occurs (rectangles) and places where the ice melted – ellipses (a), the tested sample had the degree of saturation $S_r = 97.6\%$ at the beginning and 87.25% at the end of the experiment. Three types of deformation were measured after each freezing cycle during gradual loss of rock saturation degree: positive deformation, negative deformation and zero deformation (b)



Obr. 8. Grafický záznam zo skúšky dehydrácie (zmena stupňa nasýtenia – S_r) počas troch cyklických zmien teploty jednotlivých zostáv modelu, kde a) vyjadruje záznam poklesu stupňa nasýtenia klinu a b) vyjadruje záznam poklesu stupňa nasýtenia blokov modelu.

Fig. 8. Graphic record of the dehydration (change in degree of saturation – S_r) test during the three cyclic temperature changes of individual model variations, where a) expresses record of decrease in the saturation degree of the wedge and b) record of decrease in the saturation degree of model blocks.

Na Obr. 7a, b je vyjadrený 15-dňový cyklus zmrazovania vzorky horninového materiálu s počiatočným stupňom nasýtenia $S_r = 97,6\%$. Z grafického vyjadrenia priebehu teplotnej deformácie horninovej vzorky je možné rozpoznať tri typy výslednej deformácie (Obr. 7b) závislej od stupňa nasýtenia horniny a určovanej po každom zmrazovacom cykle (kladná deformácia, záporná deformácia a nulová deformácia). Stupeň nasýtenia horniny dokáže nielenže ovplyvniť výslednú deformáciu horniny, ale od jeho veľkosti závisí aj priebeh deformácie počas cyklického zmrazovania. Vzhľadom na to, že skúmaný proces bol realizovaný kontinuálne, nie je možné určiť presný stupeň nasýtenia zodpovedajúci vzniknutej výslednej teplotnej deformácii po každom cykle, je však možné predpokladať, že dochádzalo k rovnomernej strate stupňa nasýtenia v skúmanej horninovej vzorke.

Pri dlhodobej analýze nasýteného horninového materiálu v podmienkach cyklickej teplotnej zmeny je do značnej miery viditeľný vplyv dehydratačného procesu na formovanie kryštalizačných tlakov ľadu v póroch horniny. Uvedený jav je graficky vyjadrený na Obr. 7, kde je možné identifikovať, kedy nastáva kryštalizácia ľadu a uvoľnenie skupenského tepla (zelené obdĺžniky) alebo nastane opačný proces, a to spotreba tepla a zmena ľadových kryštálov na vodu (modré elipsy). Pri procese zmeny vody na ľad alebo opačne, ako vidno na Obr. 7b, dochádza k výraznej expanzii vzorky počas každého zmrazovacieho cyklu.

Po analýze horninového materiálu bola zisťovaná zmena stupňa nasýtenia S_r [%] všetkých 9 modelových zostáv počas 3 cyklov zmrazovania (Obr. 8a, b). Výsledky experimentov potvrdili preukázateľnú závislosť medzi veľkosťou klinu/bloku (L_w/L_b) a veľkosťou stupňa nasýtenia. Klin dosiahne zhruba o 10 % vyšší stupeň nasýtenia za rovnaký čas ako blok. V neposlednom rade experiment potvrdzuje aj opačnú závislosť, že klin sa rýchlejšie vysušuje.

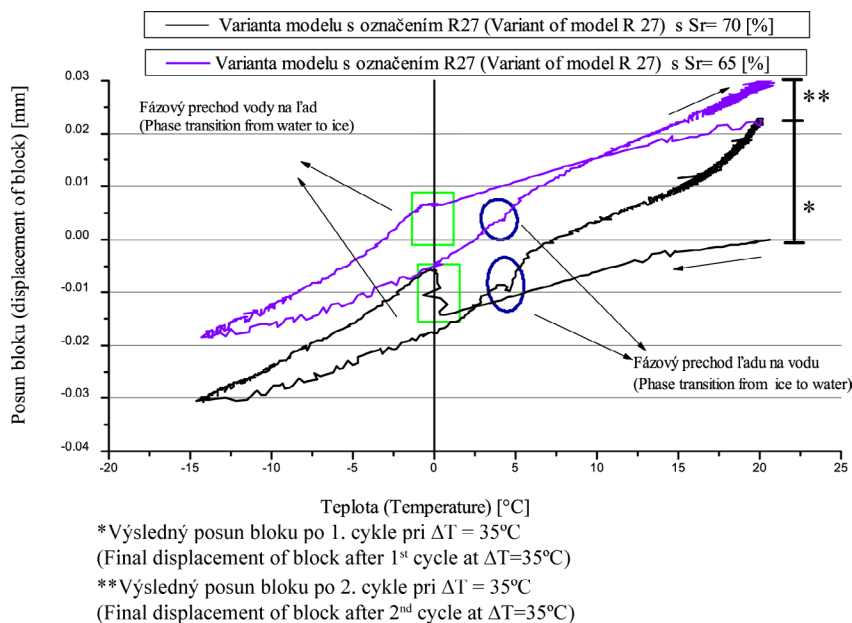
Významnú pozornosť sme upriamili na analýzu fyzikálneho modelu v nasýtenom stave (Obr. 9), pričom počas experimentálnych simulácií nebolo možné skúmaný mechanizmus overiť na všetkých 9 zostavách modelu. Dôvodom bolo oslabenie predurčených šmykových plôch vodou, čo spôsobovalo samovoľné posuny blokov (išlo o pomery klin/blok s označením R88 a R94).

Po zhodnotení nameraných výsledkov bolo možné odvodiť nasledujúce predbežné závery:

- ▶ jednotlivé pomery klinov a blokov (L_w/L_b) nedosiahli po týždennom nasycovaní taký stupeň nasýtenia, ktorým by mohla výsledná kladná alebo záporná deformácia vznikajúca po jednotlivých cykloch ovplyvniť ich posun po predurčenej šmykovej ploche;
- ▶ na posun blokov v jednotlivých zostavách fyzikálneho modelu najviac vplýval proces kryštalizácie ľadu, kedy dochádzalo k postupnej kontrakcii horniny s poklesnutím klinu a následnej rýchlej expanzii, čo spôsobilo posun bloku už počas zmrazovania;
- ▶ pri procese rozmrazovania dochádzalo k expanzii bloku a klinu, rezultujúceho do rovnomerného odsúvania bloku B, pričom od bodu topenia ľadu došlo k zrýchleniu posunu bloku B.

6. ZÁVER

Pri formulovaní vedeckého cieľu tohto príspevku sa autori zamerali na overenie Pastenom (2013) vypracovanej matematickej analýzy, ktorá rieši problematiku kvantifikácie posunu skalných blokov v zjednodušenej štruktúrno-textúrnej konfigurácii vplyvom teplotných oscilácií pomocou fyzikálneho analógového modelu pripraveného v deviatich modelových zostavách vymedzených na základe pomeru veľkosti rozmerových parametrov



Obr. 9. Grafický záznam z priebehu zosúvania blokov vybraného modelu R27 v dvoch po sebe idúcich cykloch zmravovania, s označením miesta kryštalizácie ľadu (obdĺžniky) a miesta, kde dochádza k jeho topeniu (elipsy).

Fig. 9. Graphic recording of block sliding process of the selected model variations with $S_r = 27\%$ in two successive freezing cycles, with highlighted places of the ice crystallization process (rectangles) and its melting (ellipses).

blokov L_w a L_b . Všetky experimenty boli realizované na jednom horninovom materiáli, a to pieskovi s homogénnou štruktúrou.

Na základe série experimentov sme zistili, že pri $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ skutočne nastal posun bloku (B), pričom pri rôznych modelových zostavách dosahoval hodnoty v rozmedzí od 0,001 do 0,013 mm (Obr. 5).

Ďalší rad cyklických skúšok bol vykonaný za účelom stanovenia limitnej zmeny teploty $\Delta T_{\text{lim}} [^\circ\text{C}]$, pri ktorej pre rôzne pomery klin/blok (L_w/L_b) dochádza k trvalému posunu bloku. Pri dodržaní rovnakých podmienok sme zistili, že $\Delta T_{\text{lim}} [^\circ\text{C}]$, ktorá spôsobuje trvalú teplotnú (plastickú) deformáciu, čiže posun bloku mechanizmom vkladovania je napr. pre pomer klin/blok s označením R94 menšia ako 6°C . Naše experimentálne získané výsledky fyzikálneho modelovania podporujú analytické riešenie Pastena (2013), ako aj in situ merania Bakun-Mazora et al. (2013) v Masade v Izraeli.

Tým, že naše modelové riešenie bolo podrobené aj testovaniu v nasýtených podmienkach je ho možné porovnať s už existujúcimi výsledkami analyzovaného modelu v suchých podmienkach. Existuje predpoklad, že pre rôzne modelové zostavy simulujúce nasýtené podmienky sa zvýši hodnota posunu bloku približne o jeden rád, pričom priebeh grafu posunu bloku pri $\Delta T = 35^\circ\text{C}$ sa v rámci jednotlivých modelových zostáv zachová.

Podakovanie: Táto práca bola podporená Agentúrou pre vedu a výskum v rámci zmluvy č. APVV-0641-10, ďalej na základe zmluvy č. APVV-0330-10 a APVV SK-CN-0017-12. Autori touto cestou chcú poďakovať doc. Ing. RNDr. Milanovi Slivovskému, CSc. za podnetné rady a pripomienky, ktoré prispeli k kvalitatívnemu predloženému príspevku.

Literatúra

Bakun-Mazor D., Hatzor Y.H., Glaser S.D. & Santamarina J.C., 2013: Thermally vs. Seismically induced block displacements in Masada rock slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 61, 196–211.

Barton, N., V. Choubey, 1977: The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 10, 1, 1–54.

Brček M., 2009: Vplyv teplotných cyklov na zvetrávanie hornín. PhD thesis. Bratislava, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského v Bratislave, 127 p.

Brček M., Varilová 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., 1986: *Conduction of Heat in Solids*, Oxford University Press, New York, NY, 215 p.

Davison C.H., 1888: Note on the movement of scree-material. *Quarterly Journal of the Geological Society of London*, 44, 1–4, 232–238.

Denkhaus, H.G., 1970: Discussion Comments. Proc. Symp. Planning Open Pit Mines. Johannesburg.

Gischig V., Moore J., Evans K., Amann F. & Loew S., 2011^a: Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation. 1. Conceptual study of a simplified slope. *J. Geophys. Res.* 116(F4): F04010.

Gischig V., Moore J., Evans K., Amann F. & Loew S., 2011^b: Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation 2. The Randa rock slope instability. *J. Geophys. Res.* 116(F4): F04011.

Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Senfaute G. & Pigué J.P., 2005: Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabres slope (France). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42, 3, 331–349.

Jezný M., Vlčko J. & Hvozďara M., 2007: Teplota ako faktor štruktúrneho oslabenia horninových masívov. *Geotechnika*, 10, 3, 8–15.

Krus M., 1995: Feuchttransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken. Diss Univ Stuttgart.

Künzel H.M. & Krus M., 1995: Beurteilung des Feuchteverhaltens von Natursteinfassaden durch Kombination von rechnerischen und experimentellen Untersuchungsmethoden. In: Intern Z Bauinstandsetzen 1, 5–20.

Mirwald P., 1997: Physikalische Eigenschaften der Gesteine. In: Berufsbildungswerk des Steinmetz- und Bildhauerhandwerks e.V. (Eds.) Ebner Verlag, Ulm.

- Mufundirwa A., Fujii Y., Kodama N. & Kodama J., 2011: Analysis of natural rock slope deformations under temperature variation: A case from a cool temperate region in Japan. *Cold Reg Sci Tech.* 65,488–500.
- Pasten C., 2013: Geomaterials Subjected To Repetitive Loading: Implications On Energy Systems. PhD thesis. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA.
- Redlich K., Terzaghi K. & Kampe R., 1929: *Ingenieurgeologie*. Springer, Wien, 708 p.
- Snethlage R., 1984: Steinkonservierung, Forschungsprogramm des Zentral-labors für Denkmalpflege 1979–1983. Bericht für die Stiftung Volkswagenwerk. Arbeitsheft Bayer. Landesamt Denkmalpflege 22. Lipp Verlag, Munich.
- Šimková I., Greif V., Kompaníková Z. & Brček M., 2012: Štúdium zmien termofyzikálnych vlastností prírodného kameňa v podmienkach cyklického zmrazovania. *Acta Geologica Slovaca*, 4, 1, 23–30.
- Vargas J. E., Velloso R., Chávez L., Gusmão L. & Amaral C., 2013: On the effect of thermally induced stresses in failures of some rock slopes in Rio de Janeiro Brazil. *Rock Mech Rock Eng.* 46, 123–34.
- Vlčko J., Jezný 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, 1–74.
- 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, 1727–1740.
- Watson A.D., Moore D.P. & Stewart T.W., 2004: Temperature influence on rock slope movements at Checkerboard Creek. In: Lacerda W., Ehrlich M., Fontoura S. & Amaral C.P. (Eds): *International Symposium on Landslides (ISL)*, Rio de Janeiro, 1293–1298.
- Weiss G., 1992: Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter. *Münchener Geowiss Abh B 9*, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, Munich.
- Záruba Q., 1932: O stabilite svahů nad povltavskou silnicí u Štěchovic a Vraného. *Časopis československých inženýrů Technický obzor*. 16.

investigation was carried out on samples of rock material to understand the behavior of rocks in saturated condition during the 15 freeze/thaw cycles. Results of physical modeling in saturated conditions revealed the amplitudes of the plastic deformations increased in saturated conditions approximately tenfold.

Summary: A set of physical models was prepared to study thermal wedging mechanism in the thermal dilatometer where the displacements were measured using LVDT sensors for blocks with different block/wedge ratios, while changing the temperature in a controlled manner. Together 9 physical models of sandstone blocks were tested for annual temperature change of $\Delta T=35^{\circ}\text{C}$ and measuring of permanent displacements of a block in order to confirm the existence of this type of failure mechanism. Further series of cyclic tests were performed on all 9 physical models in order to determine the threshold temperature change ΔT_{lim} at which the plastic deformation for different block/wedge ratios occurs.

The results confirmed the existence of plastic deformation resulting from a cyclic wedging mechanism for block/wedge ratio 0.4 and total model size of 50mm reaching permanent displacement of 2.23×10^{-3} mm for a block resting on an inclined plane with slope of 7° . For the same conditions a temperature change which caused the permanent displacement of the block by wedging mechanism was found out to be as low as 6°C for block/wedge ratio 0.94. The results of physical model support the proposed analytical solution by Pasten (2013) and measurements of Bakun-Mazor et al., (2013) at Masada site in Israel. Further