

ZMĚNA PARAGENEZE EFLORESCENTŮ STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ HRADU VEVEŘÍ V PRŮBĚHU ROKU

Variation efflorescence assemblage of building materials castle Veverí during one year

Gregerová Miroslava, Trojanová Zuzana

Ústav geologických věd, PřF MU Kotlářská 2, 611 37 Brno;

e-mail: mirka@sci.muni.cz, trojanova@mail.muni.cz

(24-32 Brno)

Key words: Castle Veverí, climatic conditions, degradation, building stone, efflorescence

Abstract

This study presents some degradation phenomena of building materials. It is well known that degradation mostly depends on salt transport across a porous system. The object chosen for the study was State Castle Veverí, where the building materials used were stone, brick and mortar. These building materials have been exposed for a long time to central European climate conditions. Weathering of masonry in these conditions leads to its degradation. Efflorescence represent a good evidence of masonry salting. Efflorescence and their assemblage were studied in detail for one year. The conclusion that was drawn was that efflorescence assemblage is influenced by relative humidity, temperature, capillary water, position of masonry with respect to prevailing rain direction, and sunshine intensity.

Rozsáhlý stavební objekt hradu Veverí se řadí mezi nejvíce poškozené hradní areály v České republice. Celý areál je rozdělen hlubokým šijovým příkopem, který odděluje tzv. vnitřní hrad a mohutné předhradí. Vnitřní hrad tvoří tzv. hradní palác s břitovou věží, arkádové nádvoří a tzv. Anglický trakt s hranolovou věží a zadním nádvořím. V předhradí je vymezen tzv. střední hrad a Příhrádce.

Hrad je vybudován na skalním ostrohu, který je z JV obtékán říčkou Veverkou a ze S řekou Svatkou. Z geomorfologického hlediska je situován do Lipovské vrchoviny, která je součástí Bobravské vrchoviny (Demek et al. 1987). Základy hradu byly položeny již ve 20. letech 13. století, stavební práce pokračovaly v průběhu druhé poloviny 14. století. Během 15. století byl hrad dále rozšířen a v 16. století prodělal významné a rozsáhlé stavební úpravy. Roku 1622 byly dokončeny renesanční úpravy hradu (Fedor 2002). Podle Kroupy (1999) již okolo roku 1700 existoval hradní areál v současné dispoziční podobě. V následujících letech se stavební úpravy prováděly pouze na předhradí a druhá pol. 20. století negativně poznamenala hrad řadou nevhodných stavebních úprav.

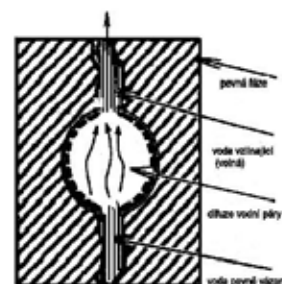
Na stavbu hradu byl použit lomový kámen, stavební keramika a pojiva (malty a omítky). Nejčastějším stavebním materiálem je lomový kámen. Ze stavebních kamenů je degradace nejmarkantnější na pískovcových lomových kamenech. Ty mají vyšší porozitu než ostatní (např. granity, vápence, droby).

Stavební materiály jsou degradovány vlivem vody a v ní transportovaných vodorozpustných solí. Pohyb vody v pórech zdívá probíhá dvěma způsoby – vertikálně (vzlínáním vody) a horizontálně (difúzí vodní páry). Obr. 1 znázorňuje vzlínající vodu, která stoupá úzkou kapilárou. Pevně vázaná voda nemůže proniknout přes pór velkého průměru, ale transport vlhkosti se nezastaví. Voda se na konci kapiláry odpaří a difunduje k protější stěně. Zde pára kondenzuje a v kapalném stavu vzlíná kapilárami

k dalšímu póru. Spolu s vodou volnou vzlíná po stěnách kapilár a pórů i film pevně vázané vody (o mocnosti řádově několika molekul). Také tato vystupuje po stěnách kapilár, proti směru zemské gravitace.

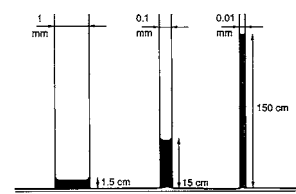
Do jaké výše vystoupá vzlínající voda ve zdívu, závisí na průměru kapilár. Výška sloupce vodního roztoku v kapiláře je nepřímo úměrná průměru kapiláry (obr. 2). Výšku kapilárního zdvíhu pro vodu o teplotě 20 °C vypočteme jako $h_c = 0,153/r$. Z rovnice je zřejmé, že při poklesu průměru pórů roste výška kapilárního zdvíhu, která dosahuje podle Šráčka – Kuchovského (2003) u jemnozrnného pískovce výšky okolo 7,7 m.

Přítomnost vodorozpustných solí zvyšuje povrchové napětí roztoku. Jev se uplatňuje při hladině, kde přitažlivé síly ion – dipól molekuly vody směřují do roztoku. Při vzlínání musí roztok tyto elektrostatické síly překonat. Povrchové vrstvy mají nižší koncentrace rozpuštěných solí. Hodnoty povrchového napětí vodných roztoků solí jsou řádově o desítky až stovky mN/m vyšší, než povrchové napětí vody. Podle Balíka (2004) výška vodního sloupce se zvyšuje se zvyšující se koncentrací solí.



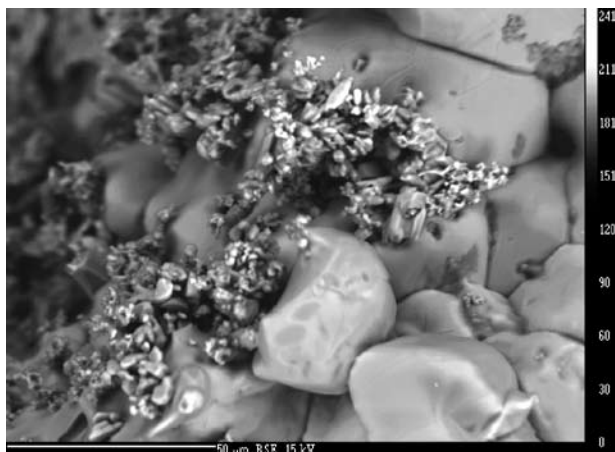
Obr. 1 – Prostup vlhkosti kapilárou a pórem.

Fig. 1 – Rising water across capillary and pore.



Obr. 2 – Výška vzlínání vody v kapilárah různých průměrů (Mamillan, 1981).

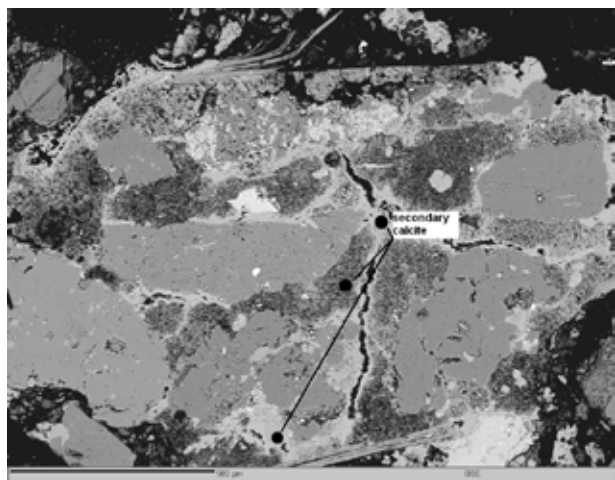
Fig. 2 – The height of rising water in capillary of different radius (Mamillan, 1981).



Obr. 3 – Povrchové eflorescenci na pískovci,
Cameca SX 100. Foto P. Sulovský.
Fig. 3 – The efflorescence surface on the sandstone.
Cameca SX 100. Photo P. Sulovský.



Obr. 4 – Krystaly sádrovce na povrchu pískovce.
Cameca SX 100. Foto P. Sulovský.
Fig. 4 – Gypsum crystals surface on the sandstone.
Cameca SX 100. Photo P. Sulovský.



Obr. 5 – Sekundární kalcit v pórovém systému pískovce.
Cameca SX 100. Foto P. Sulovský.
Fig. 5 – Secondary calcites produce in porous system of sandstone.
Cameca SX 100. Photo P. Sulovský.

V horizontálním směru difunduje vodní pára zdivem ze strany zdi s vyšší teplotou ke straně s nižší teplotou. Difúze probíhá pouze v kapilárah a pórech, které jsou částečně nebo zcela vyplněné vzduchem.

Pokud jsou kapiláry a póry zcela vyplněné kapalinou, uplatňuje se termoosmóza. Ta umožňuje transport vody z oblastí nižších do oblastí vyšších teplot. Termoosmóza je protipólem difúze. Balík (2004) konstatuje, že difúze se uplatňuje v kapilárah a pórech větších průměrů a termoosmóza naopak v pórech a kapilárah co nejmenších a nejužších.

Vliv pevného skupenství vody (krystalizační tlak ledu) závisí na velikosti pórů a na komunikativnosti pórového systému stavebního materiálu. Krystalizační tlak ledu působící na stěny pórů, vede k jejich rupturám. V případě pórů propojených tenkými kapilárami, neproběhne úplné odvodnění kapilár a jejich stěny popraskají. U velkých, propojených pórů je pohyb vody snadnější a krystalizace v částečně odvodněném póru nevede k rupturám stěn. Teplý (1997), uvádí, že vliv ledu, jako destruktivního činitele, se projeví až při obsahu min. 91 % vody (z celkového objemu pórů). Při nižším obsahu vody stlačitelnost vzduchu obvykle vyrovná krystalizační tlak ledu a ruptury nevznikají.

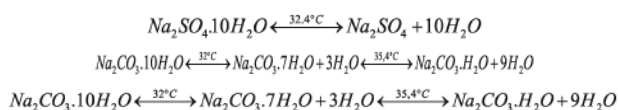
Na degradačních procesech se podílejí zejména ve vodě rozpustné soli (sírany, chloridy a dusičnany). Podle Winklera (1994) se velmi obtížně identifikují zdroje solí, které se vyskytují na poškozeném a zvlhlém stavebním materiálu. Z jejich chemického složení lze na jejich zdroje pouze usuzovat. Původ solí může být primární (soli přítomné ve stavebním materiálu) a sekundární (transportované vztlínající vlhkostí, vzniklé chemicky vlivem ovzduší nebo v důsledku nevhodných rekonstrukčních zásahů).

Podle Gregerové (1996) stavební materiály (písek, pojiva, cihlářské výrobky a horniny) mohou obsahovat vodorozpustné minerály, které ve vlhkém prostředí reagují např. s vápenatým pojivem za vzniku síranů. Na cihlovém zdivu se běžně vyskytují eflorescenci sádrovce ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Atmosféra obsahuje nejen základní plyny (N_2 , O_2 , CO_2 a vodní páru), ale také množství polutantů SO_2 , SO_3 , NO_x a organických látek. Tyto složky se dostanou na povrch materiálu ve formě aerosolů a společně s deštěm reagují s povrchem stavebních materiálů. Plynné exhaláty jsou ze vzduchu vymývány deštěm a mlhou a reagují s primárními minerály stavebních materiálů za vzniku sekundárních eflorescentů a subeflorescentů. Na povrchu stavebních materiálů lze pozorovat eflorescenci v různých formách (obr. 3, 4), od jemně krystalických (vatovitých) lehce odstranitelných povlaků, až po těžko odstranitelné solné krusty. Během roku mohou soli vytvářet různé krystalické formy, což je způsobeno změnami vlhkosti okolní atmosféry (Zehnder 1996). Podle Winklera (1994) je za nejnebezpečnější považován SO_2 .

Soli krystalizují v momentě, kdy koncentrace roztoku přesáhne hodnotu rozpustnosti soli při dané teplotě. Koncentrace solí se zvyšuje odpařováním vody z roztoku. Krystaly postupně narůstají na stěny a vyplňují postupně stěny pórů a prasklin a současně jejich krystalizační tlak může vyvolávat ruptury pórů a kapilár.

Řada solí je schopna vázat ve své krystalové mřížce určitý definovaný počet molekul vody a vytvářejí tzv. hydráty. Soli, které jsou v dehydrované podobě, přijímají během svého vývoje vodu a vznikají minerály s vodou krystalově vázanou. Přechod z jedné hydratované formy do druhé je vždy spojen s vázáním určitého počtu molekul vody, nebo naopak jejich ztrátou. Hydratované molekuly solí mají větší objem a jejich přechody v pórovém systému stavebních materiálů jsou spojeny s poměrně velkými hydratačními tlaky. Proces hydratace nebo dehydratace je daný stabilitou hydratované formy soli v určitých klimatických podmínkách a závisí na teplotě a relativní vzdušné vlhkosti okolního prostředí. Z hlediska poškozování zdiva jsou podle Bayera (2000) nejnebezpečnější ty soli, u kterých dochází k hydrataci při běžných teplotách, jako např. u síranu sodného, uhličitanu sodného nebo dusičnanu vápenatého (obr. 5).



Winkler a Singer (1972) experimentálně spočítali hydratační tlak sádrovce ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) za podmínek rozdílné teploty a relativní vlhkosti. Tab. 1 a obr. 6 vyjadřují vztahy mezi hydratačním tlakem, teplotou a relativní vlhkostí. Uváděné maximální hodnoty platí pro ideální podmínky v uzavřeném pórovém systému. Nízké teploty a vysoká relativní vlhkost produkují nejvyšší hydratační tlaky, zatímco při vysokých teplotách a nízkých RH působí nízké hydratační tlaky (Winkler – Singer 1972).

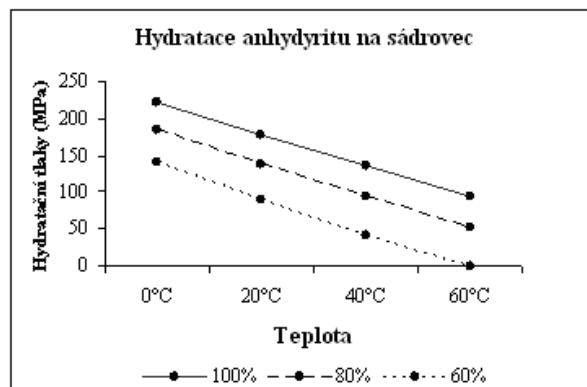
CaSO ₄ x1/2H ₂ O to CaSO ₄ x2H ₂ O (Formování sádrovce)				
	0°C	20°C	40°C	60°C
100%	2190	1755	1350	926
80%	1820	1372	941	511

Tab. 1 – Vztahy mezi hydratačním tlakem, teplotou a relativní vlhkostí na příkladu síranu vápenatého. Experimentální hodnoty, spočítáno Winklerem – Singerem (1972).

Tab. 1 – Relationship between hydration pressure of soil, temperature and relative moisture. Experimentally data calculate according to Winkler – Singer (1972).

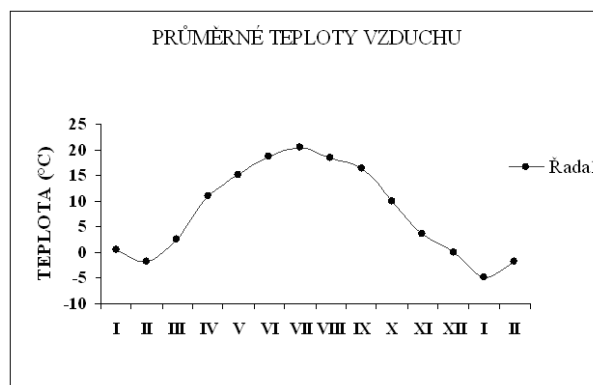
V ročních obdobích (jaro 2005 – zima 2006) bylo prováděno monitorování eflorescentů na poškozeném zdivu hradu Veveří. Obr. 7 a obr. 8 dokládají změny teploty a relativní vlhkosti v průběhu sledovaného období. Soli byly studovány na čtyřech, ve stavebním objektu různě situovaných zdech. Expozice odběrových míst byla volena tak, aby se uplatnily rozdílné klimatické vlivy a současně rozdílný podkladový materiál. Odlišný byl i výškový dosah eflorescentů, sledována byla i návaznost přímého kontaktu stavebního zdiva s geologickým podložím.

K identifikaci eflorescentů a jejich poměrného zastoupení byla využita RTG analýza a elektronová mikroskopie.

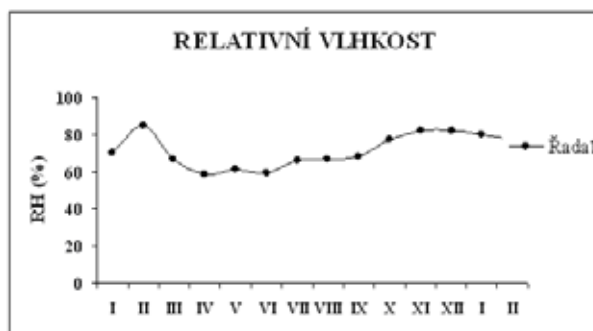


Obr. 6 – Vyjádření experimentálně spočítaných hydratačních tlaků za podmínek rozdílné teploty a relativní vlhkosti (RH), Winkler – Singer (1972).

Fig. 6 – Experimentally determinate of hydration pressure in viable temperature and relative humidity, Winkler – Singer (1972).



Obr. 7 – Průměrné teploty vzduchu ve studované oblasti. Fig. 7 – Average temperatures in study locality.

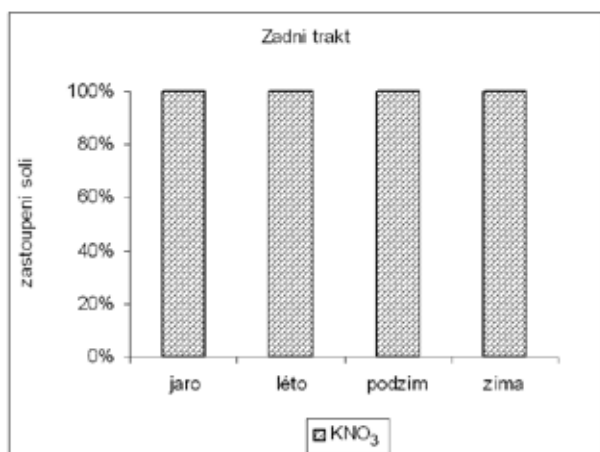


Obr. 8 – Průměrné relativní vlhkosti ve studované oblasti. Fig. 8 – Average Relative humidity in study locality.

Výsledky studia prokázaly, že studované eflorescenty tvoří vodorozpustné soli, které jsou schopné hydratace. Část z nich spadá mezi hygroskopické látky, které přijímají vodu ze vzdušné vlhkosti a zadržují ji v kapalně formě (tzv. hygroskopická nasákavost).

Na cihlovém zdivu zadního traktu, ve výšce od 1,5 m do 2 m nad úrovní terénu, existovala po celou dobu monitorování (pod odpadanou omítkou) solná krusta tvořená pouze KNO_3 (obr. 9). Protože tento trakt sloužil

v minulosti pro ustájení koní, je pravděpodobné, že zdrojem potřebného dusíku byla močovina.

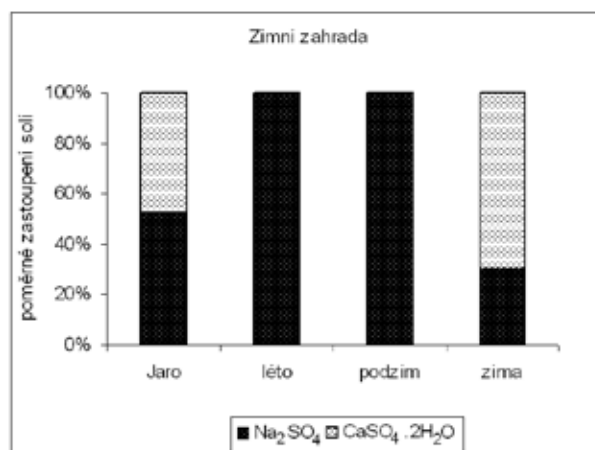


Obr. 9 – Chemické složení eflorescentů na zdivu Zadního traktu.
Fig. 9 – Chemical composition of efflorescence on the masonry in Zadní trakt.

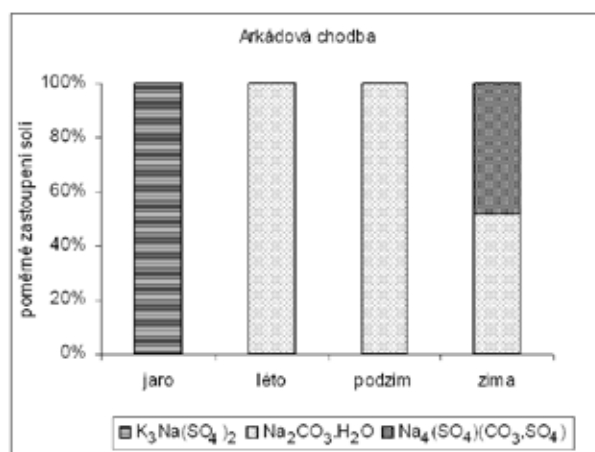
Na cihlovém zdivu dalšího odběrového místa byly již identifikovány chemicky rozdílné soli. Během celého roku jsou přítomné efloresceny thenarditu (Na_2SO_4). V průběhu jara a podzimu jej doprovází sádrovec $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (obr. 10), který je zastoupen od 50 do 70 % obj. Soly byly odebrány 0,5 m nad terénem, kde studované zdivo je v přímém kontaktu s půdou. Odběrové místo je po většinu dne osluněné a bylo ovlivněno přímými dešťovými srážkami.

Efloresceny byly studovány rovněž na cihlovém zdivu arkádové chodby. Ta je po většinu dne vystavena slunečnímu záření a současně je ovlivňována přímými dešťovými srážkami. Naopak, vzhledem k dobře zachované kamenné dlažbě, není zdivo v přímém kontaktu s půdou. Arkádová chodba byla v 80. letech opatřena betonovým nástřikem. Zbytky betonu se na zdivu vyskytují i v současné době. Chemické složení eflorescentů na zdivu arkádové chodby je variabilní. Na jaře 2005 byl identifikován pouze apthitalit ($\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$), v létě a na podzim byl stanoven thermonatrit ($\text{Na}_2(\text{CO}_3) \cdot (\text{H}_2\text{O})$). V zimních měsících byla prokázána přítomnost thermonatritu a burkeitu $\text{Na}_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)_2$. Poslední dvě jmenované soli se na zdivu vyskytovaly v poměru 1:1 (viz obr. 11).

Dalším odběrovým místem eflorescentů byly pískovcové kvádry spodní části oblouků mostní konstrukce. Zdivo pod mostní konstrukcí je z lomového kamene (granity, droby a pískovce). Je ovlivňováno prosakujícími vodami (chybí izolační vrstva mostovky). Většinu dne je studované místo osluněno. Nejvíce poškozen je jemnozrný pískovec, jehož efloresceny byly monitorovány. Z obr. 12 je patrné, že na jaře a v zimě se vedle sebe vyskytují trona ($\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) a thermonatrit. Trona zaujímá v tomto období kolem 50 % a thermonatrit asi 40 % z celkového zastoupení solí. Zbýlých 10 % připadá na jaře arcanitu (K_2SO_4), v zimě apthialitu ($\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$). V letním a podzimním období je minerální složení eflorescentů velmi podobné: 80–90 % tvoří trona, kterou doprovází apthialit.



Obr. 10 – Chemické složení eflorescentů na cihle. Zimní zahrada.
Fig. 10 – Chemical composition of efflorescence on the brick masonry. Zimní zahrada.



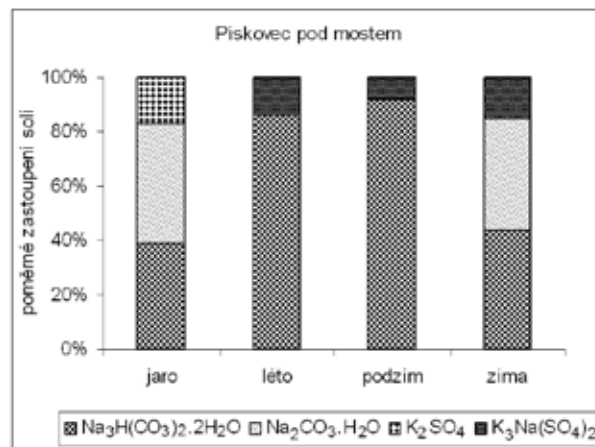
Obr. 11 – Chemické složení eflorescentů na cihle. Arkádová chodba.
Fig. 11 – Chemical composition of efflorescence on the brick masonry. Arkádová chodba.

Mezi hygroskopické soli, vyskytujících se v rámci eflorescentů zde patří např. KNO_3 (niter) a K_2SO_4 (arcanit) a Na_2SO_4 (thenardit). Hygroskopické vlastnosti těchto eflorescentů se významně uplatňují při degradaci stavebních materiálů. Jejich přítomnost vede ke zvýšení přirozené vlhkosti materiálu až do té míry, že lze neustále pozorovat vlhké šedé mapy. Pouze v extrémně teplých měsících mohou stěny na čas vyschnout, ale se změnou vzdušné vlhkosti se krystalizační cykly obnovují. Rovnovážné relativní vlhkosti některých roztoků nasycených solí jsou uvedeny v tab. 2. Soly se rozpouštějí a znovu krystalizují. Winkler (1994) např. uvádí, že i v průběhu jednoho dne se tyto procesy mohou vícekrát opakovat.

Z provedeného studia stavebních materiálů hradu Veveří vyplynulo, že z použitých lomových kamenů je již makroskopicky patrné nejvýraznější poškození a eflorescence u pískovců. V rámci eflorescentů jsou nejčastěji zastoupeny vodorozpustné soli schopné hydratace a současně tvorby vícečetných hydrátů. Vedle nich se

Vzorec soli	Rovnovážná relativní vlhkost (%) při teplotě 20°C
K_2SO_4	97%
KNO_3	93%
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	92%
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	87%
KCl	84%
Na_2SO_4	81%
NaCl	75%
$NaNO_3$	74%
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	50%
$K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	43%
$CaCl_2 \cdot H_2O$	29%

Tab. 2 – Rovnovážné relativní vlhkosti některých nasycených roztoků solí (Bayer 2000).
Tab. 2 – Balance relative humidity of some saturated salt solution (Bayer 2000).



Obř. 12 – Chemické složení eflorescentů na pískovcovém bloku pod mostem.
Fig. 12 – Chemical composition of efflorescence on the sandstone block.

objevují minerály spadající do skupiny hygroskopických solí, které zvyšují přirozenou vlhkost materiálů. Pestrost a proměnlivost minerálních paragenéz eflorescentů odráží

intenzitu a návaznost degračních procesů v místech expozice a okolních klimatických podmínek.

Poděkování

Studie byla vypracována pro potřeby záměru MSM 0021622418 „Dynamická geovizualizace v krizovém managementu“ a grantového projektu GAČR 103/06/1801 „Analýza spolehlivosti vlastností stavebních materiálů a konstrukcí s přihlédnutím k časově proměnným vlivům“.

Literatura

Balík, L. (2004): Využití elektroosmózy k dodatečnému vysušování zdiva. – MS, Disertační práce. 999999 České vysoké učení technické. Praha.

Bayer, K. (2000): Zasolení zdiva – zdroje a mechanismy působení vodorozpuštěných solí. – Litomyšl.

Demek, J. – Balatka, B. – Buček, A. – Czudek, T. – Dědečková, M. – Hrádek, M. – Ivan, A. – Lacina, J. – Loučková, J. – Raušer, J. – Stehlík, O. – Sládek, J. – Vaněčková, L. – Vašátko, J. (1987): Zeměpisný lexikon ČSR. Hory a nížiny. – Academia. Praha.

Fedor, P. (2002): Státní hrad Veveří – Celková obnova a rehabilitace. – <http://www.pamatkybrno.cz/veveri/index.cz.html>

Gregerová, M. (1996): Petrografie technických hmot. – Masarykova univerzita. Brno.

Kroupa, P. (1999): Hrad Veveří – stavebně historický průzkum I. etapa. – Památkový ústav. Brno.

Mamillan, M. (1981): Connaissances actuelles des problemes de remontees d'eau par capillarite dans les murs. The conservation of stone II. Cent par la Conservazione delle Sculture all Aperto, pp 59-72. Bologna.

Šráček, O. – Kuchovský, T. (2003): Základy hydrogeologie. – Masarykova univerzita. Brno.

Teplý, B. (1997): Konzervování a restaurování kamene. – Nadace střední průmyslové školy kamenické a sochařské. Hořice v Podkrkonoší.

Winkler, E. M. (1994): Stone in Architecture: properties, durability. – University of Notre Dame. USA.

Winkler, E. M. – Singer, P.C. (1972): Crystalization pressure of salts in stone and concrete. – Geol Soc Am Bull 83 (11), pp 3509-3514.

Zehnder, K. (1996): Gypsum efflorescence in the zone of rising damp. Monitoring of slow decay processes caused by crystalization salt on wall painting, pp 1669-1678. Berlin.