

# Hodnotenie trvanlivosti prírodného a konglomerovaného kameňa podľa technických noriem

Ivana Šimková & Tatiana Durmeková

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

## AGEOS Natural and agglomerated stone durability assessment according to technical standards

**Abstract:** The assessment of rock behaviour and durability plays an important role in the use of rocks and similar materials for all building purposes. Durability is a complex term, therefore the paper deals with the terminology and aspects related to the evaluation and prediction possibilities of stone durability. Technical standards offer some laboratory procedures suitable for stone durability assessment. The paper presents the results of the application of some standard laboratory methods on select types of natural and agglomerated stone, from the physical properties determination and durability assessment point of view. On the basis of defined criteria of physical properties, such as the value of open porosity, uniaxial compressive strength and water absorption, was predicted the behaviour of selected stones against ageing and weathering. Results of the realised laboratory weathering tests such as the determination of resistance to frost and salt crystallisation, determination of resistance to ageing by SO<sub>2</sub> action in the presence of humidity, and determination of resistance to thermal shock, confirmed and verified rock behaviour conditional on stone genesis, mineral composition and structural characteristics.

**Key words:** durability, stone decay, weathering simulation, natural and agglomerated stone

### 1. ÚVOD

Široké používanie prírodného kameňa v stavebníctve je spojené s určovaním jeho základných charakteristík, súčasťou ktorých je aj stanovenie odolnosti proti pôsobiacim klimatickým činiteľom, teda stanovenie jeho trvanlivosti, tzn. časového obdobia, počas ktorého si použitý stavebný materiál plnohodnotne a bezpečne plní svoju funkciu, prípadne zachováva požadovanú estetickú hodnotu.

Metódy na určenie časového obdobia garancie zachovania funkčnosti alebo vzhľadu použitého prírodného i konglomerovaného kameňa sa neustále rozvíjajú. Prognóza životnosti kameňa zahŕňa nielen správnu identifikáciu faktorov, ktoré ju ovplyvňujú, ale aj sledovanie intenzity vplyvov týchto faktorov, s cieľom následného odstránenia alebo zmiernenia ich pôsobenia. Určité indicie správania stavebných materiálov sú dané ich počiatočným pôvodom a postgenetickým vývojom. Prírodný kameň má predispozíciu k určitému správaniu vplyvom pôsobiacich zvetrávacích činiteľov.

Možnosť stanovenia trvanlivosti prírodných kameňov je čiastočne metodicky zachytená v technických normách bez zohľadnenia poznania ich genézy, minerálneho zloženia a štruktúrno-textúrnych charakteristík. S implementáciou európskych noriem do slovenskej normovej sústavy pribudli mnohé nové postupy na prehľadnejšiu charakteristiku odolnosti prírodného i konglomerovaného kameňa. Simulácia zvetrávacích procesov v laboratórnych podmienkach je nedokonalá, hlavne z dôvo-

du oddeleného pôsobenia jednotlivých faktorov na horniny. Napriek tomu laboratórne metódy môžu poslúžiť ako jeden zo spôsobov hodnotenia trvanlivosti. Pre tento dôvod sú v článku zhodnotené niektoré štandardné metódy na stanovenie odolnosti prírodného a konglomerovaného kameňa na príkladoch niektorých hornín zo slovenských lokalít.

Dôvodom začlenenia priemyselne vyrobených materiálov imitujúcich prírodný kameň do výskumu odolnosti je ich súčasné rozsiahle používanie v stavebníctve. Svojím zložením, štruktúrou a vlastnosťami sú analogické prírodným kameňom, preto sa často označujú ako umelé kamene.

### 2. ASPEKTY HODNOTENIA TRVANLIVOSTI PRÍRODNÉHO KAMEŇA

Termín trvanlivosť horniny je synonymický s termínom odolnosť, ktorá vyjadruje schopnosť horniny odolávať pôsobeniu rôznych činiteľov (napr. mechanických, chemických, klimatických). Odolnosť horniny možno posúdiť na základe niektorých technických vlastností, akými sú napr. mrazuvzdornosť alebo rozpadavosť (Petro et al., 2008). Trvanlivosť stavebných materiálov možno vyjadriť aj ako schopnosť odolávať prostrediu, v ktorom sú situované, bez porušenia alebo bez podstatného zníženia mechanických vlastností počas celého obdobia predpokladanej funkcie. Čím je toto obdobie dlhšie a čím nepriaznivejším škodlivým vplyvom materiál v kon-

Tab. 1. Prehľad skúšobných metód stanovujúcich odolnosť (trvanlivosť) prírodného a umelého kameňa podľa technických noriem.

Tab. 1. Review of testing methods on determination of the resistance (durability) for natural and agglomerated stone according to technical standards.

Skúšobné metódy na zistenie odolnosti proti zvetrávacím činiteľom	
prírodný kameň	konglomerovaný kameň
STN EN 12370: 2002 Stanovenie odolnosti proti kryštalizácii solí	STN EN 14617-5: 2005 Stanovenie odolnosti proti zmrazovaniu a rozmrazovaniu
STN EN 12371: 2003 Stanovenie mrazuvzdornosti	STN EN 14617-6: 2005 Stanovenie odolnosti proti tepelnému šoku
STN EN 13919: 2003 Stanovenie odolnosti proti starnutiu pôsobením SO <sub>2</sub> za prítomnosti vlhkosti	STN EN 14617-10: 2005 Stanovenie odolnosti proti chemikáliám
STN EN 14066: 2003 Stanovenie odolnosti proti starnutiu pôsobením náhlej zmeny teploty	pr EN 14617-7 Stanovenie starnutia
STN EN 14147: 2004 Stanovenie odolnosti proti starnutiu soľnou hmlou	pr EN 14617-17 Stanovenie odolnosti proti biologickým činiteľom

pr = norma v príprave

krétnej konštrukcii odoláva, tým je trvanlivejší (Svoboda et al., 2005).

Podľa Inkpena et al. (2004) môže byť zjednodušene trvanlivosť chápaná ako výsledok interakcie materiálu a okolitého prostredia, s dôrazom na to, že trvanlivosť nie je statická veličina, ale postupne sa prispôbuje a mení v závislosti od stavu horniny. Súvisí s charakterom a rýchlosťou zvetrávacích procesov, ktorým sú horniny vystavované a s tvorbou sekundárnych zvetrávacích produktov.

Všeobecne zaužívaná definícia z prostredia architektúry a staviteľstva charakterizuje trvanlivosť ako odolnosť horniny proti zmene jej fyzikálnych, mechanických a estetických vlastností v čase. Táto definícia obsahuje fyzikálnu podstatu so socio-kultúrnym faktorom. V obidvoch prípadoch ide o napätostnú zmenu v čase. Dôležitú úlohu pritom zohrávajú vonkajšie podmienky prostredia ako zdroj zvetrávacích činiteľov a dosah zvetrávacích procesov. V prípade zmeny okolitého prostredia sa menia fyzikálne vlastnosti, a to spôsobí zmenu trvanlivosti (Inkpen et al., 2004).

Hornina, na ktorú pôsobia zvetrávacie činitele, sa určitým spôsobom po istom časovom období mení, čo závisí od súčinnosti vnútorných a vonkajších faktorov. Medzi vnútorné, tzv. genetické faktory, patrí: pôvod, minerálne zloženie, štruktúrno-textúrne charakteristiky, parametre a štruktúra pórovej siete. Medzi najčastejšie vonkajšie faktory patrí: atmosférická vlhkosť, kapilárna vlhkosť, zmeny teploty, pôsobenie mrazu a rôznych vodorozpusťných solí, znečistenosť ovzdušia, pôsobenie biologických a antropogénnych činiteľov atď.

Schopnosť horniny alebo jej minerálnych fáz prispôbiť sa novým podmienkam, rozdielných od podmienok vzniku, závisí aj od toho, či je hornina v prirodzenom stave alebo upravená rôznymi technológiami.

Možnosti prognózovania trvanlivosti súvisia s rôznymi metódami, či už je to monitoring in situ, spojený s diagnostikou porúch alebo laboratórny výskum spojený so simuláciou vonkajších procesov a sledovaním zmien po ich skončení. Simulovanie zvetrávacích procesov v laboratóriu špecifikuje odolnosť hornín proti izolovaným procesom v definovaných podmienkach, v čom spočíva nedokonalosť oproti kombinovanému a komplexnému pôsobeniu zvetrávacích procesov v prírodnom prostredí. Trendom je snaha kombinovať jednotlivé skúšobné postupy, a priblížiť sa tak ku skutočným podmienkam (Přikryl, 2008).

Laboratórne metódy, na základe ktorých je možné hodnotiť trvanlivosť prírodných a konglomerovaných kameňov, môžeme rozdeliť na nepriame a priame (deštruktívne, degradačné). Medzi nepriame metódy zaraďujeme postupy na zisťovanie fyzikálnych vlastností, pretože už poznanie základných fyzikálnych vlastností hornín (hodnota objemovej hmotnosti, celkovej a otvorenej pórovitosti, hmotnostnej nasiakavosti, nasiakavosti kapilaritou, pevnosti v tlaku, pevnosti v ohybe, súčiniteľa mrazuvzdornosti, rýchlosti šírenia ultrazvukových vln, a i.) je indíciou pre hodnotenie ich trvanlivosti. K priamym metódam patria laboratórne skúšobné postupy smerujúce k hodnoteniu odolnosti proti niektorým zvetrávacím činiteľom, ktoré napodobňujú vplyv niektorého nepriaznivého faktora. Zohľadnené

Tab. 2. Fyzikálne vlastnosti študovaných typov kameňa.

Tab. 2. Physical properties of studied stone types.

Litologický typ	Lokalita	Objemová hmotnosť	Celková pórovitosť	Hmotnostná nasiakavosť	Súčiniteľ nasiakavosti	Pevnosť v prostom tlaku
		(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(%)	(g/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )	(MPa)
Ryolit	Hliník nad Hronom	2,202	15,9	4,48	53,24	131,8
Travertín	Spišské Podhradie	2,435	8,8	4,09	7,29	51
	Hertník	2,456	8,6	1,86	14,4	98,7
Pieskovec	Králiky	2,064	25,6	7,38	97,51	26
	Livovská Huta	2,471	7,7	1,63	7,55	113,8
Umelý kameň	Danavorava	2,026	25,5	8,69	54,84	25,8
	Vaspo	1,848	29,6	8,95	34,28	22,4

sú v technických normách, pre prírodný aj pre konglomerovaný kameň, ktorých prehľad uvádzame v tab.1.

### 3. METODIKA VÝSKUMU

Pre simuláciu vybraných prírodných procesov v laboratórnych podmienkach podľa technických noriem boli vybrané litologické typy, u ktorých bol predpoklad relatívne nízkej odolnosti proti zvetrávaniu, ale zároveň ich použitie je v dostatočnej miere rozšírené v stavebníctve, či už ako dekoračný alebo stavebný kameň.

Odolnosť proti zvetrávaniu bola skúmaná na vzorkách: ryolit z Hliníka nad Hronom (stredoslovenské neovulkanity – vrchný sarmat), travertín zo Spišského Podhradia (pliocénno-holocénne sladkovodné vápence) a 3 typy paleogénnych pieskovec – z lomu Králiky (stredné Slovensko, centrálnokarpatský paleogén), z Livovskej Huty a Hertníka (východné Slovensko, strihovské vrstvy flyšového pásma) (Holzer et al., 2009). Dva typy konglomerovaného kameňa boli získané od slovenských výrobcov – z firiem VASPO® a DANAV ORAVA, s. r.o., Novot'.

Všetky vzorky použité na výskum mali tvar valčeka jednotnej veľkosti (priemer 35 mm, výška 50 mm). Rozmery skúšobných teliesok nezodpovedali vždy rozmerom požadovaným v skúšobných normách. Pre všetky študované litologické a priemyselné vyrobené typy bola zvolená univerzálna veľkosť. Celkovo sa zhotovilo 21 skúšobných teliesok z každého typu kameňa.

Ďalším krokom bola realizácia laboratórnych skúšok na zistenie fyzikálnych vlastností podľa normových skúšobných postupov. Stanovené boli nasledujúce vlastnosti: merná hmotnosť, objemová hmotnosť, celková a otvorená pórovitosť (STN EN 1936), hmotnostná nasiakavosť (STN EN 13755), kapilárna na-

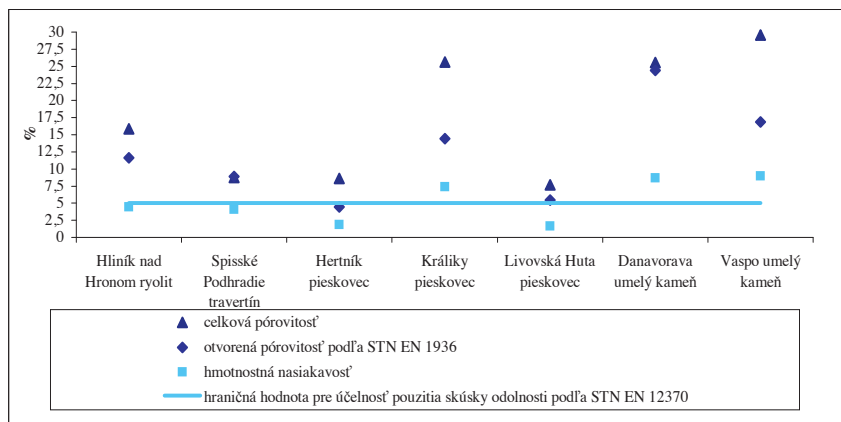
siakavosť (STN EN 1925) a pevnosť v jednoosom (prostom) tlaku (STN EN 1926).

Následne boli realizované skúšky trvanlivosti podľa metodiky v slovenských technických normách. Použité skúšky sú stručne opísané v nasledujúcom texte.

Skúšobná metóda na stanovenie odolnosti proti kryštalizácii solí podľa normy STN EN 12370 je určená pre horniny s otvorenou pórovitosťou väčšou ako 5 %, meranou podľa STN EN 1936. Podstata skúšky spočíva vo vysušení vzorky do ustálenej hmotnosti a ponorení do 14 % roztoku dekahydrátu síranu sodného (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> · 10 H<sub>2</sub>O), a to na 2 hod. pri izbovej teplote, t.j. (20 ± 0,5) °C a následnom vysušení v sušičke (po dobu 16 hod.) a vychladnutí na izbovú teplotu (2 hod.). Tento cyklus je opakovaný 15-krát a po jeho ukončení je stanovená zmena hmotnosti vzoriek v percentách.

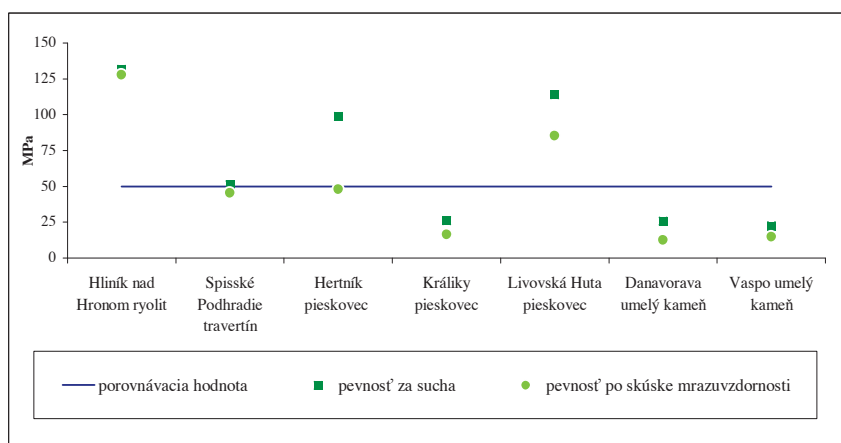
Metodický postup na stanovenie odolnosti proti mrazu (STN EN 12371) je zostavený z cyklov zmrazovania na vzduchu v zmrazovacom boxe pri teplote nižšej ako -12 °C (min 6 hod.) a následného rozmrazovania vo vode pri izbovej teplote (6 hod.). Skúška pokračuje do času, kým sa skúšobné telesá nerozpadnú alebo do určitého stanoveného počtu cyklov. Výsledkom skúšky je vyjadrenie straty hmotnosti vzoriek po určitom počte cyklov alebo zmena pevnosti, vyjadrená súčiniteľom mrazuvzdornosti.

Podstatou skúšky na stanovenie odolnosti proti starnutiu pôsobením SO<sub>2</sub> za prítomnosti vlhkosti podľa normy STN EN 13919 je zistenie odolnosti kameňa vystaveného kombinovaným účinkom teploty, vlhkosti a oxidu siričitého (SO<sub>2</sub>). Realizácia skúšky pozostáva z prípravy roztoku kyseliny siričitej (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) a vody v dvoch koncentráciách: roztok A (pomer kyseliny k vode je 500 ml : 150 ml), roztok B (pomer kyseliny k vode je 150 ml : 500 ml) a následného vloženia vodou nasýtených vzoriek hrúb-



Obr. 1. Porovnanie celkovej pórovitosti, otvorenej pórovitosti a hmotnostnej nasiakavosti.

Fig. 1. Comparison of the total porosity, open porosity and water absorption.



Obr. 2. Pevnosť v jednoosom tlaku vysušených vzoriek a vzoriek po skúške mrazuvzdornosti.

Fig. 2. The uniaxial compressive strength of dried samples and samples after the freeze/thaw test.

ky približne 10 mm do vhodných, tesne uzatvárateľných nádob predpísaného objemu na mriežkovú podložku vo výške približne 100 mm nad hladinu roztokov. Relatívna vlhkosť, ktorú dokážu udržať dané koncentrácie roztokov kyseliny siričitej, nie je špecifikovaná. Po 21 dňoch sa vzorky vyberú a vizuálne sa vyhodnotí premena (alterácia) skúšobných teliesok (charakter farebných zmien, povrchové výkvetvy solí, korózia, napučívanie, prítomnosť trhlin, odlupovanie z povrchu a pod.) a zistí sa zmena hmotnosti vzoriek.

Poslednou realizovanou skúškou bola skúška na stanovenie odolnosti proti starnutiu pôsobením náhlej zmeny teploty podľa STN EN 14066 platná pre prírodný kameň alebo zisťovanie odolnosti proti tepelnému šoku podľa normy STN EN 14617-6 pre konglomerovaný kameň. Podstatou oboch skúšok je opakované zahrievanie vzoriek na stanovenú teplotu (70 °C alebo 110 °C) a následné prudké ochladenie vo vodnom kúpeli s teplotou 15 °C. Skúška pozostáva z 20 cyklov. Výsledkom skúšky je vizuálne zhodnotenie vzoriek a zistenie zmeny hmotnosti.

## 4. VÝSLEDKY VÝSKUMU

### 4.1. Fyzikálne vlastnosti hodnotených kameňov

Sledované typy prírodných i umelých kameňov sa od seba odlišujú svojimi fyzikálnymi vlastnosťami, čo je predpokladom

pôsobenia diferencovaných účinkov zvetrávania. Stanovené fyzikálne vlastnosti sú zosumarizované v tab. 2. Predpokladom vysokej odolnosti proti zvetrávaniu je vysoká pevnosť súdržných väzieb medzi stavebnými časticami, odrážajúca sa v hodnote pevnosti v tlaku, ďalej nízka otvorená (efektívna) pórovitosť, a s ňou súvisiaca nízka nasiakavosť, ako aj vhodná štruktúra pórov bez prítomnosti mikropórov.

Celková pórovitosť, otvorená pórovitosť a hmotnostná nasiakavosť študovaných vzoriek je graficky znázornená na obr. 1. Takmer všetky vzorky majú otvorenú pórovitosť vyššiu ako 5 %, čo je normou definovaná hraničná hodnota pre účelnosť použitia skúšky odolnosti proti kryštalizácii solí (STN EN 12370).

Z hľadiska pevnosti v jednoosom tlaku možno za najpevnejší horninový typ zo študovaných materiálov označiť ryolit (Obr. 2), nasledujú rovnako pevné pieskovce z Livovskej Huty a z Hertníka. Z prírodných materiálov je najslabší pieskovec z lomu Králiky, používaný najmä pre sochárske účely. Pevnosťou je identický s hodnotenými umelými kameňmi. Porovnávacou hodnotou vyznačenou na obr. 2 je línia na úrovni 50 MPa, ktorá je konvenčnou hranicou medzi horninami skalnými (horniny s vysokou pevnosťou) a poloskalnými (horniny so strednou alebo nízkou pevnosťou).

Doplňujúcim údajom k hmotnostnej nasiakavosti je súčiniteľ kapilárnej nasiakavosti (vzlínivosti), ktorý odráža prítomnosť kapilárnych pórov v hodnotených materiáloch (póry s veľkosťou

0,01 mm až 1  $\mu$ m), neprístupných pre voľnú vodu (Hudec, 1987). Vzlínavosťou sa dostávajú hlbšie do materiálov agresívne soli z prostredia rozpustené vo vode aj proti smeru gravitácie, ktoré môžu urýchľovať degradačné procesy a znižovať životnosť stavebných materiálov. Z hodnotených prírodných a konglomerovaných kameňov má najvyšší súčiniteľ kapilárnej nasiakavosti pieskovec z lomu Králiky (Obr. 3).

#### 4.2. Výsledky degradačných laboratórnych skúšok

Za odolné horninové materiály sa väčšinou považujú pevné skalné horniny, bez vizuálnych zmien alebo straty hmotnosti či pevnosti počas ich využívania. Na sledovanie týchto charakteristík sme sa zamerali pri vyhodnotení vplyvu laboratórnych skúšok simulujúcich zvetrávanie. Výsledky troch realizovaných skúšok (skúška mrazuvzdornosti, skúška odolnosti proti kryštalizácii solí a skúška odolnosti proti starnutiu pôsobením  $\text{SO}_2$  za prítomnosti vlhkosti) sú graficky znázornené na obr. 4, 5 a 6. Skúška odolnosti proti starnutiu pôsobením náhlej zmeny teploty, so skúšobnými telieskami univerzálne zvolených rozmerov, sa ukázala málo výpovednou skúškou, vzorky po 20-tich cykloch ohrievania na 70 °C a chladnutia vo vodnom kúpeli s teplotou 15 °C boli takmer bez zmien, preto výsledky tejto skúšky neuvádzame.

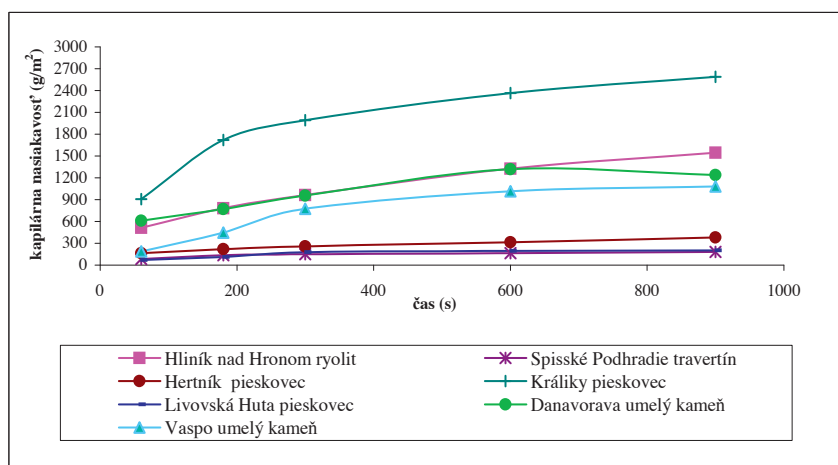
Po skúške mrazuvzdornosti, pozostávajúcej z 25 cyklov zmrazovania a rozmrazovania, nenastali merateľné zmeny hmotnosti

vzoriek. Všetky vzorky si zachovali svoju celistvosť i svoj pôvodný vzhľad, preto jediným preukázateľným výsledkom tejto skúšky je zistená hodnota súčiniteľa mrazuvzdornosti (pomer jednoosej tlakovej pevnosti vzoriek podrobených opakovanému zmrazovaniu a rozmrazovaniu k tlakovej pevnosti zistenej na vysušených vzorkách). Súčiniteľ mrazuvzdornosti je zaradený k technickým požiadavkám pre využívanie hornín na kamenárske výrobky (STN 72 1800). Hraničnou minimálnou hodnotou súčiniteľa mrazuvzdornosti je hodnota 0,75 (Obr. 4). Zo študovaných prírodných kameňov toto kritérium nespĺňajú pieskovec z lokality Králiky a Hertník. Technické požiadavky pre konglomerovaný kameň nie sú známe.

Zmeny hmotnosti vzoriek po skúške odolnosti proti kryštalizácii solí a po skúške odolnosti proti pôsobeniu  $\text{SO}_2$  za prítomnosti vlhkosti preukázali pri sledovaných kameňoch súvislosť, pričom väčšie zmeny hmotnosti vzoriek nastali pri druhej z menovaných skúšok (Obr. 5 a 6). Predpokladom nárastu hmotnosti vzoriek po skúške odolnosti proti agresívnemu  $\text{SO}_2$  za prítomnosti vlhkosti je vytvorenie chemických zlúčenín procesom sulfatácie (Nezvalová, 2003). Percentuálny nárast hmotnosti vzoriek je znázornený na obr. 5, pričom najväčšia zmena hmotnosti nastala pri vzorkách konglomerovaných kameňov. V roztoku A s väčším podielom  $\text{SO}_2$  bol výraznejší nárast hmotnosti vzoriek. Vizuálne sa pôsobenie  $\text{SO}_2$  prejavilo zmenou farby vzoriek (žltasté sfarbenie svetlých hornín, zmena farebného odtieňa, výskyt rôznych nepravidelných novotvarov).

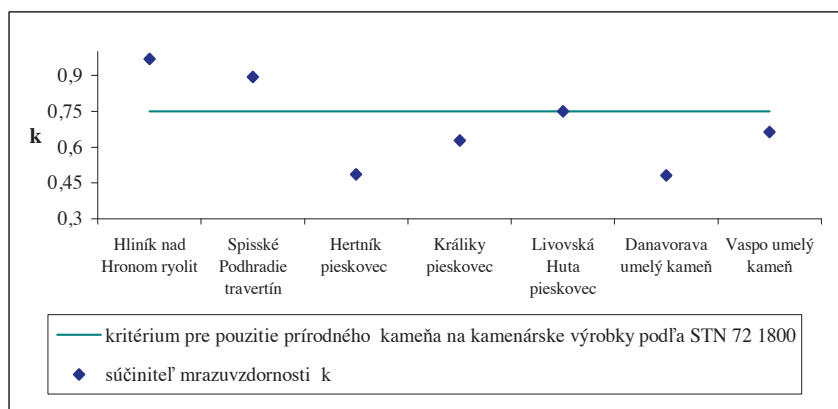
Obr. 3. Kapilárna nasiakavosť skúmaných typov kameňa.

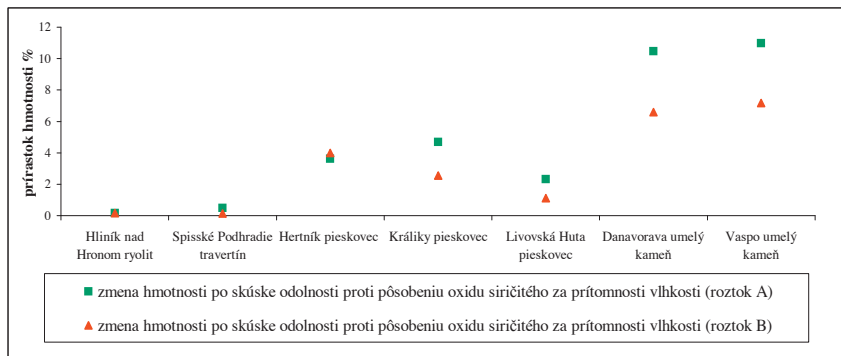
Fig. 3. Capillarity water absorption of studied stone types.



Obr. 4. Koeficient mrazuvzdornosti ako technická požiadavka na kamene podľa normy STN 72 1800.

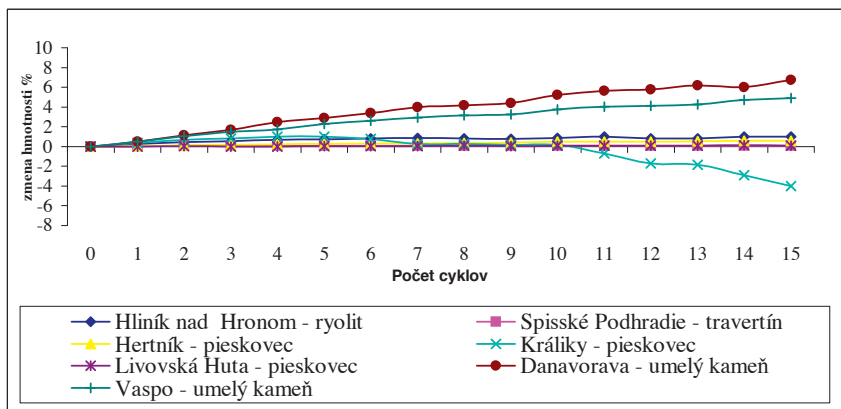
Fig. 4. Coefficient of freezing as a technical requirement on stones according to technical standard STN 72 1800.





Obr. 5. Zmeny hmotnosti vzoriek pri rozdielnej koncentrácii SO<sub>2</sub> počas skúšky odolnosti proti pôsobeniu SO<sub>2</sub> za prítomnosti vlhkosti.

Fig. 5. Changes of sample mass in regard to different concentration of SO<sub>2</sub> during the test of resistance to ageing by SO<sub>2</sub> action in the presence of humidity.



Obr. 6. Zmeny hmotnosti vzoriek počas skúšky odolnosti proti kryštalizácii solí.

Fig. 6. Changes of sample mass during the salt crystallisation test.

Zmena hmotnosti prevažnej väčšiny vzoriek nastala i po skúške máčania v roztoku dekahydrátu síranu sodného. Postupná akumulácia soli z roztoku v otvorených póroch hornín sa prejavila nárastom hmotnosti (najvýraznejšie u umelých kameňov Vaspo a Danavorava), ako je znázornené na obr. 6. Vzorky si počas 15-tich cyklov máčania v soli a následného prudkého vysušania zachovali svoju celistvosť. Zmeny vzhľadu boli väčšinou nepatrné. Výnimkou bol pieskovec z lokality Králiky, u ktorého začal úbytok hmotnosti 11-stým cyklom namočenia do roztoku soli v dôsledku oslabovania pevnosti štruktúrnych väzieb a opadávaním jednotlivých zŕn z povrchu skúšobných teliesok (Obr. 7). Následné správanie vzoriek bolo závislé od teploty a prítomnosti vody a súviselo so stabilitou síranu sodného v rozdielnych vlhkosťno-teplotných podmienkach. Zmena fáz síranu sodného pri izbovej teplote nastáva pri vlhkosti cca 75 % (Steiger & Dannecker, 1998 ex Reudrich & Siegesmund, 2007). Ako bolo uvedené, vysušené vzorky si zachovali svoju celistvosť, vzorky opakovaně namočené do vody a sušené pomaly v prirodzených laboratórnych podmienkach, boli po niekoľkých dňoch výrazne zmenené kryštalizáciou soli obsiahnutej vo vzorke (Obr. 8). Prechod z dekahydrátu síranu sodného (mirabilit) na síran sodný (thenardit) sa u niektorých kameňov prejavil kryštalizáciou solí na povrchu (ryolit – obr. 8a, travertín – obr. 8b, pieskovec Králiky – obr. 8d) alebo i rozlomením a celkovou deštrukciou vzoriek (pieskovec Hertník – obr. 8c, umelý kameň Vaspo a Danavorava – obr. 8f, 8g). Pieskovec z Livovskej Huty (obr. 8e), ktorý mal najnižšiu celkovú pórovitosť, zostal bez zmien.

Súhrnný prehľad o vizuálnych i hmotnostných zmenách vzoriek podrobených degradačným skúškam, vypovedajúcim

o ich nožnej trvanlivosti, je v tab. 3, z ktorej možno stanoviť i poradie hodnotených kameňov podľa výsledkov realizovaných skúšok odolnosti proti zvetrávaniu. Najtrvanlivejší sa preukázal ryolit z Hliníka nad Hronom, potom travertín zo Spišského Podhradia a pieskovec z Livovskej Huty. Uvedené tri litologické typy spĺňajú i technické požiadavky na stavebný kameň podľa normy STN 72 1800. O kvalitatívnu úroveň nižšie sú správaním navzájom podobné umelý kameň Vaspo, pieskovec z Hertníka a pieskovec Králiky. Ako najmenej odolný sa prejavil umelý kameň Danavorava.

## 5. ZHODNOTENIE POUŽITÝCH METÓD VÝSKUMU

Vychádzajúc z vlastných poznatkov i z poznatkov výskumu zaoberajúceho sa odolnosťou stavebných kameňov v zahraničí možno zhodnotiť použité štandardné metódy nasledovne:

Skúška odolnosti proti mrazu súvisí so zmenou skupenstva vody na ľad sprevádzanou zväčšením jej objemu asi o 9 %, čo vedie k vzniku vnútorného napätia v materiáloch a následného porušenia ich štruktúry. Vplyv na to má aj stupeň nasýtenia vzorky vodou, ktorý závisí od veľkosti pórov, ako aj skutočnosť, že každý druh v póroch prítomnej vody, či už voľnej, kapilárnej alebo adsorbovanej mrzne pri inej teplote. Medzi najnebezpečnejšie patria póry s veľkosťou nad 0,1 mm, pretože transportujú voľnú vodu, ktorá mrzne pri teplote 0 až -4 °C. Voda v kapilárnych póroch mrzne pri -20 až -30 °C (Svoboda et al., 2005). Durmeková et al. (2008) sledovali zmeny v štruktúre pórovej siete po skúške

Tab. 3. Výsledky laboratórnych skúšok simulujúcich zvetrávanie.

Tab. 3. Results of laboratory methods simulating the weathering.

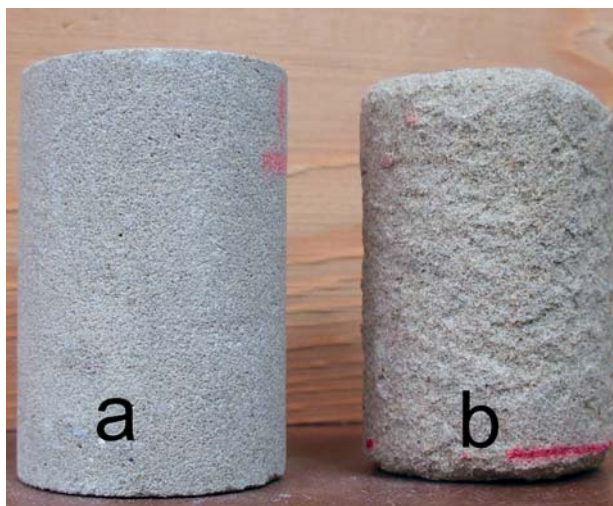
Litologický typ	Lokalita	Skúška v Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		Skúška pôsobením SO <sub>2</sub>		
		Zmena hmotnosti	Vizuálna zmena	Zmena hmotnosti roztok A	Zmena hmotnosti roztok B	Vizuálna zmena A/B
Ryolit	Hliník nad Hronom	0,79	áno	0	0	nie/nie
Travertín	Spišské Podhradie	0,11	nie	0	0	nie/áno
Pieskovec	Hertník	0,58	nie	3,63	3,99	áno/áno
	Králiky	-4,29	áno	4,69	2,55	áno/áno
	Livovská Huta	0,1	áno	2,33	1,1	áno/áno
Umelý kameň	Danavorava	7,33	áno	10,46	6,6	áno/áno
	Vaspo	4,98	áno	10,9	7,17	áno/áno

mrazuvzdornosti viacerých typoch pieskovec metódou optickej porozimetrie. Vizuálne zmeny neboli pozorované v celom objeme vzorky, najvýraznejší bol nárast mikrotrhlín v pripovrchovej časti vzoriek, prístupnej voľnej vode. Kvantitatívne merateľné zmeny sa prejavili v znížení parametrov fyzikálnych vlastností (zvýšenie nasiakavosti, zníženie rýchlosti prechodu ultrazvukových vln i zníženie pevnosti). Vzhľadom na neustále periodické pôsobenie mrazu v klimatických podmienkach Slovenska, skúška mrazuvzdornosti je najčastejšie používanou skúškou pri analýzach vhodnosti hornín pre konkrétny účel v stavebníctve. Pri hodnotení trvanlivosti hodnotených kameňov sa preukázala ako výpovedná skúška.

Skúška odolnosti proti starnutiu pôsobením SO<sub>2</sub> za prítomnosti vlhkosti nie je často používanou hodnotiacou metódou. Častejšie sa zisťuje spolupôsobenie kameňa s inými agresívnymi plynmi (napr. NO<sub>2</sub>), ktoré sa nachádzajú v atmosfére priemyselných oblastí (Allen et al., 2004). Podľa Nezvalovej (2003) pôsobenie SO<sub>2</sub> na technické horniny (materiály tvorené zmesou kameniva, cementovým alebo živicovým spojivom a rôznymi prísadami) spôsobuje korozívnu premenu daného materiálu. Chemickým procesom je sulfatácia, ktorého výsledným produktom sú vápenaté sulfáty, najmä sadrovec (Matoušek, 1998 ex Nezvalová, 2003). Rýchlosť sulfatácie závisí od relatívnej vlhkosti prostredia a koncentrácie SO<sub>2</sub>. Predpokladá sa, že chemická zmena pôsobí rovnako aj na prírodné horniny. V prípade umiestnenia horniny v suchom agresívnom prostredí, SO<sub>2</sub> nepôsobí korozívne. Skúsenosti s touto skúšobnou metódou u nás zatiaľ nie sú, nie je stanovené ani žiadne kritérium vhodnosti použitia stavebných kameňov vyplývajúce z tejto normovej skúšky.

Skúška odolnosti proti kryštalizácii solí je relatívne často používanou skúškou, ale stále veľmi diskutovanou. Pôsobenie

solí, ktoré sa dostanú do otvorených pórov, vedie k porušeniu štruktúrnych väzieb, čo súvisí s pôsobením kryštalizačných tlakov, ktoré soľ môže vyvolať. Kryštalizačný mechanizmus je ovplyvnený vlastnosťami soľného roztoku, vlastnosťami narastajúcich kryštálov, teplotou a vlhkosťnými podmienkami, ako aj vlastnosťami horniny. Existuje takmer 50 druhov solí, ktorých výskyt bol zistený na budovách (Ruedrich & Siegesmund, 2007). Reprezentatívnou soľou pre skúmanie odolnosti proti kryštalizácii soli sa stal síran sodný (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), biela kryštalická látka známa ako minerál thenardit. Táto soľ je bezvodá, ale veľ-



Obr. 7. Porovnanie vzhľadu pieskovca z lokality Králiky pred (a) a po (b) skúške odolnosti proti kryštalizácii solí.

Fig. 7. Changes in an appearance of the sandstone from Králiky before (a) and after (b) the salt crystallisation test.



Obr. 8. Prejav kryštalizácie síranu sodného ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) na skúšobných vzorkách kameňov (a – rhyolit/ Hliník nad Hronom; b – travertín/Spišské Podhradie; c – pieskovec/Hertník; d – pieskovec/Králiky; e – pieskovec/Livovská Huta; f – umelý kameň /Danavorava; g – umelý kameň/Vaspo).  
 Fig. 8. Impact of the sodium sulphate crystallisation on stone samples (a – rhyolite/ Hliník nad Hronom; b – travertine/Spišské Podhradie; c – sandstone/ Hertník; d – sandstone/Králiky; e – sandstone/Livovská Huta; f – agglomerated stone /Danavorava; g – agglomerated stone/Vaspo).

mi rýchlo sa dokáže zmeniť na soľnú fázu bohatú na vodu s názvom mirabilit ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ ). Hygroskopické správanie soli je veľmi dôležité z hľadiska zisťovania odolnosti hornín proti zvetrávaniu, pretože pri danej premene dokáže soľ zvýšiť svoj objem o 300 % (Ruedrich & Siegesmund, 2007). Vplyv takéhoto správania soli na horninu súvisí s veľkosťou pórov a ich prepojenosťou. Výsledkom skúšky odolnosti proti kryštalizácii soli je podľa normy zmena hmotnosti skúšobných teliesok. Rovnako ako pri predchádzajúcej metóde možno skonštatovať, že nie je známa klasifikácia alebo jednoznačná požiadavka na horniny vyplývajúca z výsledkov tejto skúšky. Autori Angeli et al. (2007) navrhujú objektivizovať skúšku určením dvoch parametrov. Jeden z nich je alteračný index (*alteration index* – AI), ktorý je definovaný ako počet cyklov v momente, keď nastáva prvé viditeľné porušenie. Druhým parametrom je alteračná rýchlosť (*alteration velocity* – AV), ktorý zohľadňuje intenzitu porušenia vzorky na konci skúšobného procesu. Je to konečná hodnota odvodnená z hmotnostnej zmeny vzorky a počtu uskutočnených cyklov.

## 6. ZÁVER

Návrh optimálnej laboratórnej metodiky pre charakterizovanie trvanlivosti prírodného kameňa pre stavebné účely vychádza z kombinácie dostupných normových metód, ktoré určitým spôsobom napodobňujú zvetrávacie procesy prebiehajúce v prírodných podmienkach. Z aplikácie metód na vybrané typy prírodného a konglomerovaného vyplýva:

- ▶ Napriek pribúdaniu nových metód, prvé miesto pri hodnotení trvanlivosti stále prináleží skúške mrazuvzdornosti aj z dôvodu, že výsledkom tejto skúšky je objektívne stanovený porovnávaci parameter, ktorým je súčiniteľ mrazuvzdornosti. Otvorenou otázkou pri tejto skúške ostáva počet zmrazovacích a rozmrazovacích cyklov, ktoré však možno zvoliť podľa účelu využívania kameňa a podľa podmienok prostredia.
- ▶ Skúška odolnosti proti kryštalizácii soli nenahrádza skúšku mrazuvzdornosti, ale ju dopĺňa. Špecifikuje správanie kameňa v prostredí ovplyvnenom ľudskou aktivitou. Bolo overené, že jej realizácia má význam pre kameň s otvorenou pórovitosťou vyššou ako 5 %.

- ▶ Skúška odolnosti proti zvetrávaniu pôsobením  $\text{SO}_2$  za prítomnosti vlhkosti je dostatočne preukaznou skúškou, ktorá môže slúžiť na sledovanie vplyvu znečisteného mestského ovzdušia na odolnosť kameňa.
- ▶ Skúška odolnosti proti náhlej zmene teploty sa preukázala ako najmenej výpovedná metóda. Vyžaduje si uskutočnenie väčšieho počtu cyklov ako je stanovené normou.

Z hľadiska prejavov najväčšej agresívnosti na študované materiály možno zostaviť nasledujúce poradie použitých normových metód: stanovenie odolnosti proti  $\text{SO}_2$  za prítomnosti vlhkosti, stanovenie odolnosti proti kryštalizácii soli, stanovenie odolnosti proti mrazu a stanovenie odolnosti proti tepelnému šoku náhlou zmenou teploty.

Výrazne lepšie obstáli v skúškach odolnosti prírodné kamene ako ich priemyselné ekvivalenty, to však neznamená, že nie sú vhodné na účely, pre ktoré boli vyrobené.

Objektívne posúdenie vhodnosti použitia vybraných laboratórnych metód pre skúmanie odolnosti hornín je do istej miery problematické. Určenie poradia vhodnosti metód závisí od vnútorných daností materiálov i vonkajšieho vplyvu prostredia a ich zmien v čase. Taktiež treba brať do úvahy, že v prírodných podmienkach sa na zvetrávaní spolupodieľajú viaceré faktory, zatiaľ čo v laboratórnom výskume sú skúmané len jednotlivé zvetrávacie činitele oddelene v definovaných podmienkach. Trendom je kombinácia faktorov v hodnotiacich postupoch, a tým približovanie sa reálnym podmienkam. Poznaním konečného použitia hornín ako stavebného materiálu, a taktiež prostredia, v ktorom budú umiestnené, možno určiť najvhodnejšiu kombináciu metód a predpokladaných pôsobiacich faktorov, a tak predpovedať ich trvanlivosť a správanie v čase.

**Podakovanie:** Príspevok bol vypracovaný s finančnou podporou Vedeckej grantovej agentúry MŠ SR (projekty č. 1/0413/09 a 1/0499/08). Ďakujeme aj slovenským firmám VASPO® z Trenčianskej Turnej a DANAV ORAVA, s. r. o. z Novoti za poskytnutie vzoriek konglomerovaného kameňa na výskum.

## Literatúra

Allen G.C., El-Turki A., Hallam K.R., Coulson E.E. & Stowell, R.A., 2004: Mechanisms of attack on limestone by  $\text{NO}_2$  and  $\text{SO}_2$ . In: Smith



- B.J. & Turkington A.V. (Eds.): Stone decay. Its caused and controls. Proceedings of Weathering 2000. DONHEAD, Belfast, 13 – 32.
- Angeli M., Bigas J., Benavente D., Menéndez B., Hébert R & David Ch., 2007: Salt crystallization in pores: quantification and estimation of damage. *Environmental Geology*, 52, 205 – 213.
- Durmeková T., Bakošová A. & Janega A., 2008: Vplyv skúšky mrazuvzdornosti na štruktúru a vlastnosti horniny. In: Frankovská J., Liščák P. & Ondrášik M. (Eds.): Geológia a životné prostredie 6. ŠGÚDŠ, Bratislava, 69 – 74.
- Holzer R., Laho M., Wagner P. & Bednarik M., 2009: Inžinierskogeologický atlas hornín Slovenska, ŠGÚDŠ, Bratislava, 538 s.
- Hudec P.P., 1987: Deterioration of aggregates – The underlying causes. Katharine and Bryant Mather International Conference on Concrete Durability. American Concrete Institution, Detroit, Michigan, 1325 – 1342.
- Inkpen R.J., Petley D. & Murphy W., 2004: Durability and rock properties. In: Smith B.J. & Turkington A.V. (Eds.): Stone decay. Its caused and controls. Proceedings of Weathering 2000. DONHEAD, Belfast, 33 – 52.
- Nezvalová J., 2003: Pseudokrasy v technických horninách. In: Mentlík P. & Šulc Z. (Eds.): Geomorfologický zborník 2. Západočeská univerzita v Plzni, 306 s. elektronická verzia (<http://www.kge.zcu.cz/geomorf/sbornik/texty2/nezval.pdf>)
- Petro L., Frankovská J., Matys M. & Wagner P., 2008: Inžinierskogeologický a geotechnický terminologický slovník. ŠGÚDŠ, Bratislava, 465 s.
- Přikryl R., 2008: Přírodní kámen pro první etapu opravy Karlova mostu. *Geotechnika*, 4, 3 – 15.
- Ruedrich, J. & Siegesmund, S., 2007: Salt and ice crystallization in porous sandstones. *Environmental Geology*, 52, 225 – 249.
- Svoboda L., Bažantová Z., Myška M., Novák J., Tobolka Z., Vávra R., Vimrová A. & Výborný J., 2005: Stavebné materiály. JAGA, Bratislava, 470 s.
- STN EN 1925: 2002: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie súčiniteľa nasiakavosti kapilaritou.
- STN EN 1926: 2007: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie jednoosej pevnosti v tlaku.
- STN EN 1936: 2007: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie mernej hmotnosti, objemovej hmotnosti a celkovej a otvorenej pórovitosti.
- STN EN 12370: 2002: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie odolnosti proti kryštalizácii solí
- STN EN 12371: 2003: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie mrazuvzdornosti.
- STN EN 13755: 2008: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie nasiakavosti pri atmosférickom tlaku
- STN EN 13919: 2003: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie odolnosti proti starnutiu pôsobením SO<sub>2</sub> za prítomnosti vlhkosti.
- STN EN 14066: 2003: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie odolnosti proti starnutiu pôsobením náhlejšej zmeny teploty.
- STN EN 14147: 2004: Skúšky prírodného kameňa. Stanovenie odolnosti proti starnutiu soľnou hmlou.
- STN EN 14617-5: 2005 Stanovenie odolnosti proti zmrazovaniu a rozmrazovaniu.
- STN EN 14617-6: 2005: Konglomerovaný kameň. Skúšobné metódy. Stanovenie odolnosti proti tepelnému šoku.
- STN EN 14617-10: 2005: Konglomerovaný kameň. Skúšobné metódy. Stanovenie odolnosti proti chemikáliám.
- STN 72 1800: 1987: Prírodný stavebný kameň na kamenárske výrobky. Technické požiadavky.

**Summary:** The goals of the research presented in the paper were to select an optimal laboratory methodology for determining the durability of rocks used as building and decorative stones. The paper, in the theoretical part, deals with general terminology concerning rock durability, also with methods for durability determination and possibility of forecasting the damages.

Technical standards offer particular possibilities for determination and evaluation of the rock resistance against individual external weathering factors, namely against a frost effect, salt crystallisation, SO<sub>2</sub> action in presence of humidity, or against shock temperature changes. A review of standard testing methods on determination of the durability for natural and agglomerated stone is in Tab. 1.

Laboratory weathering methods were applied to 5 types of natural stone; (rhyolite from Hliník nad Hronom, travertine from Spišské Podhradie, sandstones from Králiky, Livovská Huta and Hertník) and 2 types of agglomerated stone produced by Vaspo and Danavorava.

Real density, apparent density, total and open porosity, water absorption capillarity suction and uniaxial compressive strength (UCS) were determined on the selected stones (Tab. 2, Figs. 1, 2 and 3). Values of these material properties indicate the expected behaviour of building stones and their resistance against weathering. Parameters obtained by realised tests simulating accelerated weathering are coefficient of freezing, evaluation of visual changes of sample and changes in weight; for their values see Tab. 3, Figs. 4, 5, 6 and 7.

Optimal laboratory methodology prediction of building stone for its durability can be based on a combination of standardized methods. Application of the methods for selected types of natural and agglomerated stones showed the following:

Properties, especially UCS, open porosity and water absorption, have a crucial influence on stone behaviour and durability of stone during the weathering laboratory tests and thereafter also during usage of a stone on buildings. However pore size distribution plays an important role in relation to water absorption, but this was not the subject of the investigation.

Each of the realised laboratory methods is important and applying all of them in testing and durability prediction can not be substituted because each of these methods simulates different external weathering factors and specifies different resistance against weathering.

The freeze/thaw test has the first place in the evaluation of stone durability, especially because the result of this test is an objectively determined parameter – the coefficient of freezing.

A new standard test – determination of resistance to ageing by SO<sub>2</sub> action in the presence of humidity, is a sufficiently good test which can be used for monitoring the impacts of urban air pollution on the stone resistance.

The determination of resistance to ageing by thermal shock is the least informative method. It requires the performance of a much greater number of cycles.

From the studied stones, the highest resistance against the weathering tests showed the rhyolite from Hliník nad Hronom and travertine from Spišské Podhradie. The lowest resistance was determined on sandstones from localities Králiky a Hertník and both types of the agglomerated stones. However it does not mean that they are not suitable for the purposes for which they have been made.