

Trvanlivost božanovského pískovce – simulace pražských zimních klimatických podmínek

Kateřina Kovářová

Katedra geotechniky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7, 166 29, Praha 6; katerina.kovarova@fsv.cvut.cz

AGEOS The durability of Božanov sandstone – simulation of Prague winter climatic conditions

Abstract: Sandstones were often used mainly as building material in Prague. Weathering processes lead to deterioration of these dimension stones and to changes in their durability. The range of the deterioration depends on petrography, including internal structure, mineral and matrix composition, and also changes initiated. The stone's properties are negatively influenced especially during the winter frost period, and the presence of salt can exacerbate this process. The national standardized testing methods for natural stone, such as determination of frost resistance and determination of resistance to salt crystallisation may not take into consideration the actual conditions in the stone's locality. Road salts, mainly composed of sodium chloride, are used to de-ice streets in Prague during winter season. Samples of snow/water mixtures from Prague city centre were chemically analyzed and the average NaCl concentration was determined. To simulate the weathering processes typical in Prague's winter climatic conditions, seasonal data from 1999 to 2008 were statistically analyzed. Based on this analysis, a simulation program consisting of 56 freeze/thaw cycles in the temperature range of -14°C to 14°C was developed. The weathering simulation program was divided into four stages, each consisting of 14 freeze/thaw cycles. The sandstone samples had been soaked for 24 hours in distilled water and in a 2.5% solution of NaCl before each stage. Each cycle lasted seven hours and the samples were maintained at minimal and maximal temperatures for two hours. The Božanov Cretaceous sandstone was tested during this experiment. Changes developing in the internal structure were studied by Hg porosimetry. Physical-mechanical properties such as water absorption at atmospheric pressure, uniaxial compressive strength, apparent density and open porosity were also studied. The uniaxial compressive strength decreased after 56 freeze/thaw cycles in both combinations - with distilled water and NaCl solution. The decrease of open porosity measured by both methods corresponds to the decrease of water absorption at atmospheric pressure in both cases of loading.

Key words: Božanov sandstone, porosity, durability, weathering simulation program, physical-mechanical properties, Hg porosimetry, Czech Republic

1. ÚVOD

Pískovce byly v minulosti z důvodu snadné dostupnosti a opracovatelnosti hojně používány ke stavebním účelům, a proto je nalézáme na mnoha významných historických stavbách po celé České republice – např. chrám Sv. Barbory v Kutné Hoře, Karlův most v Praze (Rybařík, 1994).

Působením zvětrávacích procesů však dochází k jejich poškození a ke ztrátám jejich původních kvalitativních vlastností, tedy ke změnám jejich trvanlivosti. Z tohoto důvodu je nezbytné věnovat pozornost studiu vlivu zvětrávacích procesů na tyto změny, ať už z hlediska samotné identifikace změn a následné možné sanaci poškozeného materiálu či z důvodů zlepšení výběru alternativních horninových typů na opravu takto poškozených památek.

2. VLIV ZVĚTRÁVACÍCH PROCESŮ NA TRVANLIVOST PÍSKOVců

Pískovce jsou zpevněné klastické sedimentární horniny, tvořeny zejména zrnky křemene nebo v menší míře zrnky živce a úlomky hornin. Jednotlivá minerální zrna jsou stmelena, přičemž tmel může být různého původu – jílovitý, kalcitový, z oxidů a hydroxidů železa nebo křemíty.

Při zvětrávání může docházet ke ztrátě pojiva, která nepříznivě ovlivňuje pevnostní charakteristiky kamene. Rozvolnění struktury stmelení klastických zrn křemene se uplatňuje jak v povrchových partiích, tak i hlouběji v nitru horninové hmoty. Četné široké intergranulární prostory ovlivňují pórovitost horniny a řídí přítomnost a transport kapaliny nitrem horniny, což jsou jedny z nejdůležitějších faktorů ovládajících zvětrávací procesy hornin. Postupná ztráta soudružnosti zrn může pokračovat až ke konečnému rozpadu na jednotlivá klastická zrna, což je charakteristickým projevem zvětrávání pískovců (Dudková, 1990).

Zvětrávací proces je souhrou několika proměnných, kde mají hlavní roli materiál, prostředí, povětrnostní faktory a zvětrávací formy (Smith, 1996). Pro prostředí, ve kterém dochází k procesu rozpadu, lze rozdělit jednak na vnější (okolní atmosféra kolem kamene definovaná klimatem, složením vzduchu, přítomností vody, znečištěním atd.) a vnitřní (materiály kolem vlastního kamene ve stavební konstrukci – např. malty, voda s rozpuštěnými solemi atd.). Zvětrávací procesy způsobují fyzikální rozpad a chemické změny, v jejichž důsledku se mění stavba horniny, tedy také její vlastnosti. Zvětrávací formy jsou makroskopicky i mikroskopicky pozorovatelné jevy na povrchu horniny, z nichž lze vyčíst příčiny rozpadu kamene, tedy jaké procesy se na jejich vzniku podílely.

Charakteristickou součástí vnitřní stavby hornin je jejich pórové prostředí, které je během zvětrávacích procesů výrazně modifikováno. Pórové prostředí je v technické praxi kvantifikováno zpravidla pórovitostí, která vyjadřuje poměr objemu pórů k objemu pevné fáze (Prentice, 1990; Schön, 2004). Pórovitost ovlivňuje řadu fyzikálních vlastností jako je např. pevnost v prostém tlaku, deformační charakteristiky, nasákavost, propustnost atd.

2.1 Vliv mrznoucí vody v pórovém systému hornin

Přítomnost vody v kapalném stavu v pórovém systému hornin vede k objemovým změnám zejména tehdy, pokud obsahují větší množství jílových minerálů v základní hmotě. Voda dále působí silově na soudržnost horniny, pokud dochází ke změně jejího skupenství (mrznutí), kdy narůstá její objem o cca 10 %. Mrznutí a tání vody v pórovém prostředí vyvolává síly, které mohou zapříčinit porušení a rozpukání hornin podél vrstevních anebo jiných ploch mikrodiskontinuity (tektonických, hypergenních, a pod.). Působení mrazu může mít za následek oprýskání povrchu hornin, jeho odlupování a další možné poškození spojené s jeho působením. Zvětrávání hornin v důsledku působení mrazu má největší význam ve vlhkém prostředí (Winkler, 1997).

Náchylnost hornin na negativní působení mrznutí vody v pórech a puklinových prostorech závisí na jejich velikosti, relativní vlhkosti a možné přítomnosti solí. Horniny, které jsou nasáklé vodou před tím, než na ně začne působit mráz, jsou mnohem více citlivé na jeho působení než horniny, které jsou vysušené. Působení mrazu je nejvíce nebezpečné tam, kde je nasycení pórového prostředí horniny nad 50 % (Winkler, 1997). Fagerlund (1973) poukazuje na kritický stupeň nasycení pórového prostředí. Pokud je tohoto stupně dosaženo, tak dochází k poškození horniny. Jestliže je hornina nasycena pod tuto hranici, tak nedochází k žádným výrazným změnám v její vnitřní stavbě. Působením vnějšího prostředí dochází k jisté míře nasycení horniny – tzv. aktuální stupeň nasycení, který se s časem mění. Odolnost vůči mrazu je pak vyjádřena jako rozdíl mezi hodnotou nasycení kritického a aktuálního. Důležitou vlastností, určující kritické nasycení, je specifický objem pórů. Čím menší jsou vzduchem naplněné póry, tím vyšší je hodnota kritického nasycení za konstantních podmínek.

V důsledku zmrazování a rozmrazování vody v pórovém prostředí dochází ke změnám struktury horninového materiálu (Winkler, 1997; Thomachot & Jeannette, 2002). V závislosti na počtu cyklů zmrazování a rozmrazování roste celková pórovitost horniny a přibývá pórů o větším poloměru. Teplota ovlivňuje nejen počátek tuhnutí ledu, ale také jeho tvrdost. Tvrdost ledu stoupá s klesající teplotou z 1,5 stupně Mohsovy stupnice při 0°C na tvrdost 6 Mohsovy stupnice při -60°C, což je tvrdost žuly (Winkler, 1997).

Mechanismus transportu vlhkosti v horninách je velmi složitým a stále ne zcela objasněným procesem. Pohyb vody v pórech, resp. výška, do které voda vystoupá, je funkcí poloměru pórů (Winkler, 1997). Horniny, které obsahují póry s malým poloměrem, absorbují vodu více, než horniny s póry s většími poloměry. Horniny s póry o velkém poloměru mohou sice obsahovat větší množství vody, ale v horninách s póry o malém

poloměru je voda zadržována déle (Theolakis & Moropoulou, 1997). Na kapilární pohyb vody v pórech má velký vliv také složení a smáčivost povrchu pórů.

Podle Griggse (1936) nemá kolísání teploty zdaleka tak významný vliv jako vlhkost, která urychluje proces zvětrávání. Williams & Robinson (2001) poukazují na souvislost mrazového a solného zvětrávání. Stupeň poškození horniny závisí na kombinaci solí, které se v procesu solného zvětrávání uplatňují.

2.2 Působení krystalizujících solí

Krystalizující sole v pórovém prostředí tvoří soubor několika současně působících procesů. Nejvýznamnější podíl mají fyzikální procesy (Ollier, 1969; Winkler, 1997), které mohou být často doprovázeny chemickými procesy a činností organismů (Goudie & Viles, 1997). Tento proces může vést k drolivému rozpadu povrchu horniny a nebo k odlupování „šupin“ z povrchu (Ollier, 1969).

Krystalizace solí vede v první řadě ke zvětšení pórového prostoru a prostoru mikrotrhlin. Sůl krystalizuje nejprve v pórech větších rozměrů, a když jsou již zaplněny, tak krystalizuje v menších pórech (Putnis & Mauthe, 2001). Horniny s vysokou celkovou pórovitostí s velkými póry a mnoha malými jsou velmi náchylné na rozpad v důsledku působení solí (Goudie & Viles, 1997). Horniny s vysokým obsahem mikropórů podléhají mnohem více solnému zvětrávání než horniny s vysokým obsahem pórů o větším poloměru (Schaffer, 1932), což potvrdily i pozdější experimentální studie (Punuru et al., 1990).

Jedním z důležitých procesů solného zvětrávání je krystalizace sekundárních solí z roztoků v horninových pórech a trhlinách. Růst solných krystalů vyvolává v závislosti na teplotě tlaky o velikosti několika desítek až stovek MPa, které přesahují tahovou pevnost většiny hornin (Goodman, 1989). Noční ochlazení může způsobit krystalizaci solí, přičemž tento druh krystalizace mnohem více ovlivňuje jejich množství než jejich krystalizace v důsledku vypařování (mnohem více postupný proces) za stejně dlouhou dobu (Kwaad, 1970).

Vedle vlastních krystalizačních tlaků se na porušení hornin podílí také hydratace. Při hydrataci fáze dochází ke zvětšení objemu solí v důsledku sorpce vody a zároveň je tím vyvíjen větší tlak na okolí. Procesy hydratace a dehydratace probíhají v závislosti na změnách teploty a relativní vlhkosti vzduchu. Největší účinky hydratačních tlaků jsou pozorovány při nižších teplotách a vyšší relativní vlhkosti vzduchu (Winkler, 1997).

Vedle fyzikálních procesů v důsledku krystalizačních a hydratačních tlaků mohou krystalizující sole vést i k chemickému zvětrávání. Nové agresivní reakční složky jsou převážně atmosférického původu nebo mohou také vznikat vzájemnými reakcemi mezi jednotlivými solemi (Arnold & Zehnder, 1990).

3. ZKOUŠENÍ TRVANLIVOSTI PŘÍRODNÍHO KAMENE

Zvětrávací procesy jsou zpravidla velmi dlouhodobé v řádu minimálně desítek, ale spíše stovek až tisíců let. Z těchto důvodů není příliš reálné stanovit dynamiku změn v horninách pomocí

odběru vzorků z přirozených výchozů po uplynutí určité doby. V technické praxi se proto nahrazuje sledování postupu zvětrávání zrychlenými zkouškami odolnosti vůči povětrnostním vlivům.

Laboratorní zkoušky odolnosti vůči zvětrávacím vlivům jsou zrychlené zkušební postupy, kdy pomocí cyklického působení vybraného jevu (např. zmrazování/rozmrazování) jsou zkušební tělesa zatěžována po dobu dnů či týdnů. Teoreticky by mělo být dosaženo obdobných výsledků, které v přírodních podmínkách trvají roky (Schaffer, 1932). V praxi se nejvíce používají zkoušky odolnosti vůči zmrazování a krystalizaci solí.

Při volbě typu laboratorních zkoušek nelze slepě spoléhat na zavedené standardní postupy, ale je třeba vycházet ze znalosti konkrétních podmínek (tedy zvětrávacích procesů) v místě stavby (Duffy & O'Brien, 1996). Z tohoto důvodu se nelze omezit na zkoušky trvanlivosti používané v běžném zkušebnictví v dnes platných národních a evropských normách, ale je lépe volit takové postupy, které umožní sledovat dynamiku probíhajících změn. Například Fitzner & Kalde (1991) pro účely simulace zvětrávacích procesů v klimatických podmínkách města Aachen (Německo) statisticky vyhodnotili data, která byla naměřena přímo na určité budově. Faktory, které byly uvažovány, se významnou měrou podílí na zvětrávacích procesech. Jsou jimi teplota, relativní vlhkost, srážky a míra slunečního záření. Pro nastavení samotného programu simulujícího dané podmínky bylo třeba, zavést jistý „eliminací faktor“, jehož pomocí se vyloučí dny, ve kterých nedochází k výskytu výše zmiňovaných událostí, které nepříznivě ovlivňují trvanlivost materiálů. Bylo zjištěno, že je tento faktor roven 1:6, tzn. jeden den ze šesti je relevantní ve vztahu ke zvětrávání. Následně bylo na základě tohoto zjištění zavedeno 60 čtyřadvacetihodinových cyklů, které odpovídají jednomu roku v daných klimatických podmínkách. Teplotní rozsah je dán naměřenými minimálními a maximálními teplotami.

3.1 Zkoušení odolnosti vůči mrazu

Při studiu odolnosti hornin proti působení mrazu se používá metoda, která je založena na pravidelném střídání zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Počet těchto cyklů je v praxi velmi různý. Mc Greevy & Whalley (1982) doporučují pro úspěšné provedení experimentu teplotní rozsah od 0°C do -22°C.

Dříve velice rozšířené zkoušení koeficientu mrazuvzdornosti bylo založeno na stanovení jedné ze složek klimatu – mrznutí vody v zimním období. Počet zmrazovacích/rozmrazovacích cyklů vycházel z klimatických dat v Berlíně v letech 1884 – 1892, kde byl spočten průměrný počet období, během nichž nejdříve pršelo, poté mrzlo a následně teplota vystoupila na +4°C (Hirschwald, 1911). Nejnižší počet takovýchto cyklů za jednu zimu byl 10, průměrný 14 a nejvyšší 25. Hodnota 25 tedy byla vzata jako základ zkoušek mrazuvzdornosti s tím, že měla v reálných podmínkách odpovídat 1 – 3 rokům. Tato zkouška se pak stala základem zkoušení mrazuvzdornosti po téměř celé 20. století.

V České republice se standardně užívá zkouška Stanovení mrazuvzdornosti dle ČSN EN 12371 (2002). Zkušební postup se skládá z šestihodinových cyklů zmrazování vzorků horniny na vzduchu a následných šestihodinových cyklů rozmrazování

ve vodě. Zatěžování zkušebních těles probíhá tak dlouho, dokud se tělesa nerozpadnou nebo do předem určeného počtu cyklů.

3.2 Zkoušení odolnosti vůči působení solí

Metoda krystalizace solí simuluje proces solného zvětrávání. Zkušební tělesa se ponoří do roztoku solí o potřebné koncentraci a po jeho vysušení se měří požadované veličiny. Koncentrace solí se liší v závislosti na experimentu, například Warke et al. (2006) při studiu odolnosti pískovců používají roztoky Na₂SO₄ o koncentraci 2 až 5 % a Příkryl et al. (2003) roztok o koncentraci 14 % a Rodriguez-Navarro & Doehne (1999) pro svůj experiment použili nasycené roztoky NaCl a Na₂SO₄. Obecně platí, že čím vyšší koncentrace solí v roztoku je, tím rychleji dochází k poškození horniny.

V České republice se pro účely stanovení odolnosti přírodního kamene vůči působení krystalizujících solí postupuje podle ČSN EN 12370 (2000). Pro účely této zkoušky se zkušební tělesa namáčí v 14 % roztoku dekahydrátu síranu sodného.

3.3 Kombinace metod

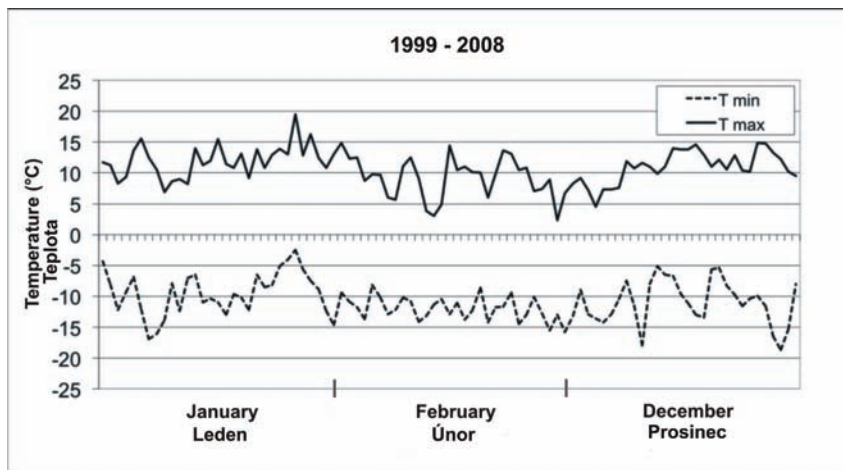
Velice často se pro studium odolnosti hornin používá kombinace obou metod, protože lépe napodobuje skutečné podmínky. Před a po provedení zkoušek odolnosti se stanovují vybrané fyzikální parametry hornin (Goudie, 1999).

4. EXPERIMENTÁLNÍ SIMULACE PRAŽSKÝCH ZIMNÍCH KLIMATICKÝCH PODMÍNEK

Pro účely tohoto experimentu (simulace pražských klimatických podmínek) byla statisticky zpracována data z ČHMÚ Libuš – maximální a minimální teploty měsíců prosinec, leden a únor z let 1999 až 2008. Průběh absolutních denních maximálních a minimálních teplot je znázorněn na obr. 1. Na základě statistického vyhodnocení bylo zjištěno, že na 90 dní v zimním období připadá 56 dní, kdy teplota klesá pod bod mrazu. Absolutní minimální teplota byla naměřena 29. prosince 2000, a to -18,7°C, a absolutní denní maximální teplota 19,5°C byla naměřena 26. ledna 2009. Průměrné hodnoty naměřených absolutních teplot jsou pro minimální teplotu -10,8°C a pro maximální teplotu 10,7°C. V obou případech byla vypočítána směrodatná odchylka (σ), která je pro oba soubory dat velice podobná – $\sigma_{\max} = 3,06$ a $\sigma_{\min} = 3,26$ (Kovářová, 2010).

V únoru 2010 byly odebrány vzorky směsi sněhu a vody ze tří míst v centru Prahy (Obr. 2) a následně v nich byla stanovena argentometrickou titrací průměrná koncentrace chloridu sodného, který tvoří více než 99 % podíl v používaných posypových solích v centru Prahy. Stanovená průměrná koncentrace NaCl byla 2,5 %.

Na základě vyhodnocení dostupných údajů bylo zvoleno 56 cyklů, které teoreticky teplotně odpovídají jedné extrémní zimě, s teplotním rozsahem od -14°C do +14°C (po přičtení směrodatných odchylek k daným průměrným hodnotám). Rovněž je kladen důraz na to, aby po dosažení výše zmiňovaných teplot vzorek při této teplotě setrval po dobu 2 hodin. Zmiňovaných



Obr. 1. Záznam absolutních maximálních a minimálních teplot v letech 1999–2008.

Fig. 1. Record of absolute minimum and maximum temperatures from years 1999–2008.

56 cyklů zmrazování a rozmrazování je rozděleno do čtyř etap. Každá etapa je tak složena ze 14 cyklů zmrazování a rozmrazování (Kovářová, 2010).

Před každou etapou byla jedna sada zkušebních těles ponořena nejméně na 24 hodin do destilované vody a druhá sada těles do 2,5 % roztoku NaCl. Destilovaná voda byla zvolena s ohledem na své vlastnosti. Tuto vodu lze nazvat vodou „hladovou“ a svým složením se podobá vodě srážkové. Vzorky byly podrobovány teplotnímu cyklování v klimatické komoře Heraeus Vötsch HC 4020.

5. EXPERIMENTÁLNÍ MATERIÁL – BOŽANOVSKÝ PÍSKOVEC

Božanovský arkózovitý pískovec lze zařadit mezi středně až hrubozrnné pískovce s velikostí zrn 0,5 – 2 mm. Ložiska tohoto pískovce se nachází v České křídové pánvi v jizerském souvrství a je tvořeno středněturonskými kvádrovými pískovci Broumovských stěn. Lom božanovského pískovce se nachází cca 8 km JV od vsi Božanov.



Obr. 2. Označení míst odběru vzorků směsi sněhu a vody (●) pro stanovení koncentrace NaCl v centru Prahy (mapový podklad <http://maps.google.com>).

Fig. 2. Location of snow/water mixture samplings (●) for determination of NaCl concentration in Prague city centre (map source <http://maps.google.com>).

Tab. 1. Hodnoty základních fyzikálně-mechanických vlastností před a po zatěžování v klimatické komoře.

Tab. 1. Values of the basic physical-mechanical properties before and after loading in a climatic chamber.

	Nezatížené vzorky Untreated samples	56 cyklů + destilovaná voda 56 cycles + distilled water	Změna (%) Change (%)	56 cyklů + NaCl 56 cycles + NaCl	Změna (%) Change (%)
Otevřená pórovitost (% obj.) Open porosity (% vol.)	9,96	9,58	-3,82	9,76	-2,01
Nasákavost za atmosférického tlaku (% hm.) Water absorption at atmospheric pressure (% w.)	4,57	4,37	-4,34	4,49	-1,75
Objemová hmotnost (kg/m ³) Apparent density (kg/m ³)	2177	2189	0,53	2174	-0,16

Jedná se o bělošedé až rezavě hnědé pískovce. Tyto kvádry jsou uloženy v pravidelných 1 – 3 m mocných lavicích s mírným úklonem k jihozápadu. Celé ložisko je porušeno několika kernými zlomy. Tento pískovec patří mezi tvrdé, obtížnější opracovatelné pískovce, a udává se, že má dobrou odolnost vůči mechanickým vlivům a povětrnosti (Rybařík, 1994). Struktura pískovce je tvořena převážně klasty křemene, avšak jsou v něm přítomny i živce a úlomky hornin a v nepatrném množství jsou zastoupeny muskovit, biotit a těžké minerály (Návrátová et al., 1978). Matrix tvoří kaolinit (Procházka, 1984).

6. STANOVOVANÉ VLASTNOSTI BOŽANOVSKÉHO PÍSKOVCE

Po ukončení cyklického zatěžování v klimatické komoře byly stanoveny základní fyzikálně-mechanické vlastnosti a stanoveny parametry pórového prostoru metodou Hg porozimetrie. Výsledky byly porovnány s hodnotami naměřenými na nezatížených vzorcích.

6.1 Pevnost v prostém tlaku

Pro stanovení pevnosti v prostém tlaku byla použita nezatížená tělesa a tělesa po zatěžování v klimatické komoře po 14, 28, 42 a 56 cyklech v kombinaci s namáčením v destilované vodě a v 2,5% roztoku NaCl. Zkouška byla provedena dle postupu předepsaného v ČSN EN 1926 (2007) ve Zkušebně kamene a kameniva, s.r.o. v Hořicích (dále jen ZKK Hořice).

Výsledky pevnosti v prostém tlaku při použití destilované vody a roztoku NaCl jsou znázorněny na následujících obrázcích (Obr. 3a, b), v případě použití destilované vody po 56 cyklech zmrazování/rozmrazování klesla pevnost v prostém tlaku o 2,93 % a v případě použití 2,5% roztoku NaCl klesla pevnost v prostém tlaku o 8,64 %.

6.2 Otevřená pórovitost, objemová hmotnost

Pro stanovení otevřené pórovitosti a objemové hmotnosti byla použita nezatížená tělesa a tělesa po zatěžování v klimatické

komoře po 14, 28, 42 a 56 cyklech v kombinaci s namáčením v destilované vodě a v 2,5% roztoku NaCl. Zkoušky byly provedeny dle postupu předepsaného v ČSN EN 1936 (2007) v ZKK Hořice. Výsledky jsou uvedeny v tab. 1.

6.3 Nasákavost za atmosférického tlaku

Pro stanovení nasákavosti za atmosférického tlaku byla použita nezatížená tělesa a tělesa po zatěžování v klimatické komoře po 14, 28, 42 a 56 cyklech v kombinaci s namáčením v destilované vodě a v 2,5% roztoku NaCl. Zkoušky byly provedeny dle postupu předepsaného v ČSN EN 13755 (2008) v ZKK Hořice. Výsledky jsou uvedeny v tab. 1.

6.4 Hg porozimetrie

Měření geometrických charakteristik pórového prostoru bylo provedeno metodou vysokotlaké rtuťové porozimetrie ve spolupráci s laboratorii sorpční analýzy v Ústavu struktury a mechaniky horniny AV ČR na sestavě porozimetrů Pascal 140 +240 fy Thermo Electron – Porotec s řízeným zvyšováním tlaku. Identifikovány byly póry v intervalu poloměru 3,7 až 58000 nm.

Vzorky byly zanalyzovány před zatěžováním a po 56 cyklech zmrazování/rozmrazování v kombinaci s destilovanou vodou a roztokem NaCl. Z každého vzorku byly provedeny dvě stanovení. Výsledky jsou uvedeny v tab. 2.

Z předchozí tabulky je patrné, že došlo k poklesu celkové pórovitosti po zatěžování vzorků jak v kombinaci s destilovanou vodou, tak v kombinaci s roztokem NaCl. Rovněž došlo k poklesu specifického objemu pórů pro všechny velikostní rozmezí (hrubé póry – $r > 7500$ nm, makropóry – $r = 35$ až 7500 nm a mezopóry – $r = 2$ až 35 nm).

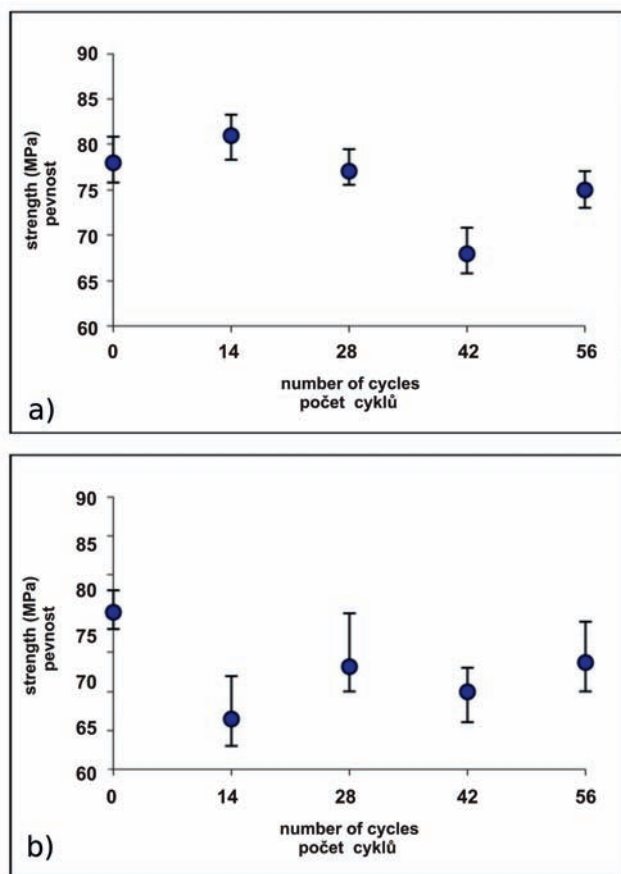
7. DISKUZE

Pevnost v prostém tlaku je jednou z fyzikálně-mechanických vlastností, pomocí které se hodnotí odolnost hornin vůči zvětrávacím vlivům. Platí, že se zvyšujícím počtem zatěžování klesá

Tab. 2. Celková pórovitost a specifický objem pórů rozdělených dle poloměru božanovského pískovce.

Tab. 2. Total porosity and specific volume of pores according to their radius of Božanov sandstone.

	Specifický objem pórů (mm ³ /g)			Celková pórovitost (%) (změna %)
	Poloměr pórů > 8000 nm (změna %)	Poloměr pórů 60–8000 nm (změna %)	Poloměr pórů < 60 nm (změna %)	
	Pore radius > 8000 nm (change %)	Pore radius 60–8000 nm (change %)	Pore radius < 60 nm (change %)	
Nezatížené vzorky Untreated samples	52,15	20,93	2,12	16,59
56 cyklů + destilovaná voda 56 cycles + distilled water	47,29 – 9,31	13,89 – 33,64	2,02 – 4,72	14,33 – 13,62
56 cyklů + NaCl 56 cycles + NaCl	45,56 – 12,63	12,54 – 40,09	1,58 – 25,71	13,65 – 17,72



Obr. 3. Pevnost v prostém tlaku: a) při použití destilované vody; b) při použití 2,5% roztoku NaCl.

Fig. 3. Uniaxial compressive strength: a) using distilled water; b) using 2.5% NaCl solution.

pevnost v prostém tlaku (e. g. Winkler, 1997). U božanovského pískovce byl tento nepatrný pokles (o 2,93 %) zaznamenán jak v rámci tohoto experimentu, tak i Příkrylem et al. (2006). V obou studiích však v případě samotného zmrazování a rozmrazování bez použití roztoků solí došlo k mírnému nárůstu pevnosti v prostém tlaku po určitém počtu cyklů. Tento jev může být způsoben změnou hustoty mikroskopických "trhlin" a jejich novým vzájemným uspořádáním uvnitř zrn. Oba tyto jevy mají vliv na výslednou pevnost hornin (Zhang et al., 1998).

Při kombinovaném zatěžování zmrazovacími cykly a solemi došlo k výraznějšímu poklesu pevnosti v prostém tlaku, jak v rámci této studie (po 56 kombinovaných cyklech pokles o 8,64 %), tak v případě experimentu Příkryla et al. (2006). Příkryl et al. (2006) uvádí, že se vzorky po druhém modulu kombinovaného zatěžování rozpadly, když byly podrobeny 12 zmrazovacím/rozmrazovacím cyklům s následnými 10 cykly krystalizace solí.

Podle Fitznera (1988) a Winklera (1997) dochází během zvětrávacího procesu k nárůstu pórovitosti a obecně platí, že pevnost v prostém tlaku klesá s rostoucí pórovitostí (Příkryl, 2001; Sabatakis et al., 2008; Sousa et al., 2005). Výsledky obou metod stanovení pórovitosti však vykazují její pokles po zatěžování v klimatické komoře v kombinaci s užitím destilované vody i roztoku NaCl. Zároveň po 56 cyklech zmrazování/rozmrazování dochází v obou případech k poklesu pevnosti v prostém tlaku. Tato netypická závislost je způsobena omezením metod na stanovení efektivní (otevřené) pórovitosti. Obě použité metody stanovení pórovitosti jsou schopné detekovat pouze otevřené póry a nejsou schopné "pokryt" oblast mikropórů, jejichž poloměr je menší než 2 nm.

V průběhu zvyšujícího se počtu cyklů zmrazování/rozmrazování dochází k redistribuci pórového prostoru působením tlaku vyvolaného růstem ledu nebo krystalů soli. Tato redistribuce může mít za následek uzavření některých pórů (Kovářová et al., 2011) a jejich identifikace použitím metod Hg porozimetry a dle ČSN EN 1936 (2007) není možná. Pokles nasáka-

vosti v obou případech zatěžování odpovídá poklesu otevřené pórovitosti.

Podle Fitznera (1988) dochází v důsledku zmrazování a rozmrazování ke zvětšování poloměru pórů, avšak na základě vyhodnocení výsledků Hg porozimetrie dochází nejen k poklesu celkové pórovitosti, ale rovněž k poklesu specifického objemu všech velikostních rozmezí pórů při obou způsobech cyklického zatěžování. Tento jev lze vysvětlit vznikem uzavřených pórů, které není možno pomocí této metody detekovat, a rovněž “ink bottle” efektem (Fitzner, 1988; Cnudde et al., 2009), který zneumožňuje jasnou identifikaci určitých pórů. Tyto relativně velké póry jsou propojeny se svým okolím skrze úzké hrdlo, kterým je do póru vtačována rtuť. Tlak potřebný na proniknutí rtuti do póru je zaznamenán a následně je vypočítán poloměr póru, který je však “nesprávně” přiřazen k menšímu poloměru póru, než je ten, který se “skrývá” za hrdlem.

8. ZÁVĚR

V rámci tohoto experimentu byla studována trvanlivost božanovského pískovce v pražských zimních klimatických podmínkách za použití simulačního programu, který je založen na konkrétních meteorologických datech. Po vyhodnocení výsledků lze konstatovat, že použitím tohoto programu nedošlo k tak výraznému poškození tohoto materiálu, jako v případě použití kombinace normových postupů na stanovení mrazuvzdornosti a krystalizace solí. Použití agresivnějších normových postupů může mít tedy za následek neadekvátní negativní ohodnocení trvanlivosti tohoto pískovce.

Rovněž výsledky ukázaly pokles otevřené pórovitosti, který v případě jiných studií nebyl zaznamenán. Tento pokles je vysvětlován vznikem nových uzavřených pórů.

Poděkování: Tato publikace vznikla za podpory SGS ČVUT č. SGS10/027/OHK1/IT/11 a IGS ČVUT č. CTU0901111.

Literatura

- Arnold A. & Zehnder K., 1990: Salt weathering on monuments. In: Veniale F. & Zezza U. (Eds.): Advanced Workshop. Analytical methodologies for the investigations of damaged stones. Pavia, 58 p.
- Cnudde V., Cwirzen A., Masschaele B. & Jacobs P.J.S., 2009: Porosity and microstructure characterization of building stones and concretes. *Engineering Geology*, 103, 76-83.
- ČSN EN 12370, 2000: Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení odolnosti proti krystalizaci solí. Český normalizační institut, Praha, 8 p.
- ČSN EN 12371, 2002: Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení mrazuvzdornosti. Český normalizační institut, Praha, 13 p.
- ČSN EN 1926, 2007: Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení pevnosti v prostém tlaku. Český normalizační institut, Praha, 17 p.
- ČSN EN 1936, 2007: Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti. Český normalizační institut, Praha, 11 p.
- ČSN EN 13755, 2008: Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení nasákavosti vodou za atmosférického tlaku. Český normalizační institut, Praha, 8 p.
- Dudková I., 1990: Přírodní kameny po padesátileté expozici v městském ovzduší. *Časopis pro mineralogii a geologii*, 35, 1, 33-40.
- Duffy A. & O'Brien P., 1996: A basis for evaluating the durability of new building stone. In: Smith B.J. & Warke P. (Eds.): Processes of Urban Stone Decay. Donhead Publishing Ltd., London, 253-260.
- Fagerlund G., 1973: Pore structure and frost resistance. In: Modrý S. (Ed.): Pore Structure and Properties of Materials. Proceedings of the International Symposium RILEM/IUPAC, Prague, September 18-21, Final Report – Part IV. Prague, F67-F78.
- Fitzner B., 1988: Porosity properties of naturally or artificially weathered sandstones. In: Copernicus N. (Ed.): Proceedings of the 6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. September 12-15, Nicholas Copernicus University, Torun, 236-245.
- Fitzner B. & Kalde M., 1991: Simulation of frost-thaw cycle and salt weathering – nature adapted material tests. In: Auger F. (Ed.): La détérioration des matériaux de construction. June 12-14, Colloque International, La Rochelle, 103-114.
- Goodman R.E., 1989: Introduction to rock mechanics (2nd edition). John Wiley & Sons, New York, 562 p.
- Goudie A., 1999: Experimental salt weathering of limestones in relation to rock properties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 715-724.
- Goudie A. & Viles H.A., 1997: Salt weathering hazards. Wiley & Sons, Chichester, 241 p.
- Griggs D., 1936: The factor of fatigue in rock exfoliation. *Journal of Geology*, 9, 783-796.
- Hirschwald J., 1911: Handbuch der bautechnischen Gesteinprüfung (Vol. Teil I). Verlag von Gebrüder Borntraeger, Berlin, 923 p.
- <http://maps.google.com>, 6.4.2011.
- Kovářová K., 2010: Influence of Weathering Processes on Sandstones – Simulation of Prague Winter Climatic Conditions. In: Kapriuk W. & Wiśniewski K. (Eds.): Proceedings of III International Interdisciplinary Technical Conference of Young Scientists. Uczelniany Samorząd Doktorantów Politechniki Poznańskiej, Poznań, 311-314.
- Kovářová K., Ševčík R., Chmelíková, M., Bednarik, M. & Holzer R., 2011: Comparison and Use of Hg porosimetry and X-ray Computed Microtomography in Durability Tests of Sandstone on the Charles Bridge in Prague. In: Proceedings of 8th International Conference on Measurement. (in print)
- Kwaad F., 1970: Experiments on the granular disintegration of granite by salt action. In: Kwaad F., Levelt T. & Slotboom R. (Eds.): From Field to Laboratory. Publicaties Fysisch-geografisch en bodemkundig laboratorium, Universiteit Amsterdam, Amsterdam, 67-80.
- Mc Greevy J. & Whalley W., 1982: The geomorphic significance of rock temperature variations in cold environments: a discussion. *Arctic and Alpine Research*, 14, 2, 157-162.
- Návratová K., Bílek P., Hošek M., Jirásek K., Fafejta J. & Kotvicová L., 1978: Závěrečná zpráva úkolu Božanov 5111384704. Surovina: dekorační kámen – pískovec. MS Geofond, Praha, 70 p.
- Ollier C., 1969: Weathering. Oliver & Boyd, Edinburgh, 304 p.
- Prentice J., 1990: Geology of construction materials. Chapman and Hall, London, 202 p.
- Procházková J., 1984: Chemické složení dekoračních pískovců severovýchodních Čech. *Výběr prací*, 12, 45-60.
- Příkryl R., 2001: Some microstructural aspects of strength variation in rocks. *Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38, 671-682.
- Příkryl R., Lokajčiček T., Svobodová J. & Weishauptová Z., 2003: Experimental weathering of marlstone from Přední Kopanina (Czech Republic) – historical building stone of Prague. *Building and Environment*, 38, 1163-1171.

- Přikryl R., Krutilová K. & Makalová K., 2006. Výběr alternativních typů pískovců pro opravu lícňho zdiva Karlova mostu. Nepublikovaná výzkumná zpráva OMI MHMP, Praha, 55 p.
- Punuru A., Chowdhury A., Kulshreshtha N. & Gauri K., 1990: Control of porosity on durability of limestone at the Great Sphinx, Egypt. *Environmental Geology and Water Science*, 15, 225-232.
- Putnis A. & Mauthe G., 2001: The effect of pore size on cementation in porous rocks. *Geofluids*, 1, 37-41.
- Rodríguez-Navarro C. & Doehne E., 1999: Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, 191-209.
- Rybařík V., 1994: Ušlechtilé stavební a sochařské kameny České republiky. Nadace Střední průmyslové školy kamenické a sochařské v Hořicích, Hořice v Podkrkonoší, 218 p.
- Sabatakis N., Koukis G., Tsiambaos G. & Papanakli S., 2008: Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 97, 80-90.
- Schaffer R., 1932: The weathering of natural building stones (Reprint 2004). Donhead, London, 149 p.
- Schön J.H., 2004: Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. Elsevier, Amsterdam, 600 p.
- Smith B.J., 1996: Scale problems in the interpretation of urban stone decay. In: Smith B.J. & Warke P.A. (Eds.): Processes of Urban Stone Decay Donhead Publishing Ltd., London, 3-18.
- Sousa L.M.O., Suárez del Río L.M., Calleja L., Ruiz de Argandoña V.G. & Rodríguez Rey A., 2005: Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology*, 77, 153-168.
- Theoulakis P. & Moropoulou A., 1997: Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay. *Construction and Building Materials*, 1, 11, 65-71.
- Thomachot C. & Jeannette D., 2002: Evolution of the petrophysical properties of two types of Alsatian sandstone subjected to simulated freeze-thaw conditions. In: Siegesmund S., Weiss T. & Vollbrecht A. (Eds.): Natural stone, weathering phenomena, conservation strategies and case studies. Geological Society, Special Publications, London, 19-32.
- Warke P., McKinley J. & Smith B.J., 2006: Variable weathering response in sandstone: factors controlling decay sequences. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31, 715-735.
- Williams R.B.G. & Robinson D.A., 2001: Experimental frost weathering of sandstones by various combinations of salts. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 811-818.
- Winkler E., 1997: Stone in Architecture. Properties, Durability. Springer-Verlag, Berlin, 313 p.
- Zhang S.L., Li T. & Yang W., 1998: Statistical strength of brittle materials with strongly interacted collinear microcracks. *International Journal of Solids and Structures*, 35, 11, 995-1008.

Summary: Sandstones were often used as a main building material. We can find them on many significant historical monuments all around the Czech Republic. Weathering processes lead to deterioration of these dimension stones and to changes in their durability. The range of the deterioration depends on petrography, including internal structure, mineral composition and cementation type, and also changes initiated. The stone's properties are negatively influenced especially during the winter frost period, and the presence of salt can exacerbate this process. The national standardized testing methods for natural stone, such as

determination of frost resistance and determination of resistance to salt crystallisation may not take into consideration the actual conditions in the stone's locality. Therefore the weathering simulation program was developed to simulate Prague winter climatic conditions. Seasonal data from 1999 to 2008 (Fig. 1) were statistically analyzed and samples of snow/water mixtures from Prague city centre (Fig. 2) were chemically analyzed and the average NaCl concentration was determined. Based on this analysis, a simulation program consisting of 56 freeze/thaw cycles in the temperature range of -14°C to 14°C was developed. The weathering simulation program was divided into four stages, each consisting of 14 freeze/thaw cycles. The sandstone samples were soaked for 24 hours in distilled water and in a 2.5% solution of NaCl before each stage. Each cycle lasted seven hours and the samples were maintained at minimal and maximal temperatures for two hours (Kovářová, 2010).

The Božanov Cretaceous sandstone was tested during this experiment. Changes developing in the internal structure were studied by Hg porosimetry. Physical-mechanical properties such as water absorption at atmospheric pressure, uniaxial compressive strength, apparent density and open porosity were also studied.

The uniaxial compressive strength decreased after 56 freeze/thaw cycles in both combinations – with distilled water by 2.93% (Fig. 3a) and NaCl solution by 8.64% (Fig. 3b). The measured values of apparent density, open porosity and water absorption at atmospheric pressure, and their changes after the loading are given in the Tab. 1. Specific volume of pores according to their radius and total porosity measured via Hg porosimetry is given in Tab. 2. The decrease of all values is obvious from this table. Generally the decrease of open porosity measured by both methods corresponds to the decrease of water absorption at atmospheric pressure in both cases of loading.

The decrease of uniaxial compressive strength in this experiment is less significant in comparison with the results given by Přikryl et al. (2006). The difference is caused due to the use of combination of Czech standardized methods (determination of frost resistance and to salt crystallization). The standardized methods are generally more aggressive.

According to Fitzner (1988) pore size distribution changes toward coarser pore size during freezing tests and the uniaxial compressive strength decreases with increasing porosity, however the results of our investigation are opposite. The decrease of uniaxial compressive strength with decreasing porosity measured via Hg porosimetry and via Czech national standard can be explained by the presence of the closed pores, which are not possible to detect using this kind of methods. The decrease of specific volume of coarser pores can be explained due to "ink bottle" effect. It means, that measuring of the true pore size distribution is distorted due to detection of the diameter of the throat entrance (Fitzner, 1988; Cnudde et al., 2009).

To sum up, the results shown the decrease of open porosity, which was not detected in previous experiments. This decrease is explained by creation of newly formed closed pores during the climatic loading.

In conclusion, using of more aggressive standardized test methods to evaluate the durability of this sandstone can cause its inadequate negative rating.