



národní
úložiště
šedé
literatury

**Metodika pro určení mezí a intervalů významných materiálových charakteristik
opravných materiálů a technologií pro kompatibilní zásah**

Tišlová, R.
2016

Dostupný z <http://www.nusl.cz/ntk/nusl-261491>

Dílo je chráněno podle autorského zákona č. 121/2000 Sb.

Tento dokument byl stažen z Národního úložiště šedé literatury (NUŠL).

Datum stažení: 24.05.2024

Další dokumenty můžete najít prostřednictvím vyhledávacího rozhraní nusl.cz .

Průvodní zpráva k metodice:

Metodika pro určení mezí a intervalů významných materiálových charakteristik opravných materiálů a technologií pro kompatibilní zásah

I. Cíl metodiky

Základní cíle předkládané metodiky byly definovány takto:

Vytvořit přehled významných materiálových charakteristik, které jsou určující pro hodnocení opravy a technologií připravovaných v souvislosti s připravovaným restaurátorským nebo konzervátorským zásahem na památkových objektech a předmětech kulturní povahy. Tyto vlastnosti budou popsány pro základní anorganické porézní stavební materiály (kámen, malta, zdivo apod.) a to pro čtyři základní konzervační/restaurátorské zásahy: čištění, konsolidace, doplnění chybějícího materiálu umělým kamenem nebo maltou a hydrofobizace povrchu.

Součástí této části metodiky je také odkaz na standardy, dle kterých se daná charakteristika aktuálně stanovuje. U uvedených metod jsou diskutovány možnosti i limity provedení testů a postupů stanovení, příp. jsou doporučeny alternativní postupy analýz či zkoušek, zejména z ohledu jejich proveditelnosti *in-situ* bez invaze do objektu.

Stanovit meze a intervaly vybraných materiálových charakteristik, na základě studia publikované odborné literatury vyhledat kritéria pro jejich hodnocení a stanovit jejich meze pro tzv. kompatibilní zásah. Určení těchto mezí je snaha o kontrolu opravného zásahu, jehož cílem je provést opravu v nejšetrnější míře vůči opravovanému materiálu. Pokud bude oprava provedena kvalitně, v souladu s vlastnostmi substrátu, znamená to v konečném důsledku redukci zásahů do objektu, které by bylo nutné provést v případě nevhodně provedené opravy. V konečném důsledku vede takový zásah ke značné ekonomické úspoře nákladů.

Ověřit meze a intervaly významných materiálových charakteristik opravných materiálů na základě provedených laboratorních měření či ze studia reálných příkladů v terénu, na kterých bylo možné provést hodnocení opravných zásahů. Vzhledem k rozsahu problému bylo ověření intervalů provedeno zejména pro mechanické charakteristiky a to pro dva dílčí příklady:

- **Hodnocení účinku konsolidačních prostředků** - pro strukturální zpevnění historických omítek (laboratorní studie)
- **Hodnocení opravných směsí (umělého kamene) pro kutnohorský vápenec**, který se využíval jako tradiční stavební a sochařský materiál zejména v oblasti středních Čech. Na modelových příkladech z praxe bylo možné porovnat vlastnosti *in-situ* v minulosti užitých opravných směsí a

diskutovat jejich kompatibilitu jednak vzhledem ke stavu samotných doplňků a také jejich účinku na objekt. U kutnohorského vápence byla provedena další laboratorní studie, která reprezentovala druhý typ modelové situace, ve které mohou být výsledky metodiky uplatněny. Příkladem může být projekt obnovy, ve kterém je nutné navrhnout opravný materiál pro daný typ horniny s charakteristickými vlastnostmi. Laboratorní studie byla, pro zachování konzistence v rámci metodiky, provedena na kutnohorský vápenec. Pro jeho opravu byla na základě znalosti horniny navržena a otestována sada opravných směsí (umělého kamene) s různým typem minerálního pojiva. Tvárné směsi byly hodnoceny na základě srovnání významných materiálových charakteristik s doplňovaným materiálem, které navrhuje metodika. U vybraných mechanických charakteristik (pevnosti) byla provedena diskuse intervalů možných odchylek těchto charakteristik vzhledem ke kritériím, které uvádí předkládaná metodika.

Příkladové studie nejsou součástí obecné statě metodiky, ale jsou samostatně umístěné v *Příloze* metodiky.

II. Popis metodiky

Materiály a postupy pro opravu historických poréznicích anorganických materiálů musí splňovat vysoké nároky na kvalitu zásahu. Obecně tyto nároky zahrnují požadavky na technickou stránku (zvládnutí původně užitých technologie, schopnost a kvalita řemeslného provedení opravy), estetické kvality (kvalita výtvarného zpracování opravy jako takové, ale i její provedení vzhledem k celému objektu umístěného v daném prostředí). Neméně důležitá je volba vhodného materiálu, který se v ideálním případě blíží materiálové skladbě originálu. V konzervátorské/restaurátorské praxi nelze vždy toto tzv. materiálové hledisko zcela naplnit - pro opravy anorganických poréznicích materiálů je běžnou praxí užívání moderních prostředků na bázi syntetických či přírodních makromolekulárních látek, příp. nejsou historicky užitými materiály k dispozici a jedinou možností je provést opravu dostupnými materiály. Hodnocení opravného zásahu na základě skladby materiálu se v takových případech přesouvá do oblasti hodnocení jejich účinku, které se zjišťuje na základě posouzení změny fyzikálně-mechanických vlastností před a po provedení opravy.

V současné praxi obnovy jsou opravné materiály a postupy navrhovány buď intuitivně, na základě osobní zkušenosti, nebo jejich výběr podléhá hodnocení technického (dobrá zpracovatelnost, jednoduchost přípravy, nenáročnost údržby po aplikaci) nebo estetického hlediska (barva, textura, aj.). Opačným příkladem řešení opravy je omezit výběr opravného materiálu pouze na hodnocení materiálových charakteristik, které jsou v reálných podmínkách, jak zjištěno ze studia průzkumů restaurátorských dokumentací, stanovovány pouze v omezené míře, často bez kritické analýzy a rozvahy o důležitosti dané charakteristiky v rámci opravného zásahu.

Z jejich studia se také ukázala neschopnost materiálové charakteristiky vyhodnotit a reflektovat výsledky v rámci samotné opravy.

Z těchto závěrů nutně vyplynula potřeba přehledně zpracovat metodiku pro plánování, provádění a hodnocení postupů a materiálů základních restaurátorských zásahů (čištění, konsolidaci, návrhu opravných materiálů a hydrofobizaci). Metodika popisuje pro jmenované dílčí zásahy výčet významných materiálových charakteristik, jejichž znalost je zásadní pro plánování a hodnocení určitého konzervačního nebo restaurátorského zásahu. Jejich stanovení poskytne restaurátorům a nositelům rozhodování - pracovníkům památkové péče, investorům, vlastníkům památek - orientační návod při řešení průzkumové fáze a to ve vztahu k jejich přínosu při plánování technologie a materiálů obnovy, která je maximálně šetrná a kvalitní k opravovanému historickému materiálu. V dalším kroku budou u rozhodných materiálových charakteristik určeny meze, v jakých se vlastnosti historického materiálu po zásahu mohou odchylovat od originálu, aniž by byla oprava vůči němu ohrožující. Zavedením takových mezí se snaží předkládaná metodika určit požadavky na prováděnou opravu a zavést konkrétní kritéria pro jejich hodnocení.

III. Srovnání „novosti postupů“ oproti původní metodice, příp. jejich zdůvodnění, a jejich srovnání s postupy v zahraničí

Předkládaná metodika představuje ucelený návod pro provádění materiálového průzkumu a hodnocení vybraných restaurátorských postupů a materiálů. Metodika systematicky zpracovává výběr charakteristik, které jsou tzv. rozhodné, tj. důležité pro ohodnocení provedené opravy. Jejich systematický přehled předkládá pro 4 typy restaurátorských zásahů, které tímto komplexním způsobem nebyly na našem území ani v zahraničí takto zpracovány. Dokument z řady sporadicky publikovaných prací samozřejmě vychází, jsou to zejména práce [2,15,16,34-36], které se dílčím způsobem snaží definovat základní požadavky na ohodnocení daného typu opravy (čištění, konsolidace, tmelení, hydrofobizace). Tyto rozhodné charakteristiky byly v následném kroku diskutovány vzhledem k základnímu požadavku na kompatibilitu provedeného zásahu; u dílčích rozhodných charakteristik byly stanoveny meze, ve kterých se charakteristiky pro provedení kompatibilní opravy mohou od opravovaného materiálu odchylovat. Tyto byly převzaty z významných publikovaných prací, které se kompatibilitou opravných zásahů zabývají, dále zpracováním rozsáhlé literární rešerše zdrojů (viz. *Kapitola V - Seznam použité literatury*), které byly kriticky zpracovány do předkládané metodiky. V poslední řadě vychází předkládaná metodika z praktických studií prováděných v rámci projektu autory metodiky, jejichž dílčí výsledky byly publikovány na národní i mezinárodní úrovni s cílem navázat na dlouhodobě řešenou problematiku hodnocení restaurátorských zásahů (viz. *Kapitola VI*).

IV. Uplatnění Certifikované metodiky

Hlavním uživatelem metodiky jsou zejména osoby a instituce, které se podílejí na průzkumové nebo předprojektové fázi přípravy obnovy památkových objektů a předmětů kulturní povahy. Zástupci památkové péče využijí metodiku při přesnějším zadávání zkoušek a analýz materiálových vlastností při dílčích krocích restaurování. Restaurátorům metodika poslouží k efektivnímu provádění průzkumové fáze vedoucí k šetrnému a maximálně efektivnímu provedení restaurátorského či opravného zásahu. Dalšími uživateli mohou být architekti, vlastníci památek, projektanti.

V. Seznam použité související literatury

[1] Science for Conservators, Vol.2, Cleaning, Conservation Science Teaching Serie, 1992, ISBN 9780415071659.

[2] Směrnice WTA 3-9-95-D: Hodnocení očištěných povrchů kamene (bewertung von gereinigten Werksein – Oberflächen).

[3] Bromblet, P., Labouré, M., Oriol, G.: Diversity of the cleaning procedures including laser for the restoration of carved portals in France over the last 10 years. *Journal of Cultural Heritage*. 2003, (4), pp. 17-26.

[4] Gioventù, E., Lorenzi, P.: Bio-removal of black Crust from marble surface: comparison with traditional methodologies and application on a sculpture from the Florence's English cemetery. *Procedia Chemistry* 8 (2013), pp. 123 – 129. Youth in Conservation of Cultural Heritage, YOCOCU 2012.

[5] Ďoubal, J.: Research into the methods of Cleaning the Silicate Sandstones Used for Historical Monuments. In: *Journal of Architectural Conservation*. 2014, roč. 20, č. 2

[6] Sabatini, G., Giamello, M., Pini, R., Siano, S., Salimbeni, R., Laser cleaning methodologies for stone facades: laboratory analyses on lithotypes of Siena architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 1, 2000, pp. 9-19.

[7] Salimbeni, R., Pini, R., Siano, S., Calgano, G., Assessment of the state of conservation of stone after laser cleaning comparison with conventional cleaning results on a two-decade follow up. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 1, 4, 2000, pp. 385-391.

[8] Carvalhão, M., Dionísio, A.: Evaluation of mechanical soft-abrasive blasting and chemical cleaning methods on alkyd-paint graffiti made on calcereous stones. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 16, 4, 2015, pp. 579-590.

- [9] Slížková, Z. a kol.: Metodika pro určení rozhodných materiálových charakteristik historických materiálů pro plánování restaurátorského zásahu. Metodika vypracovaná v rámci projektu MK ČR NAKI DF12P01OVV018.
- [10] Arkarazo, I. M., Sarmiento, A., Usobiaga, A., Angulo, M., Etxebarria, N., Madariaga, J.M.: Thermodynamic and Raman spectroscopic speciation to define the operating conditions of an innovative cleaning treatment for carbonated stones based on the use of ion exchangers – A case study. *Talanta*, Vol. 75, 2, 2008, pp. 511-516.
- [11] S.S. Potgieter-Vermaak, S.S., Godoi, R.H.M., Van Grieken, R., Potgieter, J.H., Oujja, M., Castillejo, M.: Micro-structural characterization of black crust and laser cleaning of building stones by micro-Raman and SEM techniques *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol 61, 11–12, 2005, pp. 2460-2467
- [12] Enrico Quagliarini, E., Bondioli, F., Goffredo, G. B., Cordoni, C., Munafò, P.: Self-cleaning and de-polluting stone surfaces: TiO₂ nanoparticles for limestone. *Construction and Building materials*. Vol. 37, 2012, pp. 51-57.
- [13] Siedel, H., Neumeister, K., Gordon Sobott, R. J.: Laser cleaning as a part of the restoration process: removal of aged oil paints from a Renaissance sandstone portal in Dresden, Germany. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 4, 1, 2003, pp.11-16. *Lases in the Conservation of Artworks - LACONA IV*.
- [14] Drdácký, M., Lesák, J., Rescic, S., Slížková, Z., Tiano, P., Valach, J.: Standardization of peeling test for assess the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces. *Materials and Structures*, 45, 4, 2012, pp. 505-520.
- [15] Sasse, H.R., Sneath, R.: Evaluation of stone consolidation treatments, *Science technology for Cultural Heritage*, 5 (1), 1996, pp. 85-92.
- [16] Delgado Rodriguez, J., Grossi, A.: Indicators and ratings for the compatibility assessment of conservation actions. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 8, 2007, pp. 32-43.
- [17] Heidingsfeld, V.: Technologické aspekty zpevňování omítek. In: *Křivoklát 2004: Zpevňování historických omítek*. Odborný seminář STOP. Praha, 2004, s. 8.
- [18] Tišlová, R., Machačko, L.: Nové možnosti zpevňování omítek. In: *Sborník z konference Fórum pro konzervátory-restaurátory*, 2014, pp. 28-34.

- [19] Karatasios, I., Theoulakis, P., Kalagri, A., Sapalidis, A., Kilikoglou, V.: Evaluation of consolidation treatments of marly limestones used in archeological monuments. *Construction and Building Materials*, 23, 2009, pp. 2803-2812.
- [20] Ferreira Pinto, A.P., RDelgado Rodrigues, J.: Consolidation of carbonate stones: Influence of treatment procedures on the strengthening action of consolidants. *Jornal of Cultural Heritage*, 13, 2012, pp. 154-166.
- [21] Kociánová, I.: Restaurování centrálního výjevu na klenbě kaple sv. Isidora v Křenově. 2013. Diplomová práce na Fakultě restaurování Univerzity Pardubice. Vedoucí práce Jan Vojtěchovský.
- [22] Slížková, Z., Frankeová, D., Drdácký, M.: Strengthening of por lime mortar with consolidation agents. The 3rd Historic mortar conference. Glasgow: University of the West Scotland, 2013. ISBN 978-1-903978-44-3.
- [23] Slížková, Z., Frankeová, D.: Strengthening of Weak historic Renders with Traditional nad Innovated Consolidation Treatment. In: Náprstek, Jiří a Cyril Fischer, Engeneering Mecahnics 2015. 21st International Conference, May 11-14, 2015, Svratka, Czech Republic. Extended abstract. Pp. 282-283. ISBN 978-80-86246-42-0.
- [24] Macounová, D.: Restaurování vápencové sochy světice č. 1 s využitím nanosuspenzí na bázi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /Zhodnocení možností využití nanosuspenzí na bázi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pro konsolidaci organodetrického vápence v porovnání s běžně používanými prostředky na bázi TEOS; Rozšířená restaurátorská zpráva. Diplomová práce na Fakultě restaurování Univerzity Pardubice.
- [25] Ziegenbalg, G., Piascinski, E.: The combined application of calcium hydrox nano-sols and silici acid esters – A promising way to consolidate stone and mortar, In: Proceeding of the 12th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 2012, Collumbia University, New York.
- [26] Myrin, M., Malaga, K.: A case study on the evaluation of consolidation treatments of Gotland sandstones by use of ultrasound pulse velocity measurement. *Heritage, Weathering and Conservation – Fort, Alvarez de Buergo, Gomez-Heras and Vazquez-Calvo (eds.)*, Taylor and Francis Group, London, 2006, pp. 749-755. ISBN 0-415-41272-2.
- [27] Svahn, H.: Non-destructive Field tests in Stone Conservation. Field and laboratory Tests. Final Report for the Research and Development Project. 2006.
- [28] Delgado Rodrigues, J., Costa, D., Schiavon, N.: Spatial distribution of consolidants in granite stones, in: Proceedings of the EC workshop, Santiago de

Compostela (Spain), November 28-30 1994, Published by the European Commission. Directorate-General XII. Science, Research and Development, 1996, pp. 331–336.

[29] Isabaert, A., Van Parzs, L., Cnudde, V.: Composition and compatibility requirements of mineral repair mortars for stone – A review. *Construction and Building Materials*, 59, 2014, pp. 39-50.

[30] Faria, P., Silva, V.: Natural hydraulic lime mortars: influence of the aggregate 3rd Historic Mortars Conference, September 2013, Glasgow, Scotland, pp. 1-8.

[31] Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., Kilikoglou, V.: Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp.1577–1586.

[32] Marques, S.F., Ribero, R.A., Silva, L.M., Ferreira, V.M., Labrichas, J.A: Study of rehabilitation mortars: Construction of a knowledge correlation matrix. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 10, 2006, pp.1894–1902.

[33] Schueremans, L., Cizera, O., Janssen, E., Seréa, G., Van Balen, K: Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects: Research and practice. *Construction and Building Materials*, 25, 12, 2011, pp. 4338-4350.

[34] Van Balen, K. et al.: Procedure for a mortar type identification: a proposal. In: *Proceedings of the RILEM international workshop, vol. 12. historic mortars: characteristics and tests*, RILEM proceedings, Paisley; 1999. p. 61-70.

[35] Groot, C., Ashall, G., Hughes, J.: RILEM TC COM 167: Characterisation of old mortars with respect to their repair. RILEM Report 28, RILEM Publications S.A.R.L., France; 2005.

[36] Van Balen, K., Elsen, J.: RILEM technical committee RMH, repair mortars for historic masonry. local organization Leuven; March 19 and 20, 2009.

[37] www.geology.cz

[38] CSN 733251 Navrhování konstrukcí z kamene

[39] ČSN 721800 Přírodní stavební kámen pro kamenické výrobky. Technické požadavky.

[40] Deliverable D5.11 projektu EC Stonecore 'Stone Conservation for the Refurbishment of Buildings Project funded in the 7. Framework Programme of the European Commission Grant Agreement No: NMP-SE-2008-213651, pp.31.

[41] nepubliková data, Katedra chemické technologie, Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice.

[42] Koch, A., Siegesmund, S.: The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. *Environmental Geology*, 46, 2004, pp. 350-363.

[43] Benavente D., Cultrone, Gómez-Heras, M.: The combined influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones. *European Journal of Mineralogy*, 20, 2008, pp. 673-685.

[44] Hughes, J.J. et al.: Repair mortars for historic masonry. The role of mortar in masonry: an introduction to requirements for the design of repair mortars. RILEM TC 203-RHM. *Materials and Structures*, 45, 2012, pp. 1287-1294.

[45] <http://www.icomos.cz/images/dokumenty/benatska-charta.pdf>

[46] Barbera, G., Barone, G., Mayyoleni, P., Scandurra, A.: Laboratory measurement of ultrasound velocity during accelerated aging tests: Implication for the determination of limestone durability. *Construction and Building Materials*, 36, 2012, pp. 977-983.

[47] Grinzato, E., Marinetti, S., Bison, P.G., Concas, M., Fais, S.: Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones. *Infrared Physics & Technology*, 46, 2004, 63-68.

[48] Theoulakis, P., Moropoulou A.: Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay. *Construction and building materials*, 11, 1997, pp 65-71.

[49] Zanardini, E., Abbruscato, P., Ghedini, N., Realini, M., Sorlini, C.: Influence of atmospheric pollutants on the biodeterioration of stone. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 45, 2000, pp 35-42.

[50] Lanás, J., Alvarez J. I.: Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. *Cement and concrete research*, 33, 2003, pp 1867-1876.

[51] Hydrofobizace stavebních památek – možnosti a rizika. Seminář STOP. Národní muzeum, 2011.

[52] Hydrofobizace stavebních památek – možnosti a rizika. Seminář STOP. Národní muzeum, 2011.

[53] Metodické vyjádření k hydrofobizaci. *Zprávy památkové péče*, 71, 3, 2011, pp 208-209.

[54] Směrnice WTA Merkblatt E 3-17: Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen, 2010.

VI. Seznam publikací, které předcházely metodice a byly publikovány (případně výstupy z originální práce)

Ďoubal, J.: Research into the methods of Cleaning the Silicate Sandstones Used for Historical Monuments. In: *Journal of Architectural Conservation*. 20, 2, 2014.

Ďoubal, J.: Možnosti objektivního hodnocení čištění kamene. In: *Restaurování a obnova uměleckých děl: Čištění uměleckých děl*. Kutná Hora: Arte-fakt, o.s., 2014, pp. 14-21. ISBN 978-80-905924-0-7.

Ďoubal, J.: Srovnání čištění laserem s dalšími metodami čištění na silikátových pískovcích. In: *Interdisciplinarita v péči o kulturní dědictví: Sborník z konference*. Pardubice: Universita Pardubice, 2013, pp. 205-214. ISBN 978-80-7395-6.

Gläser, P.: Několik poznámek k současné praxi čištění kamenosochařských děl. In: *Restaurování a ochrana uměleckých děl. Čištění uměleckých děl*. Kutná Hora : Arte-fakt, 2014, pp. 10-13.

Drdácký, M., Lesák, J., Rescic, S., Slížková, Z., Tiano, P., Valach, J.: Standardization of peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces. *Materials and Structures*, 2012, Roč. 45, č. 4, s. 505-520. ISSN 1359-5997.

Drdácký, M., Slížková, Z.: Enhanced affordable methods for assessing material characteristics and consolidation effects on stone and mortar. *J. Geophys. Eng.* 10, 2013, 6 pp. doi:10.1088/1742-2132/10/6/064005.

Drdácký, M., Slížková, Z.: In situ peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic plaster and render surfaces. *Studies in Conservation*, Vol. 60, 2, 2015, pp.121-130.

Slížková, Z., Drdácký, M., Viani, A.: Consolidation of weak lime mortars by means of saturated solution of calcium hydroxide or barium hydroxide, *Journal of Cultural Heritage* 2014, DOI 10.1016/j.culher.2014.09.003. on line at: <http://authors.elsevier.com/sd/article/S1296207414001150>

Slížková, Z., Frankeová, D.: Strengthening of Weak Historic Renders with Traditional and Innovated Consolidation Treatment. In: Náprstek, Jiří a Cyril Fischer, *Engineering mechanics 2015. 21st International conference*, May 11-14, 2015, Svratka, Czech Republic. Extended abstracts. 1. vyd. Prague : Institute of theoretical and applied mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v.v.i, 2015, s.282-283. ISBN 978-80-86246-42-0.

Macounová, D., Bayer, K., Ghaffari, E., Navrátilová, M., Slížková, Z., Weber, J.: Consolidation testing of porous limestone using lime nanomaterials: optimization, assessment of stone mechanical and structural characteristics. In: Náprstek, Jiří a Cyril Fischer, Engineering mechanics 2015. 21st International conference, May 11-14, 2015, Svratka, Czech Republic. Extended abstracts. 1. vyd. Prague : Institute of theoretical and applied mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v. v. i, 2015, s. 184-185. ISBN 978-80-86246-42-0.

Navrátilová, M., Bayer, K., Ghaffari, E., Macounová, D., Slížková, Z., Weber, J.: Modification of protective lime coating systems for the porous limestone using lime nanomaterials: assessment of mechanical properties and ageing resistance. In: Náprstek, Jiří a Cyril Fischer, Engineering mechanics 2015. 21st International conference, May 11-14, 2015, Svratka, Czech Republic. Extended abstracts. 1. vyd. Prague : Institute of theoretical and applied mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v. v. i, 2015, s. 210-211. ISBN 978-80-86246-42-0.

Slížková, Z., Frankeová, D., Drdácký, M.: Strengthening of poor lime mortar with consolidation agents. The 3rd Historic mortars conference. Glasgow : University of the West of Scotland, 2013 - (Hughes, J.) ISBN 978-1-903978-44-3.[Historic mortars conference /3./. Glasgow (GB), 11.09.2013-13.09.2013].

<http://iscs.icomos.org/pdf-files/NewYorkConf/slizfran.pdf>

Vavřík, D., Jandejsek, I., Slížková, Z.: Observation of lime nanoparticles distribution during evaporation of transportation media. Tomography of materials and structures. Ghent : University press, 2013, s. 285-287 ISBN 978-9-4619713-0-2. International Conference on Tomography of Materials and Structures /1./. Ghent (BE).

Drdácký, M., Slížková, Z.: Lime-Water Consolidation Effects on Poor Lime Mortars. APT Bulletin: Journal of Preservation Technology, 43:1, 2012, pp. 31-36.

Drdácký, M., Fratini, F. ; Frankeova, D. ; Slížková, Z. The Roman mortars used in the construction of the Ponte di Augusto (Narni, Italy) – A comprehensive assessment. Construction and Building Materials 38 (2013) s.1117–1128 <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.044>.

Drdácký, M., Beran, P.: Compatible dilatation Limit of Masonry joint Mortars, Journal of Architectural Heritage, Vol. 4, No. 2, 2010.

Tišlová, R., Novotná, A., Ďoubal, J., Gláser, P.: Optimization of the repair mortar for stone – critical parameters for their compatibility. In: Proceedings of the 16th International Conference of WTA CZ, „CRRB – 16th INTERNATIONAL CONFERENCE ON REHABILITATION AND RECONSTRUCTION OF BUILDINGS” Brno, Czech technical university, Czech Republic, Extended abstract. 1. Vyd. Brno: Czech technical university, 2014, pp. 173-174. ISBN 978-80-02-02539-9.

Tišlová, R., Novotná, A.: Repair formulations for fine-grained stone arte-facts. In: Náprstek, Jiří a Cyril Fischer, Engineering mechanics 2015. 21st International conference, May 11-14, 2015, Svatka, Czech Republic. Extended abstracts. 1. vyd. Prague : Institute of theoretical and applied mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v.v.i, 2015, s.282-283. ISBN 978-80-86246-42-0.

Klisińska, A., Tislova, R., Influence of composition of repair Roman cement mortars on their salt weathering susceptibility. 3rd Historic Mortars Coference, Glasgow, 2013.

Klisińska, A., Tislova, R., The effect of Composition of Roman Cement Repair Mortars on Their Salt Crystallization Resistance and Adhesion, Procedia Engineering 57, 565-571, 2013.

Klisińska, A., Tislova, R., Adamski, G., Kozłowski, R.: Pore structure of historic and repair Roman cement mortars to establish their compatibility, Journal of Cultural Heritage 11, 404-410, 2010.

Tišlova, R., Kozłowska, A., Kozłowski, R., Hughes, D.C.: Porosity and specific surface area of Roman cement pastes, Cement and Concrete Research 39, 950–956, 2009.

Rejman, P.: Petr. Sledování vlivu hydrofobizace na horniny, resp. objekty zatížené vztlínající vlhkostí a vodorozpustnými solemi. Litomyšl, 2006. Bakalářská práce. Fakulta restaurování Univerzita Pardubice.

Hydrofobizace stavebních památek – možnosti a rizika. Seminář STOP. Národní muzeum, 2011.

Metodické vyjádření k hydrofobizaci. Zprávy památkové péče, 71, 3, 2011, PP.208-209.

Metodika pro určení mezí a intervalů významných materiálových charakteristik opravných materiálů a technologií pro kompatibilní zásah

Obsah

I.	ÚVOD	2
I.	CÍL METODIKY	3
II.	VÝZNAMNĚ MATERIÁLOVĚ CHARAKTERISTIKY OPRAVNÝCH MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ	4
III.1.1	Hodnocení účinku čištění – rozhodné charakteristiky pro hodnocení	7
III.1.2	Kritéria pro pozitivní hodnocení čištění – meze rozhodných materiálových charakteristik	9
III.2.1	Hodnocení účinku konsolidace – rozhodné charakteristiky pro hodnocení	13
III.2.2	Kritéria pro pozitivní hodnocení konsolidace – meze rozhodných materiálových charakteristik	15
III.3.1	Hodnocení doplňování porézních substrátů – rozhodné charakteristiky pro hodnocení	21
III.3.2	Kritéria pro pozitivní hodnocení doplňků – meze rozhodných materiálových charakteristik	26
III.4.1	Hodnocení hydrofobizace – rozhodné charakteristiky pro hodnocení	28
III.4.2	Kritéria pro pozitivní hodnocení hydrofobizace – meze rozhodných materiálových charakteristik	29
III.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	32
IV.	SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE A BYLY PUBLIKOVÁNY (případně výstupy z originální práce)	37

Hlavní autor metodiky:

Ing. Renata Tišlová, PhD., kol. autorů
Pracoviště: Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice

Oponenti metodiky

Ing. arch. Miloš Solař
Pracoviště: Generální ředitelství Národního památkového ústavu
Další pracoviště: Slezská univerzita v Opavě

Prof. Ing. Alois Materna, CSc., MBA
Pracoviště: Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě
Další pracoviště: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební

I. ÚVOD

Metodika vznikla v rámci projektu MK ČR NAKI na základě smlouvy č.18/2012/OVV, s identifikačním číslem projektu NAKI DF12P01OVV018 a názvem „Podmínky a požadavky kompatibilní péče o historické anorganické porézní materiály“. Svým obsahem naplňuje *Cíl 1*, dílčí tematické priority programu NAKI: 1.1 „Nemovité kulturní dědictví“, zejména a) vytváření metodik, podkladů, pracovních postupů s využitím moderních technologií a materiálů v procesu zkvalitnění péče o nemovité kulturní dědictví (záchrana, konzervace, rekonstrukce); 1.2 „Movité kulturní dědictví“ zejména a) vytváření metodik, podkladů a pracovních postupů pro využití moderních technologií a materiálů v oblasti ochrany, konzervace a restaurování movitého kulturního dědictví pro jeho uchování a pro zkvalitnění systému péče o památky a sbírkové soubory, včetně knihovních a archivních fondů; 3.3 „Materiály a technologie pro záchranu a zachování kulturního dědictví“ zejména c) optimalizace procesu restaurování, konzervace a oprav hmotného kulturního dědictví; 3.4 „Diagnostika poškozování a životnost objektů kulturního dědictví“ zejména b) vývoj a ověření postupů hodnocení bezpečnosti, trvanlivosti a ekonomických aspektů současných i historických materiálů a technologií pro památkovou péči, d) vývoj odborných postupů záchrany kulturního dědictví ohroženého záměrnými či nezáměrnými hrozbami. Řešiteli metodiky jsou Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i. (ÚTAM AV ČR) a Univerzita Pardubice, Fakulta restaurování Univerzity Pardubice (FR, UPce), koordinujícím řešitelem je Mgr. Petr Gláser za ÚTAM, předchozí koordinaci prováděl Ing. Pavel Beran, PhD.. Na metodice se odborně podíleli Ing. Renata Tišlová, PhD., Ing. Zuzana Slížková, PhD., Mgr. Adéla Novotná, Mgr. Dita Frankeová, Ing. Petr Kuneš, PhD., MgA. Jakub Ďoubal, PhD.. Spolupracující tým má dlouholetou zkušenost se zjišťováním a hodnocením materiálových vlastností anorganických porézních materiálů historických objektů a jejich charakterizací, diagnostikou, a také s přípravou a hodnocením restaurátorských a konzervačních zásahů.

Metodika je určena pro odborníky i zástupce institucí podílejících se na průzkumové nebo předprojektové fázi přípravy obnovy památkových objektů a předmětů kulturní povahy. Metodika je cílena na objekty anorganického původu, z nichž se zaobírá jejich základními typy, tj. kámen, malta, zdivo a uvažuje je v případech, kdy jsou tyto materiály určeny pro pohledovou prezentaci, tj. bez povrchových úprav. V rámci metodiky byla pro tyto základní typy materiálů vytýčena kritéria na provedení čtyř typů nejčastějších zásahů prováděných v rámci restaurátorského zásahu (čištění, konsolidace, doplňování, hydrofobizování). Zástupci památkové péče využijí metodiku při přesnějším zadávání zkoušek a analýz materiálových vlastností u tohoto typu objektů, které předchází uvedeným krokům restaurování. Metodika je dále určena restaurátorům a architektům, kterým text poslouží k efektivnímu provádění nebo zadávání průzkumové fáze vedoucí k šetrnému a maximálně efektivnímu provedení restaurátorského či opravného zásahu. Dalšími uživateli mohou být vlastníci památek, projektanti, technologové.

II. CÍL METODIKY

Základní cíle předkládané metodiky byly definovány takto:

Vytvořit přehled významných materiálových charakteristik, které jsou určující pro hodnocení opravy a technologií připravovaných v souvislosti s připravovaným restaurátorským nebo konzervátorským zásahem na památkových objektech a předmětech kulturní povahy. Tyto vlastnosti byly popsány pro základní typy anorganických porézních stavebních materiálů (kámen, malta, zdivo), které jsou v metodice, pro zjednodušení, uvažovány v situacích, ve kterých jsou takové objekty určeny pro samostatnou prezentaci, bez povrchových úprav (i když by bylo správnější řešit problematiku v souvislostech všech koexistujících materiálů). Požadavky na zásah jsou v metodice opět vymezeny pouze pro čtyři základní konzervační/restaurátorské zásahy: čištění, konsolidace, doplnění chybějícího materiálu umělým kamenem nebo maltou a hydrofobizace povrchu.

Součástí této části metodiky je také odkaz na standardy, dle kterých se daná charakteristika aktuálně stanovuje. U uvedených metod jsou diskutovány možnosti i limity provedení testů a postupů stanovení, příp. jsou doporučeny alternativní postupy analýz či zkoušek, zejména z ohledu jejich proveditelnosti *in-situ*, bez invaze do objektu.

Stanovit meze a intervaly vybraných materiálových charakteristik, na základě studia publikované odborné literatury vyhledat kritéria pro jejich hodnocení a stanovit jejich meze pro tzv. kompatibilní zásah. Cílem určení těchto mezí je snaha o kontrolu opravného zásahu, který má vést k provedení opravy v maximálně šetrné míře vůči opravovanému materiálu. Pokud bude oprava provedena kvalitně, v souladu s vlastnostmi substrátu, znamená to v konečném důsledku redukci zásahů do objektu, které by bylo nutné provést v případě nevhodně provedené opravy. V konečném důsledku vede takový zásah ke značné ekonomické úspoře nákladů.

Ověřit meze a intervaly významných materiálových charakteristik opravných materiálů na základě provedených laboratorních měření či ze studia reálných příkladů v terénu. Na konkrétních příkladech a měřeních může dojít k provedení hodnocení opravných zásahů na základě shromážděných kritérií a jejich následné diskusi. Vzhledem k rozsahu problému bylo ověření intervalů provedeno v omezeném rozsahu, v rámci metodiky došlo zejména k diskusi mechanických charakteristik a to pro dva dílčí příklady:

- **Hodnocení účinku konsolidačních prostředků** - pro strukturální zpevnění historických omítek (laboratorní studie).

- **Hodnocení opravných směsí (umělého kamene) pro kutnohorský vápenec**, který se využíval jako tradiční stavební a sochařský materiál zejména v oblasti středních Čech. Na modelových příkladech z praxe bylo možné porovnat vlastnosti *in-situ* v minulosti užitých opravných směsí a diskutovat jejich kompatibilitu jednak vzhledem ke stavu samotných doplňků, ale také jejich účinku na objekt. U kutnohorského vápence byla provedena další laboratorní studie, která reprezentovala druhý typ modelové situace, ve které mohou být výsledky metodiky uplatněny. Příkladem může být projekt obnovy, ve kterém je nutné navrhnout opravný materiál pro daný typ horniny s charakteristickými vlastnostmi. Laboratorní studie byla, pro zachování konzistence v rámci metodiky, provedena na kutnohorský vápenec. Pro jeho opravu byla na základě znalosti vlastností horniny navržena a otestována sada opravných směsí (umělého kamene) s různým typem minerálního pojiva. Tvárné směsi byly hodnoceny na základě srovnání významných materiálových charakteristik s doplňovaným materiálem, které navrhuje metodika. U vybraných mechanických charakteristik (pevnosti) byla provedena diskuse intervalů možných odchylek těchto charakteristik vzhledem ke kritériím, které uvádí předkládaná metodika.

Příkladové studie nejsou součástí obecné statě metodiky, ale jsou samostatně umístěné v *Příloze* metodiky.

III. VÝZNAMNĚ MATERIÁLOVĚ CHARAKTERISTIKY OPRAVNÝCH MATERIÁLŮ A TECHNOLOGIÍ

Tato metodika se zabývala stanovením rozhodných materiálových charakteristik pro čtyři základní restaurátorské zásahy prováděné na různých typech porézních anorganických materiálů:

- Konsolidaci vápenných (historických) omítek a hornin
- Čištění
- Doplnění vybraných typů hornin umělým kamenem
- Hydrofobizaci hornin a omítek

Pro každou skupinu zásahů byly v odborné literatuře a dosud publikovaných studiích shromážděny charakteristiky použitelné pro jejich hodnocení. Na základě jejich kritické revize byly pro každý typ zásahu vybrány důležité charakteristiky pro hodnocení zásahu, tj. rozhodné (kritické), na základě nichž lze provést hodnocení jakékoliv intervence v souvislosti s konzervátorským/restaurátorským zásahem. Hodnocení se provádí na

základě porovnání změn vybrané vlastnosti materiálu před a po zásahu/opravě. Soubor stanovených kritických vlastností je pro každý typ uvedeného zásahu individuální, avšak obecně, dle hodnocené změny, je lze shrnout do několika skupin:

Charakteristiky popisující látkové složení materiálu - chemické a mineralogické složení všech složek materiálu. Užívá se pro popis složení samotného materiálu, ale i sekundárně přítomných látek, které v materiálu vznikají v důsledku expozice a stárnutí (sekundární produkty vznikají interakcí či přeměnou stávajících složek, účinkem solí, dřívějších restaurátorských oprav, aj.) nebo nastávají po samotné opravě.

Charakteristiky popisující mikrostrukturu materiálu – slouží k popisu mikrostruktury anorganického porézního materiálu (tvar, velikost částic, distribuce, stmelení částic, aj.), studiu a charakterizaci porézního systému (velikost pórů, jejich distribuce), příp. jejich změn v důsledku účinku vnějších podmínek (např. vlhkosti, vodorozpustných solí, mrazu, konzervačních zásahů).

Vlastnosti charakterizující interakci porézního materiálu s vodou, příp. vodnými roztoky - zahrnuje charakteristiky, které se využívají pro stanovení a popisu transportu vody v porézním systému materiálu (nasákání i vysychání) a celkové sorpční kapacity materiálu vůči vodě a vodným roztokům.

Pevnostní charakteristiky - slouží pro stanovení odezvy materiálu na působení různého typu sil. Odezvou může být mez pevnosti, ale i informace o jeho kapacitě danému zatížení odolávat (pružnosti - elasticitě). Pro měření objektů in-situ lze využít neinvazivní metody, které informaci o pevnosti materiálu poskytují nepřímo na základě stanovení jiné veličiny, která je však pro daný porézní materiál charakteristická. Do skupiny těchto charakteristik lze zařadit i adhezi opraveného materiálu k podkladu.

Charakteristiky souvisejících s odezvou materiálu vůči změnám vnějších podmínek – vyjadřují odezvu na změnu vnějších podmínek, kterým jsou objekt či materiál vystaveny. Mezi nejdůležitější charakteristiky patří změny roztažnosti nastávající se změnou teploty nebo vlhkosti, dále pak odolnosti materiálu vůči mrazu a solím. Schopnost odolávat vnějším změnám souvisí s ostatními vlastnostmi – především látkovým složením, mikrostrukturou a pevností a elasticitou materiálu. Tyto vlastnosti, i když by měly sloužit pro posouzení stavu horniny před a po zásahu či hodnocení opravy historického substrátu novým materiálem, nejsou běžně pro hodnocení opravy stanovovány. Zásadním limitem pro jejich stanovení je velké množství vzorků potřebných pro zkoušku.

Charakteristiky pro hodnocení vnějších změn materiálu - při provádění opravných zásahů existuje skupina metod, která je schopna charakterizovat změny na objektu, které lze posoudit vizuálně. Do této skupiny patří např. hodnocení odchylky barevnosti, hloubky penetrace opravného prostředku, aj.

III.1 ČIŠTĚNÍ

V památkové obnově se jedná o proces, kdy jsou z povrchu objektů odstraňovány nežádoucí látky jako depozity, korozní produkty a další nečistoty, které mění vzhled nebo mění přirozené fyzikálně-mechanické vlastnosti objektu nebo zasahují do jeho materiálové podstaty [1]. Příkladem čištění však může být v určitých případech i odstraňování překrývajících nátěrů nebo starších restaurátorských úprav nebo zásahů, o jejichž odstranění je však nutné uvažovat v širokém kontextu hodnot památky, o kterém se zmiňujeme v textu dále. Znečištění

se v případě historických děl z anorganických stavebních materiálů projevuje vznikem povrchových nánosů (usazeniny, nálety, výkvěty), krust, ale i sekundárně vytvořených vrstev a filmů (laky, nátěry, filmy biologického původu, aj.), které v konečném důsledku mohou vést k zaslepení povrchu, jeho zvětrání nebo naopak zpevnění, odlučování nebo dokonce rozrušení ve hmotě materiálu a jeho úbytku.

Čištění při obnově díla představuje zásadní krok, který je ovlivněn řadou přístupů; zásah musí být promyšlen z hlediska filozofie restaurování v rámci vývoje památky a její proměny v čase, důležité je vnímání zásahu z pohledu estetiky díla (stárnutí objektu, vnímání díla v čase a prostoru, 'společenská objednávka'). Neposlední hledisko je technické a technologické, které chápe čištění jako zásah ovlivňující samotné materiálové vlastnosti čištěného objektu. Směrnice WTA 3-9-95 chápe čištění z tohoto pohledu jako proces, kdy dochází k fyzikální, chemické proměně materiálu na povrchu stavební prvků. Účinkem rozličných vlivů na porézní substrát dochází k rozmanitým změnám povrchu či podpovrchových vrstev substrátu; ten se projevuje v makro- i mikroměřítku. Znečištěním může docházet ke změně chemického či látkového složení, mění se struktura materiálu, i jeho morfologie. Očištění materiálu a provedení čištění je však závislá na 'předchozí historii' čištěného objektu [1, 2].

V každém případě je nutné čištění na objektech provádět pouze na základě hlubokého komplexního poznání památky. Z hlediska řešené problematiky je zejména důležité zjištění materiálového složení substrátu a jeho stavu. Totéž platí o vrstvě nečistot – cílem je zjistit původ znečištění, látkové složení, charakter (např. nános, povlak, výkvěty) a odhalit příčiny jeho vzniku. Míra čištění vychází v zásadě z posouzení dvou základních aspektů; první tzv. technologický je založen na posouzení rizik souvisejících se změnami materiálových vlastností podkladu (např. nasákavost, paropropustnost, odezva materiálu na změnu vnějších podmínek, např. teploty, vlhkosti), nebo s ohrožením památky v důsledku zanášení látek pro materiál škodlivých (např. vodorozpustných solí). Druhé hledisko se dotýká výtvarné, památkové a estetické hodnoty památky. Z tohoto hlediska se hodnotí estetické změny, ke kterým v důsledku znečištění dochází – změna barevnosti, potlačení modelace, čitelnosti, tvarové deformace vzniklé v důsledku nestejněoměrného ukládání depozitů (tzv. srážkové stíny), změna barevné koncepce v důsledku překrytí barevných úprav nebo jejich potlačení, příp. odstranění, aj. Z charakterů obou přístupů vyplývá, že zatímco první přístup je možné při dnešním stupni poznání relativně objektivně posoudit, druhé hledisko bude vždy subjektivně ovlivněné dobou a místem, estetickým cítěním a 'úhlem pohledu' hodnotitele. Přitom je nutné zdůraznit, že oba aspekty jsou v případě uměleckých děl stejně relevantní a poměr jejich uplatnění se musí zvažovat individuálně pro každý konkrétní případ.

V současné době existuje široká škála technik čištění anorganických porézních materiálů, od vysoce efektivních, používaných na velkých fasádách, až po velice citlivé a precizní, používané pro čištění jemných sochařských či malířských detailů. Jednotlivé techniky a technologie mají své nesporné výhody a také jistá rizika spojená s jejich aplikací. Při volbě vhodné technologie čištění musí být vždy zváženy všechny aspekty užití dané metody od účinnosti, přes vliv na substrát až po ekonomickou náročnost. Výsledek užití jakékoli z technik je také přímo závislý na osobě provádějící čištění. Je však nutné zdůraznit, že každá

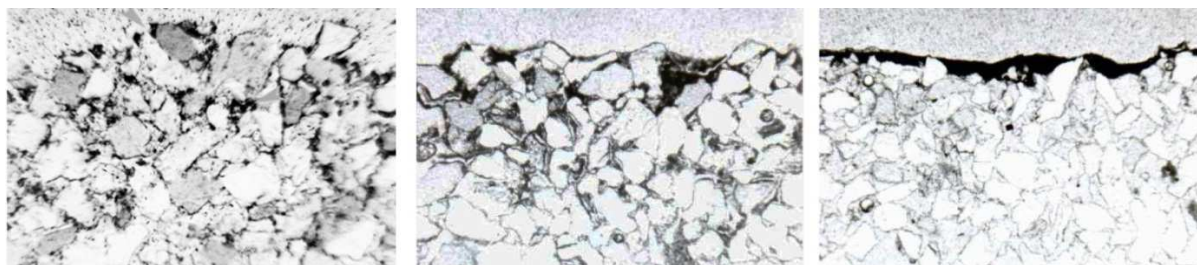
čisticí technika představuje větší či menší riziko poškození památky – vždy totiž dochází v různé intenzitě k odstranění materiálu z povrchu. Pro ohodnocení efektu, účinku a možných rizik dané čisticí metody by proto, před každou aplikací, mělo předcházet otestování metody na ploše historického materiálu s reprezentativním povrchem. To samé platí pro zavedení zcela nové techniky nebo technologie čištění; před aplikací na daný materiál by měla předcházet důkladná analýza dané techniky a odzkoušení způsobu její optimální aplikace na daný materiál.

III.1.1 Hodnocení účinku čištění – rozhodné charakteristiky pro hodnocení

Výsledky čištění, jak vyplynulo z průzkumu restaurátorských dokumentací prováděného v rámci projektu, jsou v praxi restaurátory většinou vyhodnocovány subjektivně na základě vizuálního zkoumání, příp. na základě měření kapilární nasákavosti před a po očištění povrchu. Objektivních možností hodnocení čištění je však více a jsou podrobně popsány v literatuře a také aktuálně představeny v *Metodice pro určení rozhodných materiálových charakteristik historických materiálů pro plánování restaurátorského zásahu*, která také vznikla v rámci tohoto projektu. Metody objektivního hodnocení slouží pro kvantifikování účinku čištění, na základě posouzení změny vybrané charakteristiky. V této metodice byla provedena jejich revize. Pro metodiku byly vybrány tzv. významné charakteristiky, které se pro vyhodnocení čištění nejčastěji využívají a na základě nichž lze vyhodnotit kvalitu provedeného zásahu v komplexním měřítku (*Tab. 1*). Výběr charakteristik byl veden i s ohledem na jejich použitelnost při průzkumech in-situ. U jednotlivých charakteristik jsou uvedeny odkazy na platné normy a postupy, které se pro její stanovení v současnosti užívají. Důležitou součástí jsou tzv. kritéria pro pozitivní hodnocení, která byla vyjádřena jako intervaly daného parametru a vyjadřují požadavky na provedení zásah [3-9].

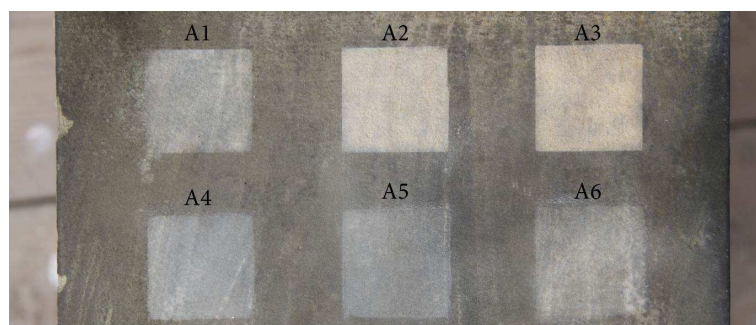
Jak již bylo uvedeno, výběr vhodného čisticího zásahu by měl být prováděn na základě kvalitního poznání substrátu, v případě čištění i samotné vrstvy nečistot. Chemickou i mineralogickou charakteristiku substrátu i samotné vrstvy nečistot, tj. chemické či fázové složení a jejich mikroskopické charakteristiky (např. tloušťku, navázání na substrát, trhliny, porozita, aj.), poskytne široká škála optických metod zkoumání doplněných o analytické metody založené na analýze prvkového a látkového složení. Pro posouzení změn v makroměřítku se provádí zejména vizuální posouzení, pozorování pod stereolupou nebo USB mikroskopem, které jsou běžně prováděné in-situ. Přesnější informace zejména s ohledem na posouzení změn substrátu v mikroměřítku poskytnou mikroskopické metody prováděné na odebraných mikrovzorcích, zpracovaných do nábrusů či výbrusů (*Obr. 1*). Mezi mikroskopické metody zahrnujeme optickou mikroskopii v polarizovaném (PLM) a nepolarizovaném světle, skenovací elektronovou mikroskopii užívanou samostatně pro studium změn na povrchu (změna tloušťky vrstvy nečistot, změny distribuce nečistot, vznik trhlin, aj.), ale také pro zjištění látkového složení, kdy se mikroskopie užívá ve spojení s energiově disperzivní rentgenovou analýzou (SEM-EDX). Tato metoda je určena zejména pro charakterizaci složení vrstvy depositů, hodnocení účinku čištění, chemických změn na

povrchu po užití dané čisticí metody (např. při chemickém čištění, odstraňování krust, nátěrů, aj.). Pro tyto případy lze užít i např. rentgenovou difrakci (RTG) nebo metody molekulové spektroskopie FTIR (infračervenou spektroskopií s Fourierovou transformací) a Ramanovu spektrometrii nebo mikroskopii [10, 11].



Obr. 1 Optická mikroskopie výbrusu, snímek v odraženém světle. Depozice nečistot v podpovrchové zóně (zleva: maletínský pískovec, mšenský pískovec, žlutý pískovec). Na výbrusu lze pozorovat charakter vrstvy nečistot (tloušťka, proniknutí do vrstvy substrátu).

Podrobný popis metod nebyl předmětem předkládané metodiky, jsou však podrobně zmíněny v jiné metodice tohoto projektu autory *Slížková Z. a kol.* [9]. Pro monitoring úbytku materiálu na povrchu se zřídka užívají jiné objektivní metody např. fotogrammetrie nebo rentgenová tomografie (RTG tomografie), které jsou finančně vysoce náročné a v oblasti ochrany památek ne příliš užívané. Jednoduchou metodou pro zjištění úbytku materiálu na povrchu je hodnocení hrubosti povrchu, které se provádí in-situ nebo přes odlitek povrchu pomocí jehlového profilometru. Tato metoda však také nepatří k běžně prováděným.



Obr. 2 Maletínský pískovec – zkoušky čištění mikropískováním s využitím rozdílného tlaku a abraziva. Vizuální hodnocení v makroměřítku.

Častější praxí je hodnocení účinku čištění na základě stanovení fyzikálně-mechanických charakteristik povrchu a jejich změn po očištění. Jedná se zejména o stanovení kapilární aktivity povrchu neboli kapilární nasákavosti, která je zásadní pro obnovení přirozených vlastností, které se týkají transportu vody a vodní páry materiálem. Jejich zlepšení dále ovlivňuje úspěšné provádění dalších restaurátorských zásahů (např. zpevňování, tmelení, hydrofobizace, retušování, aj.). Hodnocení transportních vlastností se provádí stanovením koeficientu kapilární absorpce na laboratorních vzorcích pravidelného tvaru (např. vrtných

jádrech) nebo častěji in-situ pomocí tzv. Karstenovy trubice porovnáním kapilárního toku nebo koeficientu kapilární nasákavosti vodou před a po očištění na daném místě. Další významnou charakteristikou je hodnocení propustnosti pro vodní páru a její změny po očištění. Tuto metodu však nelze provést bez odběru dostatečně velkého množství vzorků a z těchto důvodů se v praxi neuvádí. U čištěného povrchu se stanovuje soudržnost povrchu nebo hrubost pomocí mikroskopických metod nebo stanovením drsnosti povrchu.

Z hlediska estetiky objektu je nedílnou součástí hodnocení barvy. Tento parametr se řídí estetickým subjektivním posouzením v rámci stavu, podmínek a expozice památky (*Obr. 2*). Nástrojem umožňujícím kvantifikovat barevné změny povrchu je spektrofotometrie i když její užití je pro heterogenní středně až hrubozrnné substráty do jisté míry limitováno [12, 13].

III.1.2 Kritéria pro pozitivní hodnocení čištění – meze rozhodných materiálových charakteristik

Vzhledem k typu restaurátorského zásahu značně ovlivněného komplexním přístupem k jeho obnově i subjektivní interpretací díla, které ovlivňuje přístup k jeho očištění, nelze u většiny uvedených charakteristik míru pozitivní intervence přesněji kvantifikovat, tj. zadat přesné intervaly hodnot a jejich odchylky pro kompatibilní zásah. Co může být vyhodnoceno jsou změny vlastností materiálu, které v případě pozitivní intervence mají vždy vést ke zlepšení fyzického stavu díla oproti stavu před očištěním.

Zásady pro hodnocení účinku čištění, které uvádí metodika (*Tab. 1*), vycházejí z požadavků, které již byly v minulosti zpracovány. Společnost WTA, *Vědecko-technická společnost pro sanaci staveb a péči o památky*, vypracovala v roce 1997 technickou směrnici „Bewertung von gereinigten Werkstein - Oberflächen – WTA Merkblatt E 3-9-95“ (Hodnocení očištěných povrchů kamene), která hodnotí opatření pro čištění povrchu staveb a kamene. Systém hodnocení zásahu zavedený směrnicí WTA je založen jednak na posouzení vybraných fyzikálně-mechanických parametrů, ale i hodnocení změn v chemickém složení materiálu a alterací v jeho struktuře i povrchu.

Kvalita provedeného čištění se v praxi nejčastěji hodnotí na základě změny nasákavosti, která by se po očištění měla zvýšit, její míru však nelze přesněji kvantifikovat, neboť míra očištění je závislá na ostatních kvalitách povrchu (např. nese tvar, pod vrstvou nečistot je kámen zcela degradovaný a vrstva nečistot ho zpevňuje, apod.). V praxi se kapilární nasákavost obvykle stanovuje in-situ pomocí Karstenovy trubice, příp. laboratorně na odebraných vzorcích. Měření pomocí Karstenovy trubice díky dostatečně velké měřicí ploše umožňuje měření na různých typech podkladu (tj. i na heterogenních materiálech, středně či hrubozrnných). Limitující je pro ni špatná manipulace obzvláště na málo zpevněných površích degradovaných omítek a hornin. Proto se pro stanovení nasákavosti užívá řada méně problematických metod. Pro orientační stanovení nasákavosti se v praxi využívá jednoduché smočení povrchu a sledování změn na základě tvaru kapky a rychlosti jejího vsáknutí. Novou, zatím velmi málo rozšířenou, metodou je měření nasákavosti pomocí tzv. mikrotrubice, která

je založena na stejném principu jako měření Karstenovou trubicí. Její výhoda spočívá v automatizaci měření, které umožňuje plynulý záznam měření a ve snadné manipulovatelnosti umožňující provést několik měření in-situ. Měření jsou také, oproti klasické metodě, časově nenáročná - dílčí měření je provedeno rychle v rámci několika minut. Nevýhodou je uspořádání měřicího zařízení charakteristické malou styčnou plochou, přes kterou povrch nasává z trubice vodu. Z těchto důvodů nelze spolehlivě měřit např. na heterogenních nebo středně až hrubozrnných substrátech, kde je měření zatíženo charakterem samotného materiálu. I na jemnozrnných a substrátech se doporučuje, pro spolehlivé vyhodnocení, měření několikrát opakovat [9]. Z hlediska mechanismu je zřejmé, že nasákavost se zvýší při zeslabení tloušťky nečistot, příp. při jejím celkovém odstranění. I v tomto případě je míra odstraňování individuální a vždy je nutné zvážit její míru vzhledem k ostatním charakteristikám povrchu (zejména soudržnosti a hrubosti).

Důležitou makrocharakteristikou vzhledem k estetickému hodnocení díla po očištění je posouzení barevnosti povrchu materiálu. Tyto barevné a další změny se v praxi nejčastěji hodnotí vizuálně porovnáním s referenční plochou materiálu (okolní povrch, architektura, ostatní prvky v souboru, doplňky, polychromie, aj.). V případě potřeby objektivnějšího hodnocení je (opět s určitými omezeními danými kvalitou a morfologií povrchu) možné absolutní celkovou barevnou změnu vyhodnotit exaktně pomocí přenosného spektrometru. Odchyly akceptovatelné v rámci provedeného zásahu uvádí literatura v absolutních hodnotách jako změny barevnosti ΔE^* . Pro čištění však, z pochopitelných důvodů, nebyly přesné meze pro pozitivní hodnocení zásahu publikovány. Pro zajímavost, při hodnocení konsolidace a hydrofobizace by se celková změna barevnosti po opravě neměla lišit o více než 3 jednotky (viz. kapitola *III.2, III.4*).

Charakteristika	Označení měřené veličiny/ jednotka	Metody, normy a doporučení pro zkoušení		Kritéria pro pozitivní hodnocení
		<i>In labo</i>	<i>In situ</i>	
Chemická i mineralogická charakteristika (materiálu i nečistot)	-	Optická mikroskopie v polarizovaném i nepolarizovaném světle, Skenovací elektronová mikroskopie s energiodisperzivní analýzou (SEM-EDX), Rentgenová difrakce (RTG)	Mikrochemické zkoušky	beze změny (materiál)
Kapilární nasákavost povrchu	Koeficient kapilární absorpce C ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1/2}$)	ČSN EN 1015-18	ČSN EN 16302	$C_i > C_0$
Mikrostrukturní vlastnosti: tloušťka vrstvy depositů, změny na povrchu po očištění	-	Optická mikroskopie, SEM, RTG tomografie	-	redukce flouščky vrstvy nečistot, bez poruch a změn povrchu
Barva exponovaného (znečištěného) povrchu a referenční barva materiálu (barva lomové plochy materiálu, dohodou stanovená barva)	L^* , a^* , b^* , ΔE , ΔC^*	ČSN EN 15886	-	kritéria nutno definovat individuálně pro daný případ
Povrchová soudržnost (hmotnost odtrženého materiálu)	hmotnost odtrženého materiálu	-	Peeling test ¹⁴	beze změny (materiál)
Hrubost povrchu	hloubka hrubosti R	DIN 4768, 4772, E-DIN 4760 Optická mikroskopie, SEM	-	beze změny (materiál)

Tab. 1 Rozhodné materiálové charakteristiky pro hodnocení čištění. Hodnocení mezi vybraných charakteristik pro kompatibilní zásah - hodnocení změny charakteristik z hlediska možných ohrožení a jejich kompatibility s neošetřeným materiálem. Kritéria pro hodnocení byla shromážděna z literatury [2]. U charakteristik je uvedena měřená veličina pro její stanovení a odkazy a doporučení pro zkoušení. i - povrch ošetřený, 0 - povrch neošetřený.

III.2 KONSOLIDACE

Konsolidací obecně rozumíme obnovení mechanických vlastností degradovaných povrchových i podpovrchových vrstev objektu. Jejím cílem je zpomalit postup degradace památky a ošetřit materiál tak, aby nedošlo k nevratnému smazání dokladů o jeho minulosti příp. jeho dalšímu poškození. K provedení konsolidace může vést u historických objektů několik důvodů; nejvýznamnější je zvětvávání materiálu v důsledku působení atmosférických vlivů. Další příčiny mohou být např. v působení jiných vnějších podmínek – působení biologických organismů, účinek vodorozpustných solí, změna látkového složení původního pojiva nebo předchozí restaurátorské zásahy. V konečném důsledku vedou všechny účinky ke ztrátě pevnosti a soudržnosti materiálu, které se mohou objevit v různých partiích substrátu – na povrchu (odloučení nebo pískovatění povrchu) nebo v hloubce (vznik profilů o různé pevnosti, např. při přítomnosti krust, užití nevhodného konsolidačního prostředku, apod.). Změna pevnosti a soudržnosti v materiálu se projeví změnou vlastností a kvality materiálu. Ve většině případů změny ovlivní komplexní charakter substrátu; kromě estetických kvalit objektu (ztráta modelace povrchu úbytkem materiálu, změna hrubosti povrchu, textury, barevnosti) se proměňují i jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti; kromě pevnosti se mění porozita a s ní související transportní chování vody a vodných roztoků, změna vlastností ovlivní roztažnost materiálů v důsledku změn externích podmínek (vlhkost, teplota). Jedinou možností záchrany objektu je jeho konsolidace. Základní otázkou, kterou je však nutné při jejím provádění zvážit je, co má být na daném substrátu zpevněno a do jaké míry.

Z tohoto hlediska je velmi důležitý výběr vhodné technologie a materiálu, který by se na daný typ substrátu měl použít. Vhodný prostředek by měl účinně zpevňovat daný typ substrátu a dále splňovat další nároky na kompatibilitu: materiálovou a chemickou (ideální je využít prostředek podobného chemického složení jako je samotný substrát nebo je jeho složení ve shodě s podkladem po jeho zreagování v substrátu). Estetická kompatibilita zahrnuje široké spektrum hodnocení optických kvalit zpevňovaného materiálu; konsolidant by neměl zásadně ovlivnit jeho okamžité nebo dlouhodobé optické vlastnosti (otázkou však je, nakolik je degradovaný substrát původním stavem, který by se musel respektovat). Ideální řešení je z tohoto hlediska porovnávat estetické změny s nedegradovaným materiálem (např. u kamene a omítek na lomu, v defektech nebo na jádrových sondách). Posledním požadavkem je dostatečná, ale vůči substrátu přiměřená konsolidace, která se projeví změnou ve fyzikálně-mechanických vlastnostech, ale jen v určitých mezích, které neovlivní následnou životnost památky. Z tohoto pohledu je třeba dbát na homogenní distribuci konsolidantu, aby nedocházelo ke vzniku zón s odlišnou mírou zpevnění, příp. zpevněných krust na povrchu nebo v podpovrchových vrstvách. Důležitým kritériem při samotném výběru konsolidantu je také možnost jeho odstranění při budoucích opravách nebo restaurování. Tento požadavek lze, zvláště u anorganických konsolidantů, dodržet pouze výjimečně, neboť konsolidant je z látkové povahy často chemicky nebo fyzikálně ukotven na matici materiálu. Také odstranění konsolidantů na bázi syntetických polymerů je vždy komplikované a málo účinné a nelze ho vždy provést zcela čistým způsobem bez namáhání substrátu [15-18]. Účinek konsolidantu a

hloubku penetrace lze ovlivnit také použitou technologií; běžně se konsolidanty aplikují postříkáním, nátěrem nebo metodami založenými na kapilární aktivitě (poléváním, zkrápěním nebo vzlínáním) [19-21].

Jen omezená škála produktů vyhovuje uvedeným kritériím, což platí zvláště při jejich použití na porézní materiály s historickou hodnotou vyznačující se často rozličnou materiálovou i technickou stavbou a kompozicí (kámen, omítka, štuk, nástěnná malba). V případě porézních materiálů s barevnou povrchovou úpravou se řešení konsolidace ještě mnohem více komplikuje; při provádění zpevnění se ještě více dbá na všechna uvedená hlediska, zvláště pak optickou stabilitu a míru zpevnění, která by vždy měla být provedena nejen úměrně jejímu stavu a poškození, ale i vzhledem k povrchovým vrstvám a jejich stavu. V současné době jsou pro konsolidaci porézních anorganických materiálů používány prostředky na bázi anorganických i makromolekulárních látek. Pro zpevnění nástěnné malby jsou užívány prostředky na bázi syntetických nebo přírodních polymerů, které však nemají stejnou materiálovou skladbu jako hlavní složky barevného souvrství. Jejich výhodou je však vysoký účinek, snadná aplikace a vlastnosti, které umožňují široké spektrum aplikací (od zpevnění zpráškovatělé malby po zajištění malby uvolňující se od podkladu v šupinách) [21]. U omítek či hornin spočívá současná praxe zejména v používání anorganických konsolidantů, zejména esterů kyseliny křemičité a vodné disperze SiO_2 (vodního skla), nejrůzněji se také používá vápenná voda [22-24]. Z výčtu prostředků užívaných pro konsolidaci či fixaci výše uvedených porézních substrátů je zřejmé, že každý z uvedených prostředků má svoje limity a nedostatky, které souvisí s jeho materiálovou skladbou, účinkem či dosaženým konsolidačním efektem nebo možnostmi jejich odstranění při případném re-restaurování. Alternativu k výše uvedeným prostředkům tvoří nová skupina látek - nanosuspenze hydroxidu vápenatého. Jedná se o suspenze částic hydroxidu vápenatého o velmi malé velikosti (v řádu desítek až stovek nm), které jsou dispergovány v organickém rozpouštědle, nejčastěji nízkomolekulárním alkoholu. Díky svému chemickému složení jsou tyto konsolidanty primárně vhodné pro konzervaci vápenných materiálů – omítek, štuků, hornin, ale také např. nástěnných maleb s vápenným typem pojiva. Pro strukturální konsolidaci karbonátových porézních stavebních materiálů se testují kombinace nanosuspenzí hydroxidu vápenatého s estery kyseliny křemičité [21, 24, 25].

III.2.1 Hodnocení účinku konsolidace – rozhodné charakteristiky pro hodnocení

Zpevňování je jedním z důležitých procesů, který zásadně ovlivňuje trvanlivost prováděné opravy; poréznímu materiálu se navrácí jeho struktura, mechanické vlastnosti i funkce. Pokud však není provedena vhodnými materiály s náležitou pozorností a kontrolou, může naopak dojít k poškození památky ne fyzicky při samotné konsolidaci, ale spíše při jejím následném fungování v rámci daných podmínek. Příkladem může být např. plošné užití esterů kyseliny křemičité pro zpevnění porézních materiálů, tj. omítek, kamene, štuky, ale i nástěnné malby a stavebních materiálů. Jejich užívání je dnes rozšířeno z několika důvodů, zejména materiálové kompatibility a vysoké účinnosti prostředků, která však nemusí být ve všech případech

žádoucí. Problém s jejich užitím nastává zejména u silně degradovaných materiálů. Zde jsou běžně využívány ve vysokých koncentracích s cílem maximálně zpevnit substrát, v množstvích neúměrných poškozenému materiálu a jeho původním vlastnostem. Ve většině případů také nedochází ke zjišťování jejich účinku (hloubky penetrace, míry zpevnění, rozdíly ve zpevnění vůči spodním nedegradovaným vrstvám), i když zvláště v případech silně degradovaných materiálů může mít konsolidace za uvedených podmínek fatální následky na památku.

Pro vyhodnocení konsolidace lze využít řady měření, které o účinku konsolidace poskytnou velice přesné informace. Měření se stanovují důležité charakteristiky, které vyjadřují změnu vlastností materiálu (fyzikální, mechanické, optické) a zároveň jsou schopné popsat účinek konsolidačního zásahu na materiál v mikroměřítku. Tab. 2 uvádí jejich přehled pro dva základní typy porézních materiálů – kamene a malty. Kromě metod užívaných pro stanovení dané materiálové charakteristiky v laboratoři i v terénu je součástí přehledu i hodnocení konsolidace na základě posouzení změny dané vlastnosti před a po konsolidaci. Požadavky na hodnocení konsolidace byly převzaty z relevantní literatury [15, 16] a jsou vyjádřeny u vybraných charakteristik intervaly hodnot změny daného parametru nebo zpracovány krátkým slovním popisem v případech, kdy požadavek nelze kvantifikovat. Citace z jednotlivých zdrojů byly pro přehlednost barevně odlišeny a popsány. V některých případech byly přidány i krátké poznámky autorů, které formou slovního popisu doplňují navržená kritéria o poznatky z praxe nebo reálných příkladů obnovy.

Při návrhu optimálního typu konsolidačního prostředku a technologie se vždy vychází z materiálové podstaty zpevňovaného objektu posouzeného na základě popisu chemického a mineralogického složení substrátu, které se v praxi provádí zejména pomocí mikroskopických technik, termické a silikátové analýzy (omítky) nebo rentgenové difrakce (XRD). Mineralogické složení hornin se nejčastěji vyhodnocuje při petrografickém průzkumu pomocí polarizační mikroskopie (PLM) na výbrusech vzorků, doplněné skenovací elektronovou mikroskopií s energiově-disperzivním analyzátozem umožňují prvkovou analýzu (SEM-EDX). Další možností je využití rentgenové difrakce nebo termické analýzy (TG/DTA/DSC), která stanoví fázové složení např. pojiva omítek, mineralogické složení hornin, stavebních materiálů. Další spektroskopické metody (infračervená a Ramanova spektroskopie) se využívají více pro analýzu organických pŕjiv, ale lze je využít i při látkové charakterizaci materiálů. Kromě samotné charakterizace je nezbytný i popis jejich stavu a příčin poškození. Před konsolidací se provádí charakterizace nepoškozeného a poškozeného substrátu, které se porovnává s výsledkem po konsolidaci. Cílem těchto analýz je popsat stav neošetřeného objektu (hloubka a míra dekoheze, typ poškození, přítomnost sekundárních látek), ale zároveň slouží pro ohodnocení účinku konsolidantu (hloubka penetrace konsolidantu, popis distribuce a efektivita v porézním systému, mechanismus zpevnění, aj.). V praxi se účinek konsolidantů stanovuje zejména na základě hodnocení změn fyzikálních a mechanických vlastností. Z fyzikálních charakteristik jsou zásadní kapilární aktivita, která se hodnotí na základě stanovení kapilárního toku ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$) nebo dle tzv. koeficientu kapilární absorpce vody, který udává příslušná platná norma jako v $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1/2}$. Ideální produkt by měl totiž penetrovat do všech typů pŕrů (musí mít dobrou penetraci i do mikropŕrů) mezi zrny a tak obnovit nebo

zlepšit chemickou kohezi a kapilární vlastnosti substrátu [15]. Kapilární aktivitu lze měřit na vzorcích pravidelného tvaru laboratorně na odebraných vzorcích nebo ji stanovit přímo na objektu měřením pomocí tzv. Karstenovy trubice nebo mikrotrubice (viz. kapitola II.1), hodnocením změny kapilární nasákavosti před a po ošetření.

Efektivita konsolidačního prostředku se hodnotí zejména na základě změny mechanických vlastností, které jsou mírou obnovení koheze materiálu a změn v mikrostruktuře. Hodnocení se provádí na základě měření pevností v tlaku a v tahu za ohybu, příp. měření dynamického modulu pružnosti; pro jejich stanovení se vyžaduje odběr většího množství vzorků, z nichž je nutné připravit vzorky pravidelného tvaru. Alternativou k těmto metodám je využití měření ultrazvukové transmise, která se v současnosti využívá také jako materiálová charakteristika, neboť souvisí s mikrostrukturou a materiálovým složením měřeného substrátu [26-28]. Výhodou této metody je možnost měření in-situ bez invaze do objektu. Pro vyhodnocení je nutné znát rychlost ultrazvukové transmise nedegradovaného materiálu, z jehož hodnoty lze posoudit míru poškození a následný účinek konsolidantu. V praxi se tato metoda využívá při průzkumu a diagnostice stavu porézních anorganických substrátů (zejména kamene, omítek, stavebních prvků) pro detekci prasklin, dutin a skrytých defektů, ale i míry zvětrání a degradace materiálu a jeho změn po konsolidaci. Na základě vyhodnocení průzkumu touto metodou je pak možné vést restaurátorský zásah selektivně na poškozené místo. Součástí vyhodnocení je i posouzení změny barevnosti po konsolidaci a to porovnáním se stavem před konsolidací (příp. nedegradovaného substrátu). Hodnocení se provádí na základě vizuálního posouzení nebo měřením změny barevnosti po opravě pomocí mobilního spektrofotometru měřící celkovou změnu barevnosti ΔE .

III.2.2 Kritéria pro pozitivní hodnocení konsolidace – meze rozhodných materiálových charakteristik

Před hodnocením účinku konsolidantu je nutné nejdříve charakterizovat míru a hloubku poškození na základě chemické a mineralogické skladby degradovaného i nedegradovaného materiálu a jeho mikrostrukturních charakteristik (tloušťky degradované vrstvy, míry poškození, typu tmelu horniny, porozity, přítomnosti krust, apod.). Výsledek konsolidace může být zásadně ovlivněn přítomností jiných chemických látek – vodorozpustných solí, jílových složek v matrici, příp. sekundárně zanesených látek (např. z předchozích restaurátorských zásahů); charakterizace degradovaného materiálu je nutné pozorně provádět také v případě přítomnosti krust, jejichž přítomnost na objektu může zkreslovat skutečný stav materiálu. Při hodnocení aplikačních vlastností konsolidantu se požadavky odvozují na základě několika odlišných přístupů. První odvozuje hloubku penetrace na základě vlastností povrchu, přesněji jeho kapilarity; u méně nasákavých povrchů je minimální požadavek na účinný zásah 1 cm, u více nasákavých povrchů až 3-5 cm. Druhý přístup stanovuje hloubku penetrace paušálně, min. 20 mm. Určité doplnění požadavků na penetraci předkládají autoři metodiky. Důležitých kritériem, více než přesně daná hloubka, je homogenní distribuce

v rámci degradované vrstvy, která zajistí homogenní konsolidantu až k nezvětralému jádru a zabrání vzniku vrstev s odlišnou soudržností.

Pro hodnocení změny mechanických vlastností je hranicí míry zpevnění pevnost nedegradovaného substrátu. Hodnocení autorů [16] stanovuje maximální zvýšení pevnosti o 10% vůči degradovanému substrátu pro zachování kompatibility se zpevňovaným materiálem. Toto hodnocení platí i při změně dynamického modulu pružnosti i jiných charakteristik po konsolidaci: kapilární nasákavosti C , rychlost ultrazvukové transmise v a tepelné roztažnosti α_T . Autoři práce [15] nastavují při hodnocení modulu pružnosti zcela odlišná kritéria; modul pružnosti po zpevnění může dosahovat až dvojnásobných hodnot v porovnání s nezpevněným substrátem. Z pohledů autorů je toto hodnocení vzhledem k míře povolené změny zcela nepřijatelné. I praxe a modelové studie (viz. *Příloha metodiky*) provedené autory na historických omítkách spíše ukazují, že při vyhodnocení jsou hranicí pro pozitivní hodnocení spíše vlastnosti nedegradovaného substrátu. Důležité je také kritérium homogenní distribuce konsolidantu ve zpevněné vrstvě, která v ideálním případě nevytvoří oblasti s rozdílnou mírou konsolidace.

Charakteristika	Označení měřené veličiny/ jednotka	Metody, normy a doporučení pro zkoušení (*kámen, **malta, omítka)		Kritéria pro pozitivní hodnocení [15, 16, pozn. autorů]	
		In labo	In situ		
Chemická i mineralogická skladba (materiál degradovaný, nedegradovaný)	-	Optická mikroskopie v polarizovaném světle (PLM) Skenovací elektronová mikroskopie (SEM), SEM-EDX analýza Silikátová analýza Termická analýza Infračervená spektroskopie Ramanova spektroskopie Hmotnostní spektroskopie Rentgenová difrakce (RTG)	Mikrochemické zkoušky	nejdou přítomny soli, jílly, látky s jiným látkovým složením (konsolidanty)	0
				minimální množství	5
				podstatné množství	10
Mikrostrukturní vlastnosti: tloušťka degradované vrstvy, hloubka penetrace, porozita a propojenost pórů, charakteristika tmelu (před a po konsolidaci)	mikroskopický popis vzorku (nábrusu či výbrusu materiálu nedegradovaného a degradovaného, konsolidovaného)	Rentgenová tomografie Rtuťová porozimetrie	Mikrochemické zkoušky (hloubka penetrace konsolidantů) vizuální průzkum	identické s nedegradovaným substrátem	0
				identické s degradovaným substrátem	10
Aplikační vlastnosti	hloubka penetrace (mm)	Optická mikroskopie, PLM, SEM-EDX Obrazová analýza	vizuálně indikátory	<p>pro substráty s různou kapilaritou:</p> <p>C=0,1-0,5 d=1,0 cm C=0,5-3,0 d=3,0 cm C>3 d=6,0 cm</p> <p>(C-koeficient kapilární absorpce vody)</p> <p>v případě přítomnosti krust je třeba zjistit hloubku degradovaného materiálu</p> <p><20 mm 5-20 >5</p> <p>nesmí vznikat zóny s odlišnou mírou zpevnění, ideální je homogenní distribuce konsolidantu v poškozené vrstvě</p>	

Aplikační vlastnosti	hloubka penetrace (mm)	Optická mikroskopie, PLM SEM-EDX Obrazová analýza	vizuálně indikátory	pro substráty s různou kapilaritou: C=0,1-0,5 d=1,0 cm C=0,5-3,0 d=3,0 cm C>3 d=6,0 cm (C-koeficient kapilární absorpce vody) v případě přítomnosti krust je třeba zjistit hloubku degradovaného materiálu <20 mm 0 5-20 5 >5 10 nesmí vznikat zóny s odlišnou mírou zpevnění, ideální je homogenní distribuce konsolidantu v poškozené vrstvě
Kapilární nasákavost povrchu	Koeficient kapilární absorpce $C(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1/2})$	ČSN EN 1015-18	ČSN EN 16302	$C_i \leq C_0$ $C_i < 0,1 C_0$ 0 $C_i = (0,1-0,25) C_0$ 5 $C_i > 0,25 C_0$ 10
Pevnost v tlaku	R_c (MPa)	ČSN EN 1015-11*, ČSN EN 1926,	ČSN EN 12504-2**, ČSN 73 1371**	zvýšení hodnot <10% 0
Pevnost v tahu za ohybu	R_f (MPa)	ČSN EN 1015-11*	-	homogenní pevnostní profil, pevnost po konsolidaci se blíží hodnotám nedegradovaného kamene 10-25% 5 >25% 10
Ultrazvuková transmise	v (km/s)	ČSN EN 12504-4**, ČSN EN 14579	ČSN EN 12504-4**, ČSN EN 14579	$v > v_0$ (max. v 'zdravá' hornina)
Dynamický modul pružnosti	E_d (MPa)	ČSN EN 14146	ČSN EN 14146 ČSN 73 2011**, ČSN 73 1371**	$E_{d,i} < 2E_{d,0}$ zvýšení hodnot <10% 0 homogenní pevnostní profil, pevnost po konsolidaci se blíží hodnotám nedegradovaného kamene 10-25% 5 >25% 10

Tepelné vlastnosti	součinitel lineární teplotní roztažnosti α_T (K ⁻¹)	RILEM 25 VI.3 ČSN EN 14581 ČSN EN 14617-11	-	beze změny $\alpha_T=(0,9-1,1) \alpha_{T0}$ $\alpha_T=(1,1-1,2) \alpha_{T0}$ $\alpha_T > 1,2 \alpha_{T0}$	0 5 10
Barva povrchu před a po konsolidaci (jako referenční je barva materiálu nebo barva lomové plochy materiálu, dohodou stanovená barva)	L*, a*, b*, ΔE	ČSN EN 15886	vizuální průzkum (porovnání s nekonsolidovaným materiálem)	bez změny barvy, ztmavnutí, vzniku lesků <3 3-5 >5	0 5 10

Tab. 2 Rozhodné materiálové charakteristiky pro hodnocení konsolidace. Hodnocení mezi vybraných charakteristik pro kompatibilní zásah – hodnocení změny charakteristik z hlediska možných ohrožení a jejich kompatibility s neošetřeným materiálem. Kritéria pro hodnocení byla shromážděna z literatury [15, 16]. U charakteristik je uvedena měřená veličina pro její stanovení a odkazy a doporučení pro zkoušení. i - povrch ošetřený, 0 - povrch neošetřený.

III.3 DOPLŇKY, UMĚLÝ KÁMEN

Doplňování se v rámci restaurátorského zásahu provádí zejména s cílem rehabilitovat výtvarné a estetické kvality historického objektu a obnovit tak jeho funkci a čitelnost v daných podmínkách. Druhé hledisko je materiálové; z jeho pohledu je cílem zpomalit nebo zabránit poškození objektu, které by mohlo nastat v důsledku jeho špatného stavu nebo úbytku jeho částí.

V současné restaurátorské praxi jsou pro doplňování porézních stavebních materiálů nejčastěji používány systémy na bázi minerálních pojiv. Důvodem je zejména jejich bližší chemické a mineralogické složení k anorganickému typu substrátu oproti systémům na bázi syntetických polymerů. Jejich výhodou je jednoduchá příprava, aplikace a dobrá adheze k minerálnímu podkladu. Také, na rozdíl od syntetických pojiv, se většinou nemusí řešit jejich stálost a odolnost vůči působení světla a vlhkosti a jejich zpracovatelské vlastnosti. Texturu originálního porézního substrátu lze dobře adjustovat vůči originálu modifikací plniva, kterým může být např. rozdrčená hornina, nebo kamenivo o přesné distribuci odpovídající zrnitosti a distribuci zrn v tmelené hornině, apod. V současné době se pro restaurování užívají materiály na bázi bílého vzdušného vápna a hydraulických pojiv (tj. přirozeně i latentně hydraulická vápna), naturální cementy, ale i modifikované směsi bílého vzdušného vápna s přísádkem hydraulických pojiv např. cementu nebo hydraulického vápna. Běžnou praxí je i využívání tzv. hotových průmyslových směsí. Jejich škála na trhu je v současné době veliká a složení některých směsí je přizpůsobeno nárokům památkové péče, přesto však nelze tyto produkty plošně doporučit bez předchozích zkušeností, podrobnější materiálové analýzy a testování jejich fyzikálně-mechanických vlastností.

Při návrhu složení opravných směsí bychom měli vycházet ze základního požadavku, který uvádí i Benátská charta (*Mezinárodní charta o konzervaci a restaurování památek a sídel*), tj. že ideální opravná malta pro doplňování přírodního kamene by měla být dostatečně trvanlivá, avšak měla by časem podléhat přirozenému stárnutí, a to rychleji než stárne originál. O rychlosti stárnutí rozhodují vlastnosti porézních materiálů, a je zřejmé, že některé z nich jsou pro rychlost degradace a živostnost porézních materiálů rozhodné.

Z literatury i ověřovacích studií je zřejmé, že na vlastnosti celé malty má určující vliv typ pojiva a použitého plniva [29, 30]; je známo, že malty ze vzdušného vápna jsou méně pevné oproti hydraulickým pojivům, avšak vyznačují se vyšší propustností pro vodu, vodní páru i elasticitu malt. Při doplňování historických omítek je složení pojiva opravné malty jednodušší – její materiálové složení by mělo reflektovat složení doplňované omítky zjištěné na základě analýzy. Problém nastává při optimalizaci složení pojiva malty pro opravu hornin, které se svými vlastnostmi od omítkových substrátů značně odlišují. Plnivová složka ovlivňuje kvalitu a do určité míry i vlastnosti malt mineralogickým složením, strukturou, distribucí a tvarem částic. Při jeho výběru, v případě doplňků na kámen, je skladba kameniva určována strukturou doplňovaného horniny a zpracovatelskými vlastnostmi tvárné směsi. Běžnou praxí při volbě kameniva je využívání drčené horniny, které optimálně upraví strukturu a konečný vzhled doplňku. Vlastnosti opravných malt lze také řídit nastavením poměru jednotlivých složek, tj.

pojiva a kameniva a dále množstvím záměsové vody. Navýšením obsahu pojiva i množstvím záměsové vody se zvyšuje porozita malty a s ní související vlastnosti. Nadbytek vody nebo pojiva v maltě je na druhou stranu příčinou smrštění malt a vzniku prasklin a trhlin. Také podmínky přípravy malty (příprava pojiva, příprava malty, čas a způsob míchání), následného zrání a expozice mohou zásadně ovlivnit vlastnosti opravné malty/doplňku a následně ovlivnit trvanlivost opravy [29, 31-32].

III.3.1 Hodnocení doplňování porézních substrátů – rozhodné charakteristiky pro hodnocení [29, 33-36, 45]

Při provádění oprav se zásah hodnotí z několika hledisek, které zahrnují kritéria na shodu v estetických kvalitách opravy (barevnost, textura, vzhled povrchu), v materiálovém složení a shodě ve fyzikálně-mechanických vlastnostech navrženého opravného systému a tmeleného podkladu (*Tab. 3*). Všechna uvedená hlediska by měla vycházet z poznání tmeleného substrátu (horniny, malty, stavebních prvků), zejména jejího chemického, látkového složení a mikrostruktury.

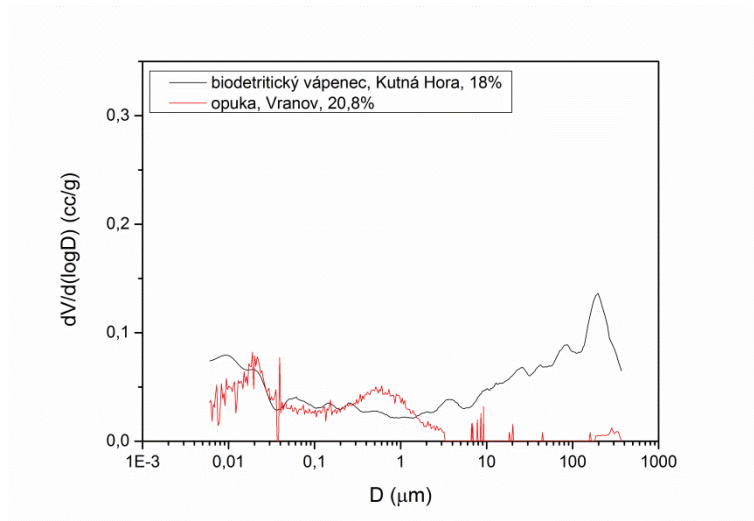
Na základě mineralogického složení se většinou určí jednotlivé složky substrátu (pojiva, plniva a jeho distribuce), které slouží pro výběr pojivového systému opravné malty/umělého kamene. Na základě znalosti mikrostruktury a textury minerálního substrátu se připravují směsi s různým obsahem pojiva a kameniva, které jsou kromě testování fyzikálně-mechanických vlastností hodnoceny i po stránce zpracovatelnosti. Při doplňování hornin s různorodou skladbou a vlastnostmi je návrh opravného systému časově velice náročný, neboť vyžaduje individuální řešení pro každý typ horniny. Proto se tento 'ideální' postup návrhu opravných systémů může v praxi uplatňovat pouze v ojedinělých případech nebo modelových projektech restaurování/obnovy. V současné praxi se řešení doplňků provádí použitím 'osvědčených' materiálů a receptur, které jen omezeně reflektují vlastnosti substrátu. Hojně se také používají tzv. prefabrikované směsi, které mají svá pozitiva spočívající v dobré zpracovatelnosti, aplikaci, standardní kvalitě. Jejich nevýhodou je však často složení; většinou se jedná o komplikovanou směs pojiva, kameniva a aditiv, které upravují vlastnosti malty, avšak nelze u nich předpovědět efekt na doplňovaný substrát ani průběh stárnutí takto modifikované malty.

Látkovou i mikrostrukturní charakterizaci lze provádět nejlépe pomocí mikroskopických technik, zejména optické mikroskopie v polarizovaném a nepolarizovaném světle užívané nejčastěji ve spojení se skenovací elektronovou mikroskopií s EDX mikrosondou (SEM-EDX), která upřesní informace získané optickou mikroskopií o látkovou charakterizaci (složky substrátu i doplňku/tmelu, aj.). Další možností je využití rentgenové difrakce (RTG) nebo termické analýzy. Mikroskopické techniky využívají pro charakterizaci dostatečně velký kusový vzorek (reprezentativní) upravený do formy nábrusu nebo výbrusu, který se pozoruje v procházejícím a odraženém světelném režimu. Pro RTG difrakci nebo termickou analýzu je naopak potřeba nepoměrně menší množství vzorku. Kromě informace o mineralogickém složení poskytují tyto metody informaci o stavu materiálu, korozních fenoménech, příp.

sekundárních změnách v porézním systému (např. přítomnosti solí, jílových složek, konzervačních látek, aj.). Metody optické mikroskopie navíc doplňují důležitou informaci o mikrostruktuře a porozitě, kterou lze stanovit také jinými metodami např. rtuťovou porozimetrií. Tyto mikrostrukturní charakteristiky následně souvisejí s absorpcí a transportem vody a vodní páry materiálem: celková pórovitost, velikost pórů a jejich distribuce, spojitost pórů, přítomnost sekundárních látek v porézním systému. Celková porozita a informace ke skladbě pórů, jejich velikosti a zastoupení se stanovují rtuťovou porozimetrií, která není v restaurátorské praxi pro charakterizaci materiálů běžně využívána, pravděpodobně z důvodu komplikované interpretace dat vyžadující odbornou znalost principu metody a jejích výstupů. Její důležitost spočívá v popisu porézní struktury materiálů (*Graf 1*) související s hodnocením transportního chování vody v substrátu a opravném materiálu; z hlediska interakce materiálu s vodou jsou nejzásadnější tzv. kapilární póry s velikostí 0,1-5 μm , které se podílejí na transportu vody v porézním systému. Ideální proto je navrhnout doplněk tak, aby se se substrátem v zastoupení kapilárních pórů maximálně shodoval. Význam a přínos metody ilustruje *Graf 3*, ve kterém je skladba pórů dvou typů tuzemských hornin, které se využívají pro sochařské i stavební účely – opuka a kutnohorský vápenec. Obě srovnávané horniny se vyznačují přibližně stejnou celkovou porozitou ca 20%, avšak skladba jejich pórů je zcela odlišná. Opuka obsahuje výrazně malé póry 'mikropóry', naopak vápenec je charakteristický přítomností, tzv. makropórů; horniny se liší v zastoupení kapilárních pórů, které ovlivňují průchod vody porézním systémem. Přítomnost menších pórů v opuce je rozhodující pro vysokou rychlost nasákání, naopak při vysychání tato hornina déle zadržuje vlhkost a vysychá velmi pozvolna.

Se skladbou pórů a jejich přístupností souvisí další významný parametr, kapilární absorpce, která se měří jako koeficient kapilární absorpce vody a vyjadřuje se jako množství vody, které je schopný daný materiál pojmout v rámci časového intervalu. Kapilární nasákavost zjednodušeně souvisí s kapilární aktivitou materiálu a její poznání je zásadní pro hodnocení chování materiálu při jeho zavlhčení a naopak vysychání. Z uvedeného je zřejmé, že při návrhu opravného materiálu je důležité zajistit podobnou interakci doplnku s vodou v porovnání s doplňovaným substrátem.

Mezi další rozhodné parametry patří i vlastnosti související s pevností materiálu a jeho elasticitou, tj. pevnost v tlaku R_c , tahu za ohybu R_f a dynamický modul pružnosti E_d . Z ověřovacích studií provedené autory i poznatků z literatury však vyplývá, že pevnostní charakteristiky jsou rozhodně pouze v případech hodnocení doplňků omítek nebo malt opravnými maltami, nikoliv však při doplňování hornin. Horniny představují substrát se zcela odlišnými mechanickými vlastnostmi, které jsou dány odlišným původem a mineralogií přírodního substrátu oproti minerálním doplňkům. Konkrétní výsledky jsou prezentovány v *Příloze* metodiky, která se zabývala vyhodnocením doplňků pro kutnohorský vápenec.



Graf 1 Distribuce velikosti pórů dvou tuzemských typů hornin (kutnohorský vápenec, opuka) se stejnou celkovou porozitou. Rozdíly v distribuci pórů ovlivňují rozdílný transport vody (nasávání i vysychání) materiálu.

Charakteristika	Označení měřené veličiny/ jednotka	Metody, normy a doporučení pro zkoušení (* prvky zdiva, ** beton)		Kritéria pro pozitivní hodnocení [16, 29, 45, pozn. autorů]	
		In labo	In situ		
Chemická i mineralogická skladba (substrát i doplněk)	typ pojiva	PLM, SEM-EDX, RTG Silikátová analýza Termická analýza	Mikrochemické zkoušky	identické se substrátem	0
				odlišné	10
	typ plniva	Infračervená spektroskopie Ramanova spektroskopie Hmotnostní spektroskopie		identické se substrátem	0
				odlišné	10
	přítomnost vodorozpuštěných solí (substrát)*	Rentgenová difrakce		nejsou přítomny	0
	přítomnost jílu			minimální množství podstatné množství	5 10
Mikrostrukturální vlastnosti (substrát i doplněk)	porozita N (obj.%)	Optická mikroskopie, PLM, SEM-EDX Obrazová analýza Rentgenová tomografie Rtuťová porozimetrie	-	$N_r=(0,9-1,1)N_s$ $N_r \geq 0,8 N_s$ $N_r \geq N_s$	0
				$N_r=(0,7-0,9)N_s$ $N_r < 0,7N_s$	5 10
	distribuce pórů (kapilárních)* (-)			identické se substrátem	0
				středně odlišné zcela odlišné	5 10
Hygričké vlastnosti	Koeficient kapilární absorpce C (kg·m ⁻² ·min ^{-1/2})	ČSN EN 1015-18	ČSN EN 16302	$C_r=(0,9-1,1)C_s$ $C_r=(0,5-1)C_s$ $C_r \geq C_s^{45}$	0
				10-50% >50%	5 10
	Otevřená pórovitost P ₀ (%)*	ČSN EN 1936	-	>80%	
	Nasákavost A _b (%)	ČSN EN 13755	ČSN EN 15801	(neuvádí se)	

Mechanické vlastnosti	pevnost v tlaku R_c (MPa)	ČSN EN 1015-11*, ČSN EN 1926,	ČSN EN 12504-2**, ČSN 73 1371**	zvýšení hodnot <10% 20-100% (60%)	0		
	pevnost v tahu za ohybu R_f (MPa)	ČSN EN 1015-11*	-	10-50% >50%	5 10		
	ultrazvuková transmise v (km/s)	ČSN EN 12504-4**, ČSN EN 14579	ČSN EN 12504-4**, ČSN EN 14579	$v_r \leq v_s$			
	dynamický modul pružnosti E_d (MPa)	ČSN EN 14146	ČSN EN 14146 ČSN 73 2011**, ČSN 73 1371**	zvýšení hodnot <10% 20-100% (60%)	0		
				10-50% >50%	5 10		
	není srovnávacím parametrem pro doplňky na kámen						
Tepelné vlastnosti (substrát i doplněk)	součinitel lineární teplotní roztlačnosti α_T (K ⁻¹)	RILEM 25 VI.3 ČSN EN 14581 ČSN EN 14617-11	-	$\alpha_{Tr} = <0,9-1,1> \alpha_{Ts}$ 50-150% (100%)	0		
				$\alpha_{Tr} = <1,1-1,5> \alpha_{Ts}$	5		
				$\alpha_{Tr} \geq 1,5 \text{ e } \alpha_{Ts}$	10		
Barva povrchu doplňku (jako referenční je barva povrchu očištěného substrátu, dohodou stanovená barva)	L^* , a^* , b^* , nebo celková změna barevnosti ΔE	ČSN EN 15886	vizuální průzkum (porovnání s nekonsolidovaným materiálem)	<3 50-150% (100%)	0		
				jen pro vysoce homogenní povrchy			
				3-5 >5	5 10		
Adheze (přidrženost)	f_a [N.mm ⁻²]	ČSN EN 1015-12*	ČSN EN 1015-12*, RILEM TC 177-MDT	0,5-0,8 pevnosti substrátu			

Tab. 3 Materiálové charakteristiky pro hodnocení doplňků na tradiční prvky zdiva (kámen, malta) - hodnocení změny charakteristik z hlediska možných ohrožení a jejich kompatibility s neošetřeným materiálem. Kritéria pro hodnocení byla shromážděna z literatury [16, 29, 45]. U charakteristik je uvedena měřená veličina pro její stanovení a odkazy a doporučení pro zkoušení. r - doplněk (opravný materiál), s – substrát. Hodnocení charakteristik dle [16] využívá stupnici 0-10 (0 – zcela kompatibilní zásah).

III.3.2 Kritéria pro pozitivní hodnocení doplňků – meze rozhodných materiálových charakteristik

Výběr vhodného materiálu pro opravu musí být založen na detailním průzkumu látkového složení doplňovaného/tmeleného substrátu; opravná směs by v ideálním případě měla reflektovat skladbu doplňovaného materiálu výběrem pojiva i kameniva. Důležité je také zjištění jeho stavu a přítomnost jiných látek; pro trvanlivé provedení opravy je nezbytné stanovení obsahu solí a odstranění jejich zdroje, určitým limitem pro trvanlivost opravy může být obsah jílových komponent v substrátu nebo kamenivu tvárné směsi. Z hlediska interakce doplňku a substrátu je nezbytné provést charakterizaci mikrostruktury, zejména porozity a skladby pórů, které ovlivňují nasákavost a transport vody materiály. Pro pozitivní interakci doplňku se substrátem by měla být shodná skladba pórů a to zejména v oblasti tzv. kapilárních pórů. Maximální odchylka v celkové porozitě by neměla, dle shromážděných referencí, překročit 10% hodnoty substrátu. Stejně odchylky byly stanoveny i pro hodnoty koeficientu kapilární nasákavosti. Některé zdroje jsou při posuzování porozity více obecné a uvádí pouze požadavek na vyšší porozitu doplňku. Ze studie, která se zabývala řešením doplňků na kámen [29], byla stanovena kritéria pro hodnocení otevřené porozity, která je přístupná vodě. Doplněk může nabývat i nižší porozity, než vykazuje samotný kámen, avšak pouze o 20%.

Častým kritériem při posuzování tvárných směsí pro opravu jsou mechanické charakteristiky, které, jak uvádí odborné studie, kladou na doplněk odlišné požadavky. Doplňky se pevností mohou od substrátu odlišovat buď o 10%, jiné hodnocení specifikuje požadavky na mechanické vlastnosti spíše obecně; zásadní požadavek je obecně nižší pevnost doplňků vůči originálu; mechanické charakteristiky by měly dosahovat 20-100% hodnot naměřených na substrátu [29]. Jak již bylo výše uvedeno, posouzení shody v pevnostních charakteristikách je relevantní pouze v případě doplňků omítek a historických malt (omítky, spárovací malty, štuky). Pro hodnocení doplňků na kámen se srovnání provádí na základě ostatních materiálových charakteristik. Také požadavky na hodnotu modulu pružnosti doplňku se ve zdrojích zásadně rozcházejí – zatímco [16] připouští jen 10% odchylku od hodnot originálu, autoři studie [29] navrhují pro opravu vždy materiál s nižší nebo srovnatelnou hodnotou dosaženou na tmeleném substrátu (materiál pro opravu má mít vždy nižší nebo se substrátem srovnatelnou elasticitu). U rychlosti UZ transmise nebyly pro objekt intervaly kompatibility prozatím stanoveny, obecně však autoři uvádí požadavek na nižší nebo se substrátem srovnatelnou rychlost UZ transmise opravného systému (nižší hodnoty odpovídají menšímu stmelení materiálu, vyšší porozitě a nižším pevnostem [46,47]).

Z pohledu estetiky opravy je nezbytné hodnocení barvy doplňku. V případě jejího absolutního hodnocení je důležité stanovit referenční barvu či povrch, vůči které má být barevnost tmelu optimalizována. Nezbytné je posoudit barevnost doplňku i vzhledem k budoucímu stárnutí objektu. V charakteristikách je proto uvedena jako standardní 'dohodou stanovená barva', která však může být značně subjektivně vyhodnocena, obzvlášť v případě heterogenních substrátů, nebo povrchů znečištěných nebo částečně očištěných. Při objektivním měření ΔE^*

byla stanovena přijatelná odchylka barevnosti definována změnou ΔE^* o 3 jednotky vůči substrátu. Metodu je však třeba provádět s vědomím, že není použitelná v případě všech materiálů a jejich typů, a je zvláště nevhodná pro heterogenní hrubozrné substráty. Pokud se měření pro hodnocení barvy používá, musí být provedeno na reprezentativním vzorku doplňku jako průměr z několika měření. Ve většině případů je však spolehlivější subjektivní posouzení doplňku, ideálně provedené na základě předchozích zkoušek tmelů v podmínkách expozice odpovídající budoucímu uložení objektu.

O trvanlivosti opravy zásadně rozhoduje adheze opravného systému k originálu. Její míra je ovlivněna správně zvolenou technologií celé opravy (odsolování, čištění, konsolidace, aj.). Rozhodující je kvalita nanesení tmelu či doplňku a jeho následné ošetření v daných podmínkách. Ideální je, aby byla adheze tmelu vůči doplňku dobrá, avšak nižší než je koheze tmeleného substrátu (50-80%). V opačném případě hrozí jeho poškození.

Důležitým kritériem, zvláště při hodnocení doplňků, je podobná odezva obou materiálů vůči změnám vnějších podmínek. Teplotní roztažnost doplňku by se neměla lišit o více než 10% oproti vlastnostem originálu.

III.4 HYDROFOBIZACE

Cílem hydrofobizace je vytvořit na povrchu materiálu vodoodpudivou úpravu, která má výrazně snížit úhel smáčení materiálu pro vodu a tím snížit nasákavost tohoto materiálu (*Obr. 3*). Z hlediska kompatibility se jedná o značně komplexní zásah, který může mít lokální dopad (omítka, socha nebo jejich část), ale může také ovlivnit vlastnosti celé konstrukce (např. při aplikaci na zdivo, v jehož důsledku se sníží nebo naopak zvýší obsah vlhkosti ve zdivu a sekundárně např. tepelné nebo vlhkostní vlastnosti konstrukce, interiéru). Při jeho provedení se vždy jedná o potenciálně problematický zásah, neboť se jím podstatně mění vlastnosti materiálu před a po ošetření a hydrofobita povrchu je ve většině případů jeho novou, zcela ahistorickou kvalitou. Druhým faktorem je omezená reverzibilita prostředku a její účinek, který, jak se v literatuře uvádí, může dosahovat až několik desítek let, v závislosti na expozičních podmínkách. Velmi podstatným aspektem, který by měl být vždy zvážen, je skutečnost, že hydrofobní úprava materiálu znemožňuje následné provádění množství opravných zásahů, zejména těch využívající mokré procesy. Jedná se především o čištění, doplňování opravnými materiály, spárování či provádění opravných nátěrů na vodní bázi. Na to je třeba myslet nejen při aktuálně probíhající opravě – hydrofobní úprava se provádí vždy na samý závěr zásahu, obvykle až po kolaudaci stavby nebo restaurování, kdy je jisté, že nebude třeba provádět opravy či úpravy zásahu mokřými technologiemi. Při jejím vytvoření je však také důležité myslet na další budoucnost památky ve fázi údržby či doporučeného režimu. V rámci nich mohou být doporučeny některé mokré procesy údržby např. čištění, lokální opravy, aj. a hydrofobní úprava může této údržbě bránit.

Hydrofobizace se provádí aplikací hydrofobizačního prostředku na exteriérové povrchy jako ochrana proti působení srážek nebo stékající vodě. Účinek hydrofobizantů závisí na mnoha faktorech, zejména typu a množství prostředku (tj. typu účinné látky, koncentrace), způsobem jeho aplikace (postřík, nátěr, opakování) a intenzitou aplikace (spotřeba, opakování aplikace). Z materiálového hlediska jsou dnes nejčastěji užívány prostředky na bázi alkyalkoxyesterů kyseliny křemičité, které v závislosti na chemickém složení dosahují různého účinku – typy s krátkými alkylovými skupinami (např. methyl) vykazují nižší účinnost i nižší odolnost alkalickému prostředí, delší řetězce (butyl) jsou odolnější a účinnější, avšak výrazně zvyšují cenu prostředku. Tyto materiály v současnosti nahradily ostatní, historicky užívané materiály – polymerní pryskyřice užívané ve formě roztoku nebo disperze, přírodní oleje nebo vosky.

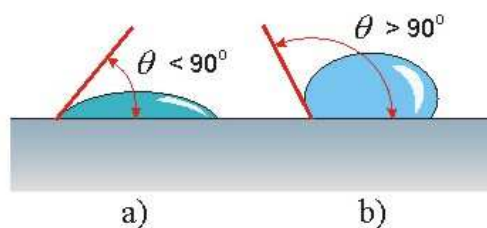
Posouzení kompatibility provedení hydrofobní úpravy je ovlivněno celou škálou faktorů od parametrů prostředku (chemické složení látky, koncentrace, jeho viskozita, aj.), substrátu, až po pochopení účinku v rámci širší souvislosti konstrukce či objektu. Hodnocení zahrnuje i časový faktor – hodnocení je třeba provádět až v čase vytvoření funkční hydrofobní úpravy (chemické reakci), naopak vzhledem k jeho omezené životnosti, je třeba jej vyhodnocovat v čase funkční ochrany i ohledem na jeho možné budoucí dopady.

III.4.1 Hodnocení hydrofobizace – rozhodné charakteristiky pro hodnocení

Jak je zřejmé, provádění hydrofobizace je velice komplexní problém, kde hrají zásadní roli vlastnosti konstrukce, její uspořádání, stav materiálu a chování při zatížení vlhkostí a rozpustnými solemi. Důležité jsou další skutečnosti – výskyt nových omítek, povrchových úprav, výskyt starších konzervačních prostředků, ale i např. pravděpodobnost budoucích zásahů a oprav. Správné hodnocení hydrofobizace se tedy provádí velice komplikovaně, vždy v závislosti na modelové situaci objektu a okolnostech jeho podmínek a expozice.

Zásady pro rozhodování, zda hydrofobizaci provádět či nikoliv, můžeme být řešeno několika způsoby. První možnost hodnocení navrhuje společnost WTA, *Vědecko-technická společnost pro sanace staveb a péči o památky*, která v roce 2009 vypracovala „code of Practice“ kodex správné praxe „Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen – WTA Merkblatt E 3-17“ [54], který kladením otázek, které se vztahují k objektivnímu posouzení objektu, vedou k rozhodnutí tento zásah provádět a částečně ho vyhodnotit. Druhý způsob hodnocení hydrofobizace je možné provádět na základě posouzení vybraných materiálových charakteristik, jejichž změna vůči substrátu se stanovuje po provedení zásahu. Jejich přehled byl sestaven na základě studia literatury, zejména prací [16, 50, 55], které se hodnocením hydrofobizace na různé typy porézních anorganických materiálů dříve zabývaly (*Tab. 4*). Výčet zahrnuje charakterizaci chemického a mineralogického složení substrátu a to zejména z pohledu stanovení obsahu složek, které jsou pro správné fungování hydrofobní úpravy kritické. Zejména se jedná o stanovení obsahu jílových složek v ošetřovaném materiálu a obsahu vodorozpustných solí. Při spolehlivém fungování opravy je žádoucí, aby substrát nebyl zatížen vlhkostí ze strany konstrukce nebo vzlínáním. Účinek a trvanlivost úpravy je významně závislý také na hloubce penetrace prostředku, která závisí na porositě, zejména

však jeho kapilaritě. Důležitým hlediskem při posuzování hydrofobizace je změna optických vlastností, které nastává po ošetření - změna barvy povrchu materiálu, příp. lesku (odrazivosti). V obou případech je žádoucí, aby docházelo k minimálním změnám, v praxi však hydrofobní ošetření většinou vede k různě intenzivnímu probarvení (zvýraznění) barevnosti materiálu v souvislosti s uzavřením mikroprasklin na jeho povrchu a tedy se snížením rozptylu světla na povrchu materiálu. Změny lesku materiálu jsou obvykle vnímány jako více nežádoucí, ale dochází k nim spíše v souvislosti s technologickou chybou (rychlé odeschnutí prostředku, aplikace přílišné koncentrace prostředku apod.). Vhodnými podmínkami aplikace je lze téměř zcela minimalizovat. V praxi se barevné změny hodnotí nejčastěji na základě subjektivního posouzení srovnáním s neošetřenou plochou. V případě potřeby objektivnějšího hodnocení je (opět s určitými omezeními danými kvalitou a morfologií povrchu) možné absolutní celkovou barevnou změnu vyhodnotit exaktně pomocí přenosného spektrometru, odchylky akceptovatelné v rámci provedeného zásahu uvádí literatura absolutních hodnotách změny barevnosti ΔE^* . Podobně lze objektivizovat změny lesku měřením změny reflektance povrchu, kterou však literatura blíže nespecifikuje.



Obr. 4 Změna úhlu smáčení: a) povrch, který je vodou (nedokonale) smáčen, b) nesmáčivý povrch, kontaktní úhel $>90^\circ$.

III.4.2 Kritéria pro pozitivní hodnocení hydrofobizace – meze rozhodných materiálových charakteristik

Dopad provedené hydrofobní úpravy se v praxi hodnotí zejména na základě změny nasákavosti, která se účinkem hydrofobizace výrazně sníží (o více než 50%) vůči neošetřenému materiálu. V praxi se kapilární nasákavost obvykle stanovuje in-situ pomocí Karstenovy trubice, příp. laboratorně na odebraných vzorcích. Měření pomocí Karstenovy trubice díky dostatečně velké měřicí ploše umožňuje měření na různých typech podkladu (tj. i pro heterogenní materiály, středně až hrubozrnné). Limitující je pro ni špatná manipulace obzvláště na málo zpevněných površích degradovaných omítek a hornin. Proto se pro stanovení nasákavosti užívá řada méně náročných metod. Pro orientační stanovení účinku hydrofobní úpravy se v praxi využívá jednoduché smočení povrchu vodou a sledování hydrofobního účinku na základě tvaru kapek ($>90^\circ$ po hydrofobizaci), příp. čas potřebný pro její vsáknutí ($>$ než na neošetřené hornině). Jiná zkouška spočívá v měření nasákavosti

povrchu bodovým smočením vodou a sledování jeho stopy při stékání z povrchu. Tato zkouška však vyžaduje značnou zkušenost s vyhodnocením zkoušky a její interpretací.

Riziko pro provedení hydrofobizace vždy představují vodorozpustné sole a zvýšená vlhkost v substrátu, jejichž obsah je nutné před každým zásahem na objektu stanovit. Obsah solí ani vlhkosti, který představuje vůči objektu ohrožení, nelze jednoznačně kvantifikovat. Je zřejmé, že pro každý materiál a situaci jsou hodnoty ohrožující materiál individuální, závisející na materiálových charakteristikách samotného substrátu i podmínek v konstrukci. Další riziko představuje vlastní aplikace, která v případě špatného provedení ovlivní výsledek a funkci hydrofobní úpravy. Při hodnocení se stanovuje zejména hloubka aplikace prostředku, která v ideálním případě dosahuje min. 2 mm.

Charakteristika	Označení měřené veličiny/ jednotka	Metody, normy a doporučení pro zkoušení (* prvky zdiva, ** beton)		Kritéria pro pozitivní hodnocení [16, 55, pozn. autorů]	
		In labo	In situ		
Chemická i mineralogická skladba (substrát)	přítomnost vodorozpustných solí	PLM, SEM-EDX, RTG ČSN EN 16455 spektrofotometrie	Mikrochemické zkoušky Indikátorové papírky pro stanovení solí	nejsou přítomny	0
	přítomnost jílu			minimální množství podstatné množství	5 10
Obsah vlhkosti	- (hm.%)	ČSN EN 1097-5	měření přiložnými vlhkoměry	nízké zvýšené	0 5
	Hydrofilní charakteristiky (substrát před a po hydrofobizaci)	Kontaktní úhel (°)	-	-	<90° >90°
Smáčivost povrchu pro vodu a organická rozpouštědla		ČSN EN 15802 doba absorpce (s)	RILEM 25 II. Drop test	<100% >100%	0 5
Koeficient kapilární absorpce C (kg·m ⁻² ·min ^{-1/2})		ČSN EN 1015-18	ČSN EN 16302	C ₁ <50% C ₀ >50%	0 5
Aplikační vlastnosti		hloubka penetrace (mm)	Optická mikroskopie, PLM, SEM-EDX Obrazová analýza	-	2 mm <2 mm
	Barva, lesk (před a po hydrofobizaci)	L*, a*, b*, nebo celková změna barevnosti ΔE	ČSN EN 15886 vizuální průzkum (porovnání s nekonsolidovaným materiálem)	<3	0
jen pro vysoce homogenní povrchy 3-5				5	
>5				10	

Tab. 4 Materiálové charakteristiky pro hodnocení hydrofobizace - hodnocení změny charakteristik z hlediska možných ohrožení a jejich kompatibility s neošetřeným materiálem. Kritéria pro hodnocení byla shromážděna z literatury [16, 55], příp. doplněna o komentář autorů. U charakteristik je uvedena měřená veličina pro její stanovení a metody, odkazy a doporučení pro zkoušení. i- materiál po hydrofobizaci, 0 – před hydrofobizací. Hodnocení charakteristik dle [16] využívá stupnici 0-10 (0 – kompatibilní zásah).

IV. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] Science for Conservators, Vol.2, Cleaning, Conservation Science Teaching Serie, 1992, ISBN 9780415071659.

[2] Směrnice WTA 3-9-95-D: Hodnocení očištěných povrchů kamene (bewertung von gereinigten Werksein – Oberflächen.

[3] Bromblet, P., Labouré, M., Oriol, G.: Diversity of the cleaning procedures including laser for the restoration of carved portals in France over the last 10 years. *Journal of Cultural Heritage*. 2003, (4), pp. 17-26.

[4] Gioventù, E., Lorenzi, P.: Bio-removal of black Crust from marble surface: comparison with traditional methodologies and application on a sculpture from the Florence's English cemetery. *Procedia Chemistry* 8 (2013), pp. 123 – 129. Youth in Conservation of Cultural Heritage, YOCOCU 2012.

[5] Ďoubal, J.: Research into the methods of Cleaning the Silicate Sandstones Used for Historical Monuments. In: *Journal of Architectural Conservation*. 2014, roč. 20, č. 2

[6] Sabatini, G., Giamello, M., Pini, R., Siano, S., Salimbeni, R., Laser cleaning methodologies for stone facades: laboratory analyses on lithotypes of Siena architecture. *Journal of Cultural Heritage*, 1, 2000, pp. 9-19.

[7] Salimbeni, R., Pini, R., Siano, S., Calgano, G., Assessment of the state of conservation of stone after laser cleaning comparison with conventional cleaning results on a two-decade follow up. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 1, 4, 2000, pp. 385-391.

[8] Carvalhão, M., Dionísio, A.: Evaluation of mechanical soft-abrasive blasting and chemical cleaning methods on alkyd-paint graffiti made on calcereous stones. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 16, 4, 2015, pp. 579-590.

[9] Slížková, Z. a kol.: Metodika pro určení rozhodných materiálových charakteristik historických materiálů pro plánování restaurátorského zásahu. Metodika vypracovaná v rámci projektu MK ČR NAKI DF12P01OVV018.

[10] Arkarazo, I. M., Sarmiento, A., Usobiaga, A., Angulo, M., Etxebarria, N., Madariaga, J.M.: Thermodynamic and Raman spectroscopic speciation to define the operating conditions of an innovative cleaning treatment for carbonated stones based on the use of ion exchangers – A case study. *Talanta*, Vol. 75, 2, 2008, pp. 511-516.

- [11] S.S. Potgieter-Vermaak, S.S., Godoi, R.H.M., Van Grieken, R., Potgieter, J.H., Oujja, M., Castillejo, M.: Micro-structural characterization of black crust and laser cleaning of building stones by micro-Raman and SEM techniques *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, Vol 61, 11–12, 2005, pp. 2460-2467.
- [12] Enrico Quagliarini, E., Bondioli, F., Goffredo, G. B., Cordoni, C., Munafò, P.: Self-cleaning and de-polluting stone surfaces: TiO₂ nanoparticles for limestone. *Construction and Building materials*. Vol. 37, 2012, pp. 51-57.
- [13] Siedel, H., Neumeister, K., Gordon Sobott, R. J.: Laser cleaning as a part of the restoration process: removal of aged oil paints from a Renaissance sandstone portal in Dresden, Germany. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 4, 1, 2003, pp.11-16. *Lases in the Conservation of Artworks - LACONA IV*.
- [14] Drdáčký, M., Lesák, J., Rescic, S., Slížková, Z., Tiano, P., Valach, J.: Standardization of peeling test for assess the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces. *Materials and Structures*, 45, 4, 2012, pp. 505-520.
- [15] Sasse, H.R., Snethlage, R.: Evaluation of stone consolidation treatments, *Science technology for Cultural Heritage*, 5 (1), 1996, pp. 85-92.
- [16] Delgado Rodriguez, J., Grossi, A.: Indicators and ratings for the compatibility assessment of conservation actions. *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 8, 2007, pp. 32-43.
- [17] Heidingsfeld, V.: Technologické aspekty zpevňování omítek. In: *Křivoklát 2004: Zpevňování historických omítek. Odborný seminář STOP*. Praha, 2004, s. 8.
- [18] Tišlová, R., Macháčko, L.: Nové možnosti zpevňování omítek. In: *Sborník z konference Fórum pro konzervátory-restaurátory*, 2014, pp. 28-34.
- [19] Karatasios, I., Theoulakis, P., Kalagri, A., Sapalidis, A., Kilikoglou, V.: Evaluation of consolidation treatments of marly limestones used in archeological monuments. *Construction and Building Materials*, 23, 2009, pp. 2803-2812.
- [20] Ferreira Pinto, A.P., RDelgado Rodrigues, J.: Consolidation of carbonate stones: Influence of treatment procedures on the strengthening action of consolidants. *Journal of Cultural Heritage*, 13, 2012, pp. 154-166.
- [21] Kociánová, I.: *Restaurování centrálního výjevu na klenbě kaple sv. Isidora v Křenově*. 2013. Diplomová práce na Fakultě restaurování Univerzity Pardubice. Vedoucí práce Jan Vojtěchovský.

[22] Slížková, Z., Frankeová, D., Drdácký, M.: Strengthening of por lime mortar with consolidation agents. The 3rd Historic mortar conference. Glasgow: University of the West Scotland, 2013. ISBN 978-1-903978-44-3.

[23] Slížková, Z., Frankeová, D.: Strengthening of Weak historic Renders with Traditional nad Innovated Consolidation Treatment. In: Náprstek, Jiří a Cyril Fischer, Engeneering Mecahnics 2015. 21st International Conference, May 11-14, 2015, Svratka, Czech Republic. Extended abstract. Pp. 282-283. ISBN 978-80-86246-42-0.

[24] Macounová, D.: Restaurování vápencové sochy světice č. 1 s využitím nanosuspenzí na bázi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ /Zhodnocení možností využití nanosuspenzí na bázi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pro konsolidaci organodetrického vápence v porovnání s běžně používanými prostředky na bázi TEOS; Rozšířená restaurátorská zpráva. Diplomová práce na Fakultě restaurování Univerzity Pardubice.

[25] Ziegenbalg, G., Piascinski, E.: The combined application of calcium hydrox nano-sols and silici acid esters – A promising way to consolidate stone and mortar, In: Proceeding of the 12th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, 2012, Collumbia University, New York.

[26] Myrin, M., Malaga, K.: A case study on the evaluation of consolidation treatments of Gotland sandstones by use of ultrasound pulse velocity measurement. Heritage, Weathering and Conservation – Fort, Alvarez de Buergo, Gomez-Heras and Vazquez-Calvo (eds.), Taylor and Francis Group, London, 2006, pp. 749-755. ISBN 0-415-41272-2.

[27] Svahn, H.: Non-destructive Field tests in Stone Conservation. Field and laboratory Tests. Final Report for the Research and Development Project. 2006.

[28] Delgado Rodrigues, J., Costa, D., Schiavon, N.: Spatial distribution of consolidants in granite stones, in: Proceedings of the EC workshop, Santiago de Compostela (Spain), November 28-30 1994, Published by the European Commission. Directorate-General XII. Science, Research and Development, 1996, pp. 331–336.

[29] Isabaert, A., Van Parzs, L., Cnudde, V.: Composition and compatibility requirements of mineral repair mortars for stone – A review. Construction and Building Materials, 59, 2014, pp. 39-50.

[30] Faria, P., Silva, V.: Natural hydraulic lime mortars: influence of the aggregate 3rd Historic Mortars Conference, September 2013, Glasgow, Scotland, pp. 1-8.

- [31] Maravelaki-Kalaitzaki, P., Bakolas, A., Karatasios, I., Kilikoglou, V.: Hydraulic lime mortars for the restoration of historic masonry in Crete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, 2005, pp.1577–1586.
- [32] Marques, S.F., Ribero, R.A., Silva, L.M., Ferreira, V.M., Labrichas, J.A: Study of rehabilitation mortars: Construction of a knowledge correlation matrix. *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, 10, 2006, pp.1894–1902.
- [33] Schueremans, L., Cizera, O., Janssen, E., Seréa, G., Van Balen, K: Characterization of repair mortars for the assessment of their compatibility in restoration projects: Research and practice. *Construction and Building Materials*, 25, 12, 2011, pp. 4338-4350.
- [34] Van Balen, K. et al.: Procedure for a mortar type identification: a proposal. In: *Proceedings of the RILEM international workshop*, vol. 12. historic mortars: characteristics and tests, RILEM proceedings, Paisley; 1999. p. 61-70.
- [35] Groot, C., Ashall, G., Hughes, J.: RILEM TC COM 167: Characterisation of old mortars with respect to their repair. RILEM Report 28, RILEM Publications S.A.R.L., France; 2005.
- [36] Van Balen, K., Elsen, J.: RILEM technical committee RMH, repair mortars for historic masonry. local organization Leuven; March 19 and 20, 2009.
- [37] www.geology.cz
- [38] CSN 733251 Navrhování konstrukcí z kamene
- [39] ČSN 721800 Přírodní stavební kámen pro kamenické výrobky. Technické požadavky.
- [40] Deliverable D5.11 projektu EC Stonecore 'Stone Conservation for the Refurbishment of Buildings Project funded in the 7. Framework Programme of the European Commission Grant Agreement No: NMP-SE-2008-213651, pp.31.
- [41] nepubliková data, Katedra chemické technologie, Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice.
- [42] Koch, A., Siegesmund, S.: The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble. *Environmental Geology*, 46, 2004, pp. 350-363.

[43] Benavente D., Cultrone, Gómez-Heras, M.: The combines influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones. *European Journal of Mineralogy*, 20, 2008, pp. 673-685.

[44] Hughes, J.J. et al.: Repair mortars for historic masonry. The role of mortar in masonry: ana introduction to requirements for the design of repair mortars. RILEM TC 203-RHM. *Materials and Structures*, 45, 2012, pp. 1287-1294.

[45] <http://www.icomos.cz/images/dokumenty/benatska-charta.pdf>

[46] Barbera, G., Barone, G., Mayyoleni, P., Scandurra, A.: Laboratory measurement of ultrasound velocity during accelerated aging tests: Implication for the determination of limestone durability. *Construction and Building Materials*, 36, 2012, pp. 977-983.

[47] Grinzato, E., Marinetti, S., Bison, P.G., Concas, M., Fais, S.: Comparison of ultrasonic velocity and IR thermography for the characterisation of stones. *Infrared Physics & Technology*, 46, 2004, 63–68.

[48] Theoulakis, P., Moropoulou A.: Microstructural and mechanical parameters determining the susceptibility of porous building stones to salt decay. *Construction and building materials*, 11, 1997, pp 65-71.

[49] Zanardini, E., Abbruscato, P., Ghedini, N., Realini, M., Sorlini, C.: Influence of atmospheric pollutants on the biodeterioration of stone. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 45, 2000, pp 35-42.

[50] Lanas, J., Alvarez J. I.: Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. *Cement and concrete research*, 33, 2003, pp 1867-1876.

[51] Hydrofobizace stavebních památek – možnosti a rizika. Seminář STOP. Národní muzeum, 2011.

[52] Hydrofobizace stavebních památek – možnosti a rizika. Seminář STOP. Národní muzeum, 2011.

[53] Metodické vyjádření k hydrofobizaci. *Zprávy památkové péče*, 71, 3, 2011, pp 208-209.

[54] Směrnice WTA Merkblatt E 3-17: Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen, 2010.

V. SEZNAM PUBLIKACÍ, KTERÉ PŘEDCHÁZELY METODICE A BYLY PUBLIKOVÁNY (případně výstupy z originální práce)

Ďoubal, J.: Research into the methods of Cleaning the Silicate Sandstones Used for Historical Monuments. In: Journal of Architectural Conservation. 20, 2, 2014.

Ďoubal, J.: Možnosti objektivního hodnocení čištění kamene. In: Restaurování a obnova uměleckých děl: Čištění uměleckých děl. Kutná Hora: Arte-fakt, o.s., 2014, pp. 14-21. ISBN 978-80-905924-0-7.

Ďoubal, J.: Srovnání čištění laserem s dalšími metodami čištění na silikátových pískovcích. In: Interdisciplinarita v péči o kulturní dědictví: Sborník z konference. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2013, pp. 205-214. ISBN 978-80-7395-6.

Gläser, P.: Několik poznámek k současné praxi čištění kamenosochařských děl. In: Restaurování a ochrana uměleckých děl. Čištění uměleckých děl. Kutná Hora: Arte-fakt, 2014, pp. 10-13.

Drdácký, M., Lesák, J., Rescic, S., Slížková, Z., Tiano, P., Valach, J.: Standardization of peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces. Materials and Structures, 2012, Roč. 45, č. 4, s. 505-520. ISSN 1359-5997.

Drdácký, M., Slížková, Z.: Enhanced affordable methods for assessing material characteristics and consolidation effects on stone and mortar. J. Geophys. Eng. 10, 2013, 6 pp. doi:10.1088/1742-2132/10/6/064005.

Drdácký, M., Slížková, Z.: In situ peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic plaster and render surfaces. Studies in Conservation, Vol. 60, 2, 2015, pp.121-130.

Slížková, Z., Drdácký, M., Viani, A.: Consolidation of weak lime mortars by means of saturated solution of calcium hydroxide or barium hydroxide, Journal of Cultural Heritage 2014, DOI 10.1016/j.culher.2014.09.003. on line at: <http://authors.elsevier.com/sd/article/S1296207414001150>

Slížková, Z., Frankeová, D.: Strengthening of Weak Historic Renders with Traditional and Innovated Consolidation Treatment. In: Náprstek, Jiří a Cyril Fischer, Engineering mechanics 2015. 21st International conference, May 11-14, 2015, Svatka, Czech Republic. Extended abstracts. 1. vyd. Prague : Institute of theoretical and applied mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v.v.i, 2015, s.282-283. ISBN 978-80-86246-42-0.

Macounová, D., Bayer, K., Ghaffari, E., Navrátilová, M., Slížková, Z., Weber, J.: Consolidation testing of porous limestone using lime nanomaterials: optimization, assessment of stone mechanical and structural characteristics. In: Náprstek, Jiří a Cyril Fischer, Engineering mechanics 2015. 21st International conference, May 11-14, 2015, Svratka, Czech Republic. Extended abstracts. 1. vyd. Prague : Institute of theoretical and applied mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v. v. i, 2015, s. 184-185. ISBN 978-80-86246-42-0.

Navrátilová, M., Bayer, K., Ghaffari, E., Macounová, D., Slížková, Z., Weber, J.: Modification of protective lime coating systems for the porous limestone using lime nanomaterials: assessment of mechanical properties and ageing resistance. In: Náprstek, Jiří a Cyril Fischer, Engineering mechanics 2015. 21st International conference, May 11-14, 2015, Svratka, Czech Republic. Extended abstracts. 1. vyd. Prague : Institute of theoretical and applied mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v. v. i, 2015, s. 210-211. ISBN 978-80-86246-42-0.

Slížková, Z., Frankeová, D., Drdácý, M.: Strengthening of poor lime mortar with consolidation agents. The 3rd Historic mortars conference. Glasgow : University of the West of Scotland, 2013 - (Hughes, J.) ISBN 978-1-903978-44-3.[Historic mortars conference /3./. Glasgow (GB), 11.09.2013-13.09.2013].

<http://iscs.icomos.org/pdf-files/NewYorkConf/slizfran.pdf>

Vavřík, D., Jandajsek, I., Slížková, Z.: Observation of lime nanoparticles distribution during evaporation of transportation media. Tomography of materials and structures. Ghent : University press, 2013, s. 285-287 ISBN 978-9-4619713-0-2. International Conference on Tomography of Materials and Structures /1./. Ghent (BE).

Drdácý, M., Slížková, Z.: Lime-Water Consolidation Effects on Poor Lime Mortars. APT Bulletin: Journal of Preservation Technology, 43:1, 2012, pp. 31-36.

Drdácý, M., Fratini, F. ; Frankeova, D. ; Slížková, Z. The Roman mortars used in the construction of the Ponte di Augusto (Narni, Italy) – A comprehensive assessment. Construction and Building Materials 38 (2013) s.1117–1128 <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.044>.

Drdácý, M., Beran, P.: Compatible dilatation Limit of Masonry joint Mortars, Journal of Architectural Heritage, Vol. 4, No. 2, 2010.

Tišlová, R., Novotná, A., Ďoubal, J., Gläser, P.: Optimization of the repair mortar for stone – critical parameters for their compatibility. In: Proceedings of the 16th International Conference of WTA CZ, „CRRB – 16th INTERNATIONAL

CONFERENCE ON REHABILITATION AND RECONSTRUCTION OF BUILDINGS” Brno, Czech technical university, Czech Republic, Extended abstract. 1. Vyd. Brno: Czech technical university, 2014, pp. 173-174. ISBN 978-80-02-02539-9.

Tišlová, R., Novotná, A.: Repair formulations for fine-grained stone arte-facts. In: Náprstek, Jiří a Cyril Fischer, Engineering mechanics 2015. 21st International conference, May 11-14, 2015, Svratka, Czech Republic. Extended abstracts. 1. vyd. Prague : Institute of theoretical and applied mechanics, Academy of Sciences of the Czech Republic, v.v.i, 2015, s.282-283. ISBN 978-80-86246-42-0.

Klisińska, A., Tislova, R., Influence of composition of repair Roman cement mortars on their salt weathering susceptibility. 3rd Historic Mortars Conference, Glasgow, 2013.

Klisińska, A., Tislova, R., The effect of Composition of Roman Cement Repair Mortars on Their Salt Crystallization Resistance and Adhesion, *Procedia Engineering* 57, 565-571, 2013.

Klisińska, A., Tislova, R., Adamski, G., Kozłowski, R.: Pore structure of historic and repair Roman cement mortars to establish their compatibility, *Journal of Cultural Heritage* 11, 404-410, 2010.

Tišlova, R., Kozłowska, A., Kozłowski, R., Hughes, D.C.: Porosity and specific surface area of Roman cement pastes, *Cement and Concrete Research* 39, 950–956, 2009.

Rejman, P.: Petr. Sledování vlivu hydrofobizace na horniny, resp. objekty zatížené vztlínající vlhkostí a vodorozpustnými solemi. Litomyšl, 2006. Bakalářská práce. Fakulta restaurování Univerzita Pardubice.

Hydrofobizace stavebních památek – možnosti a rizika. Seminář STOP. Národní muzeum, 2011.

Metodické vyjádření k hydrofobizaci. *Zprávy památkové péče*, 71, 3, 2011, s. 208-209.

Tišlová, R., Novotná, A.: Opravné malty-umělý kámen pro biodetritické vápence. In: sborník z konference XIV. Odborná konference o vědě, výzkumu a aplikacích v oboru maltovin *Maltoviny 2015*, VUT Brno, 2015, s. 11-20. ISBN: 978-80-214-5294-7.

Tišlová, R.: Opravy vápenců umělým kamenem – postup při návrhu doplňků pro sochařská díla a části architektury. In: *Příspěvek technických věd k záchraně a restaurování památek*. Eds.: Miloš Drdácký, Zuzana Slížková, Jan Valach, Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, 2015, Praha, *in press*, s. 278-294.

Příloha: Modelová studie – Ověření intervalů kompatibility vybraných kritických parametrů při konsolidaci historických vápenných omítek a užití umělého kamene pro tmelení kutnohorského vápence

I.1 Konsolidace historických omítek

V případě hodnocení konsolidace bylo autory metodiky provedeno ověření konsolidace na základě laboratorní studie, která se zabývala hodnocením anorganických konsolidačních prostředků historických silně degradovaných omítek.

Experiment a vzorky

Experiment byl proveden na laboratorních vzorkách vápenných omítek o různém složení s nízkým obsahem pojiva, simulující silně degradované omítkové substráty (pojivo/plnivo – 1/9, obj.). Jako plnivová složka byla použita různá kameniva: Borek 0-2 mm (betonářský písek, tříděný, praný), Vitošov (drcený vápenec), Kema (křemičitý písek), ze kterých byly shodně připraveny vzorky omítek smícháním vápna ve formě vápenného hydrátu nebo kaše a kameniva. Vzorky byly konsolidovány různými anorganickými zpevňovacími prostředky za podmínek, které uvádí *Tab. 1*. Celkové množství konsolidantu vpraveného do vzorků bylo totožné 30 mg/cm^3 s cílem ohodnotit účinek daného typu konsolidantu aplikovaného za daných podmínek. Distribuce konsolidantů v napouštěných tělesech byla homogenní, konsolidant byl nanášen pipetou. Přehled použitých konsolidantů uvádí *Tab. 1*.

Konsolidant	Popis	Aplikační podmínky
Vápenná voda (N)	nasycený roztok Ca(OH)_2 ve vodě, přibližná koncentrace 1,5 g/l	Substrát: vápenná omítka (1:9, obj., pojivo/plnivo)
Syton X 10 (SI)	vodná disperze kyseliny křemičité, zředěno z původní 30% koncentrace na 10%	aplikace: pipetou
KSE 100 (ES)	roztok ethylesteru kyseliny křemičité v ethanolu (koncentrace ca 20 hm.%)	celková koncentrace konsolidantu: 30 mg/cm^3
Calosil IP 15 (C)	disperze Ca(OH)_2 v isopropanolu, koncentrace 15 g/l	typy napouštěných těles: hranoly: v 20 mm, š 20mm, d 100 mm
ZFB 15 (N)	disperze Ca(OH)_2 v isopropanolu, koncentrace 15 g/l	

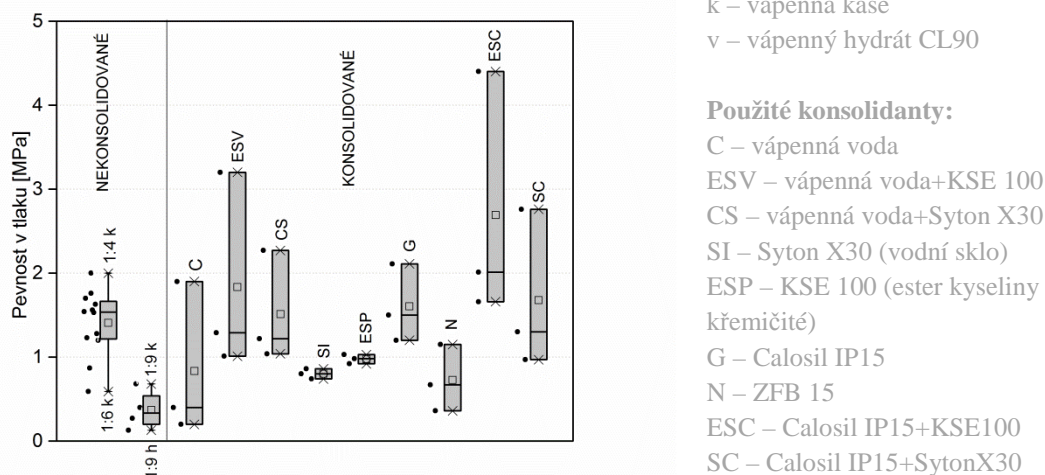
Tab. 1: Konsolidační prostředky a podmínky aplikace. Zrání tělísek probíhalo za normálních laboratorních podmínek po dobu 90 dní.

Kritéria kompatibility pro hodnocení konsolidace – pevnostní charakteristiky

Míra zpevnění byla hodnocena na základě vyhodnocení mechanických vlastností, pevnosti v tlaku a tahu za ohybu, které se nejčastěji pro hodnocení konsolidace užívají (Tab. 2, Metodika). Kritéria pro pozitivní hodnocení konsolidace jsou různá. Delgado Rodrigues, J. a Grossi, A. uvádí, že pevnost po zpevnění se v ideálním případě nesmí zvýšit o více než 10% vůči nezpevněnému materiálu [16]. Sasse, H. R. a Snethlage, R. míru zpevnění nekvantifikují a doporučují spíše provést konsolidaci postupy a materiály tak, aby byl zajištěn homogenní pevnostní profil. Míra zpevnění by se měla přibližovat hodnotám nedegradovaného substrátu. Citované intervaly byly publikovány pro příklad zpevnění historických omítek [15], v případě studie [16] byly intervaly stanoveny pro zpevnění hornin.

Výsledky a diskuse

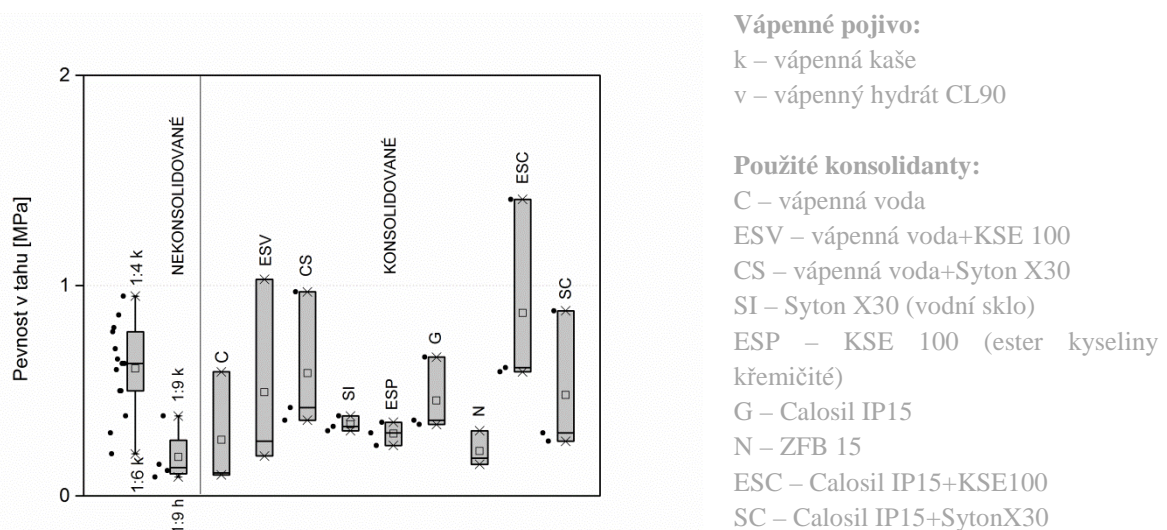
Z porovnání změn pevností po konsolidaci různými prostředky je zřejmý značný rozdíl v jejich zpevňovacím efektu při daných podmínkách (shodné množství konsolidantu). Výsledky pevnosti v tlaku a tahu za ohybu ilustrují Graf 1 a 2. Pro porovnání byla jako referenční (srovnávací) hodnota uvedena pevnost nezpevněné omítky (1:9, obj.), ale také pevnost nedegradované omítky, která je reprezentována omítkou (1:4, obj.).



Graf 1: Pevnost v tlaku vápenných omítek před a po konsolidaci. Celkové množství konsolidantu bylo shodně 30 mg/cm³. Od každého typu konsolidantu byly konsolidovány tři sady omítek připravené v obj. poměru pojiva/plniva (1/9), které se lišily typem kameniva: Borek (betonářský, praný, tříděný), Vitošov (drcený vápenec), Kema (křemičitý) (v grafu jsou hodnoty pro jednotlivá kameniva reprezentována body vedle sloupcových grafů závislosti).

Hodnoty pevnosti obou omítek určovaly hranice míry zpevnění; (1:4, obj.) reprezentuje stav omítky v nezvětralém stavu. Naopak (1:9, obj.), představuje korodovanou omítku ve značném stupni zvětrání. Autoři metodiky uvažují, že hodnoty pevnosti omítky (1:4, obj.) reprezentují

horní hranici, kam by se pevnost po konsolidaci mohla maximálně zvýšit. Cílem zpevnění je tedy docílit zvýšení hodnot pevnosti vůči degradované omítce, avšak současně nepřekročit pevnost nezvětralé omítky. Tento požadavek je v souladu se závěry, které cituje předkládaná metodika a to zejména požadavky, které uvádí *Sasse a Snethlage* [15]. Z jimi uváděných požadavků na změnu pevnosti substrátu po konsolidaci vyhovují prakticky všechny testované konsolidanty s výjimkou směsí konsolidantů založené na mísení vápenné (vápenná vody nebo nanovápna Calosil IP15) a silikátové složky (KSE 100 nebo Syton X30) a to v interakci s maltami, které obsahovaly zejména křemičitý typ kameniva (KEMA). U nich jsou pevnosti po konsolidaci o několik desítek procent vyšší oproti stanovené horní hranici, tj. pevnosti malty neodegradované. Neznamená to však, že jsou nekompatibilní a pro zpevnění omítek se nehodí. Vyšší míra zpevnění dosažená aplikací těchto směsí je pro praktické užití spíše upozorněním, že směsi křemičitého a vápenného pojiva mohou díky reaktivitě vyvolat vyšší zvýšení pevnosti v substrátu. Nižší pevnost lze upravit např. snížením koncentrace či počtu cyklů aplikace, podmínkami zrání. Pozitivně hodnotit lze při daných podmínkách účinek ostatních konsolidantů, jejichž efekt hodnocený nárůstem pevnosti odpovídá přibližně hodnotám neodegradované vápenné omítky nebo je mírně nižší.



Graf 2: Pevnost v tahu za ohybu vápenných omítek před a po konsolidaci. Celkové množství konsolidantu bylo 30 mg/cm^3 . Od každého typu konsolidantu byly konsolidovány tři sady omítek připravené v obj. poměru pojiva/plniva (1:9, obj.), které se lišily typem kameniva: Borek (betonářský, tříděný, praný), Vitošov (drcený vápenec), Kema (křemičitý).

Pokud bychom měli hodnotit pevnost dle kritérií publikovaných autory *Delgado Rodriguez a Grossi* [16], neměla by odchylka od pevnosti překročit pevnost nezpevněného substrátu (střední hodnota pevnosti v tlaku neodegradovaných omítek 1:9, obj. 0,4 MPa) o více než 10%. Na základě uvedených kritérií by v rámci této studie vyhovoval pouze konsolidant ZFB 15 a to pouze s určitým typem kameniva. Hodnoty pevnosti malt po konsolidaci jsou prakticky

identické (cca 0,4 MPa) s degradovaným substrátem, což je zcela nedostačující výsledek z pohledu dalšího fungování a životnosti omítky. Těmito výsledky lze částečně zpochybnit meze kompatibility při hodnocení zpevnění, které tito autoři uvádí. Uvedené požadavky nereflktují stav substrátu; změna pevnosti o 10% může být dostačující v případě méně degradovaných substrátů, avšak v případě silně poškozených je tato změna nedostačující. Je nutné upozornit, že autoři stanovují tato kritéria pro jimi studovaný příklad, tj. zpevnění kamene a proto nemusí tyto meze zcela platit pro jiný typ materiálu, jako jsou v případě této studie omítky. V případě konsolidace na tomto typu substrátu se setkáváme kromě diskutovaných intervalů změny pevnosti s ještě jiným problémem a to nehomogenitou většiny hornin. Heterogenní charakter hornin má za následek značný rozptyl charakteristik včetně pevnosti. Autory navržená míra zpevnění o 10% je často v rámci rozptylu dané charakteristiky a nelze ji v těchto případech vůbec vyhodnotit. Proto se autoři metodiky domnívají, že více než kvantifikace dle intervalů je třeba stanovit požadavky na zlepšení vlastností po provedení konsolidace obecně, např. tak, jak uvádí *Sasse a Snethlage*.

Tato studie se nezabývala hodnocením hloubky penetrace, která je při hodnocení účinku konsolidantu na reálných objektech zásadní a ovlivňuje trvanlivost opravy stejně jako míra konsolidace.

I.2 Doplnky na kámen

Ověření rozhodných charakteristik a intervalů kompatibility, stanovených pro materiály doplňků hornin, bylo provedeno na základě dvou typů studií:

A/ Hodnocení doplňků sochařských děl z kutnohorského vápence: hodnocení bylo provedeno na sochách sv. Izidora a Václava umístěných na parapetní zdi před Jezuitskou kolejí v Kutné Hoře při hodnocení historických oprav provedených v průběhu 20. století (*Obr. 1*). Posouzení kompatibility opravy bylo možné provést na základě stávajícího stavu a funkce doplňků z umělého kamene po dlouholeté expozici v exteriérových podmínkách. V laboratoři byly na odebraných vzorcích doplňků stanoveny vybrané rozhodné charakteristiky v rozsahu dané množstvím odebraných vzorku. Stanovené charakteristiky byly srovnány s vlastností tmelené horniny. Odchyly od charakteristik byly porovnány s intervaly kompatibility, které uvádí literatura a jsou přehledně shrnuty v textu *Metodiky (kapitola II.1.3)*.

B/ Laboratorní studie – příprava a optimalizace minerálních opravných malt (umělého kamene) pro kutnohorský vápenec: v druhé části ověření byly připraveny laboratorní malty, které byly charakterizovány na základě projektem vybraných rozhodných charakteristik. Cílem bylo postupovat v souladu s metodikou, tj. na základě charakterizace tmelené horniny navrhnout složení opravných malt, na nich poté ověřit vybrané rozhodné charakteristiky a jejich shodu resp. odchylku s daným typem horniny. Cílem bylo otestovat, zda hodnocení kompatibility na základě stanovení rozhodných materiálových charakteristik, které navrhuje metodika společně s intervaly kompatibility, je funkční při návrhu a optimalizaci opravných

materiálů a to v obecném přesahu a lze jej užít pro hodnocení doplňků pro jakýkoliv typ horniny. Vzhledem k rozsahu studie mohlo být ověření provedeno pouze v omezené míře. Pro ověření a diskusi byly shodně jako při hodnocení konsolidace (*Příloha, Kapitola I. 1*) vybrány pevnostní charakteristiky, které jsou v současné praxi pro hodnocení vlastností doplňků na porézní anorganické substráty nejčastěji užívány.



Obr. 1: Socha sv. Václava, parapetní zeď, Jezuitská kolej, Kutná Hora, materiál: kutnohorský vápenec. Restaurátorské opravy na objektu, ilustrativní foto (vpravo).

Experiment a vzorky

A/ Hodnocení doplňků z umělého kamene na sochách před Jezuitskou kolejí

Na sochách před Jezuitskou kolejí bylo v minulosti provedeno několik oprav v umělém kameni, které bylo možné identifikovat na základě barevné a strukturní odlišnosti doplňků. K revizi jejich stavu došlo v rámci stávajícího projektu v roce 2013, jejich průzkum provedli autoři metodiky. Jako podklad k průzkumu sloužila dokumentace a osobní účast odpovědného restaurátora, který provedl poslední opravu v roce 2006. Jeho účast při průzkumu napomohla k přesné identifikaci jednotlivých typů oprav, jejich rozsahu i hodnocení stavu a kvality jejich provedení:

1. *okrové tmely – (vápenné). Tyto doplňky nebyly při restaurování v roce 2006 snímány, neboť jejich stav a interakce s horninou je zcela vyhovující. Vyskytovaly se například na horních partiích křídel andělů. Doplňky lze zařadit do nejstarší fáze oprav (40. léta 20. století).*

2. tmavě a světle šedé tmely o nízké tvrdosti a vhodné struktury - (vápenné, vápeno-cementové), které bylo možné velice snadno sejmout i od nezpevněného podkladu. Doplnky nevyhovují barvou samotné hornině, avšak odstínem respektují barvu znečištěného povrchu. Pravděpodobně obsahovaly v 70. a 80. letech aplikované disperzní pryskyřice typu Dissapol, Dispercoll apod.
3. okrové - nejmladší doplnky pocházejí z restaurátorského zásahu v roce 2006, který provedl J. Ďoubal jsou vyhovující textury i pevnosti. Pojivem je komerčně dodávaná minerální směs SPHK Tradition® na bázi bílého vzdušného vápna s hydraulickou přísadou, do směsi byl přidáván bílý cement v poměru složek 2:1, obj.. Do tmelu byla jako kamenivo přidávána drcená hornina, tj. kutnohorský vápenec a to v poměru (1:3, obj., pojivo:kamenivo).

Popis stavu doplňků (Obr. 2): Všechny typy doplňků jsou v uspokojivém stavu. Problémy se vyskytují zejména v místech zatížení např. vzlínající vlhkostí, odstříkující vodou nebo solemi (v soklových partiích, podstavci) – tmely nejsou porušovány jejich působením ve hmotě, projevují se změnou barevnosti nebo poškozením na rozhraní tmel-hornina (vznikají praskliny navenek patrné po obvodu tmelů) (Obr. 2a), v některých případech se tmely odlučují nebo pod tmelem vzniká dutina. Charakteristickým problémem je lokální vystupování šedých tmelů nad stávající povrch horniny (viz. Obr. 2b – prsty na noze světce), pravděpodobně jako důsledek odlišných vlastností tmelu a horniny, které se projevují i v odlišné rychlosti zvětvávání obou materiálů.



Obr. 2a, b: Stav historických doplňků, charakteristické fenomény.

B) Laboratorní studie

Vzorky minerálních malt byly připraveny s různým typem pojiva, jejichž složení bylo odvozeno na základě mineralogického složení horniny (kutnohorského vápence), které bylo stanoveno pomocí rentgenové difrakční analýzy. Hlavní mineralogickou složkou horniny je uhličitán vápenatý, který tvoří ca 75-80% minerálů zastoupených v hornině. Minoritní klastickou složkou je zejména křemen, z ostatních minerálů jsou zastoupeny v malém

množství slídy, živce, jílové minerály. Složení tvárných směsí umělého kamene bylo přizpůsobeno složení horniny; pojivo bylo minerální, na bázi vzdušného nebo, hydraulického vápna nebo jejich směsi (Tab. 2). Do testování byly dále zahrnuty vápenné malty modifikované přísadami bílého a naturálního cementu, který byl přidáván do vápna v nízké koncentraci; poměr vápno:cement byl stanoven na (4:1, obj.). Odezvu na současnou praxi představovaly maltové směsi připravené průmyslově; ve studii jsou reprezentované modifikovanou minerální směsí na bázi bílého vzdušného vápna s příměsí hydraulického vápna (*SPHK Tradition*) a latentně hydraulického vápna s příměsí puzzolánů (*Tradical PF 70*) a jiných přísad a pigmentů určenou pro tmelení a omítání (distribuce Prisma Consult s.r.o., výrobce Lhoist). Další průmyslově vyráběnou minerální směsí je modifikované vápenné pojivo *VAPO (fa AQUA, Obnova staveb, s.r.o.)*. Přehled všech použitých směsí umělého kamene uvádí Tab. 3. Ve snaze přiblížit se vlastnostem horniny, byla jako kamenivo použita drť kutnohorského vápence připravená z horniny jejím nadrcením; maximální velikost zrna byla 2 mm (odpovídá struktuře horniny). Minerální směsi byly namíchány v poměru pojivo:kamenivo 1:2, obj., které strukturou odpovídají tmelené hornině.

Minerální směsi byly připraveny smícháním pojiva, kameniva a vody (vyjádřený jako vodní součinitel, tj. množství vody vztažené na suché složky) v daných poměrech na shodnou konzistenci odpovídající zpracování umělého kamene (140±10 mm). K míchání byly užity stejné podmínky přípravy v míchače.

Postup zkoušení při stanovení konzistence malt uvádí norma ČSN EN 1015-3. Čerstvé maltové směsi byly vydusány do forem a byly připraveny vzorky pro testování rozhodných charakteristik, které uvádí v *Kapitole II.1.3, Tab. 3* obecné části *Metodiky*. Hranoly o velikosti 4x4x16 cm byly ponechány tuhnout a tvrdnout za podmínek, které stanovuje ČSN EN 1015-11. Vzorky umělého kamene byly testovány po 3 měsících od počátku přípravy.

Vybraná kritéria kompatibility pro hodnocení doplňků/umělého kamene

Ověření doplňků na kutnohorský vápenc je v obou typech studií provedeno odlišným způsobem. Na modelové studii provedené na objektech, kde nebylo možné provést rozsáhlou intervenci do objektů a odběr většího množství vzorků, bylo vyhodnocení provedeno pouze v limitované míře, avšak z ní vyplynula kritická hodnota určitých materiálových charakteristik, jejich význam, příp. možnosti a limity při jejich vyhodnocení. V případě tohoto typu studií jsou důležité a z hlediska požadavků na vzorek proveditelné zejména charakteristiky popisující mikrostrukturu, na základě níž lze materiály dostatečně charakterizovat.

Pojiva doplňků	Popis	Příprava směsí
CL90 (Vitošov)	vápenný hydrát, obsah CaO+MgO 95% (dle ČSN 459-1)	typy tělísek: hranoly 4x4x16 cm
NHL2 Calcidur® (Otterbein,	přirozeně hydraulické vápno	

Německo, distr. Calx Bohemia)	(dle ČSN 459-1)	příprava malt: 1:2, pojivo/kamenivo (obj. d.) vodní součinitel (0,26-0,38) doba zrání: 3 měsíce za podmínek, které pro jednotlivé typy malt udává norma ČSN EN 1015-11
NHL3.5 Calcidur® (Otterbein, Německo, distr. Calx Bohemia)	přírozně hydraulické vápno (dle ČSN 459-1)	
NC (Naturální cement) (Vicat, Francie)	naturální (románský cement)	
BC (Bílý cement) (Aalborg, Dánsko)	bílý cement s nízkým obsahem síranů	
SPHK (Lhoist, distr. Prismaconsult, spol. s r.o.)	vápenné pojivo modifikované (na bázi vzdušného a hydraulického vápna), hydrofobizované	
Tradical PF 70 (Lhoist, distr. Prismaconsult, spol. s r.o.)	latentně hydraulické vápenné pojivo modifikované (na bázi vzdušného a hydraulického vápna, s příměsí puzolánů)	
VAPO pojivo (AQUA Obnova staveb, s.r.o.)	latentně hydraulické vápenné pojivo (s příměsí trasu, metakaolinu)	

Tab. 2: Pojiva doplňků na kutnohorský vápenec. Základní charakteristiky poživ a tvárných směsí.

Receptura	Kamenivo	CL 90	NHL 2	NHL 3,5	SPHK	Tradical PF 70	VAPO pojivo	Naturální cement (NC)	Bílý cement (BC)	w
1 (NHL 2)	2	-	1	-	-	-	-	-	-	0,28
2 (NHL2+CL90)	2	0,5	0,5	-	-	-	-	-	-	0,26
3 (NHL 3.5)	2	-	-	1	-	-	-	-	-	0,28
4 (SPHK)	2	-	-	-	1	-	-	-	-	0,38
5 (Tradical)	2	-	-	-	-	1	-	-	-	0,28
6 (VAPO)	2	-	-	-	-	-	1	-	-	0,33
7 (CL90+VICAT) (CL90+NC)	2	0,8	-	-	-	-	-	0,2	-	0,28
8 (CL90+bílý cement) (CL90+BC)	2	0,8	-	-	-	-	-	-	0,2	0,27

Tab. 3: Složení směsí umělého kamene pro kutnohorský vápenc v objemových dílech. Např. receptura 1 byla připravena smícháním 2 obj. dílů kameniva a 1 dílu NHL2, množství přidané vody bylo 0,28 (vztaženo na suché složky).

U laboratorní studie mohlo být hodnocení doplňků provedeno v celém rozsahu rozhodných charakteristik, jak navrhuje metodika (s výjimkou teplotní a hygrické roztažnosti). Z důvodů velkého rozsahu studie je však hodnocení provedeno pouze na základě vyhodnocení mechanických vlastností, které jsou při posuzování doplňků na horniny v současné praxi považovány za jeden z nejdůležitějších parametrů pro jejich srovnání.

Kritéria pro hodnocení doplňků na kámen uvádí např. [29], stanovením kritérií pro opravné malty na tradiční prvky zdiva se zabývá také [16]. V této studii se uvádí, že pevnost opravné malty na minerální bázi se může od pevnosti substrátu (prvky zdiva - kamene, cihly) lišit o 10%, příp. mohou dosahovat 20-100% pevnosti tmeleného materiálu [29]. Tato kritéria byla autory metodiky zrevidována: *ad 1*) při hodnocení pevnostních charakteristik navržených opravných malt, tj. pevnosti v tlaku a tahu za ohybu; *ad b*) z pohledu váhy těchto charakteristik v porovnání s ostatními určujícími vlastnostmi anorganických porézních materiálů.

Výsledky a diskuse

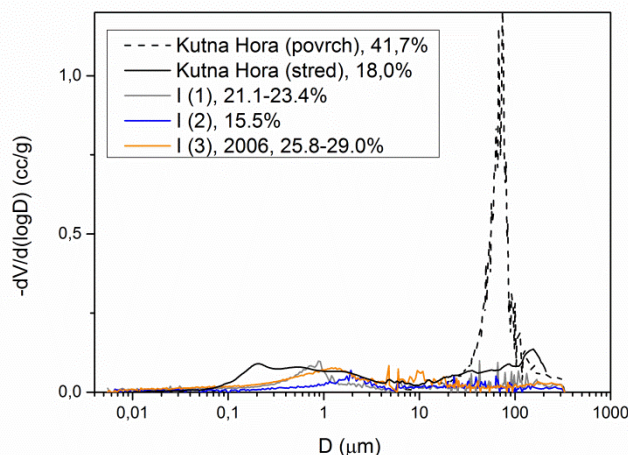
A/ Hodnocení doplňků z umělého kamene na sochách před Jezuitskou kolejí

Na odebraných vzorcích horniny a tmelů byly stanoveny tzv. kritické parametry, avšak v rozsahu, který byl vzhledem k možnostem intervence na objektu možné provést. V obou případech se jedná o sochařská díla, která jsou v současnosti po restaurátorském zásahu (2006) intaktní. Průzkum objektů, ačkoliv se jednalo o modelové případy, byl veden zcela reálně v rozsahu, který je možné na daném typu uměleckých děl provádět. Z tohoto je zřejmé, že rozsah průzkumu a intervence do objektů a tedy možnost stanovení rozhodných charakteristik je značně individuální daný typem památky (sochařské dílo, prvky architektury, fasáda), jeho rozsahem, stávajícím stavem a v neposlední řadě i jejím významem. V tomto případě nebylo možné provádět rozsáhlý odběr vzorků, které jsou např. potřebné pro provedení pevnostních měření, příp. dalších kritických parametrů - modulu pružnosti, roztažnosti a adheze. Z uvedeného je zřejmé, že hodnocení rozhodných parametrů se v tomto případě (obecně můžeme říci pro skupinu sochařských děl) může provést spíše na základě stanovení charakteristik, které nevyžadují zásadní intervenci do objektu nebo lze jejich měření provést in-situ. Možné je tedy provést srovnání na základě látkové charakterizace (v obou případech se jednalo o minerální směsi pravděpodobně s přísadami organických modifikačních přísad) a zejména popisu mikrostruktury stanovením celkové porozity, distribuce pórů. Informaci o mikrostruktuře, míře jejího ztmelení (zpevnění), může poskytnout namísto měření mechanických vlastností stanovení ultrazvukové transmise, která souvisí s jinými charakteristikami - modulem pružnosti, porozitou, objemovou hmotností, aj.. Vzájemnou korelaci uvedených charakteristik prezentují výsledky měření.

a. Porozita, charakterizace porézní struktury

Porézní strukturu porézního materiálu nejlépe vyjadřuje distribuce velikosti pórů a zastoupení jednotlivých velikostních frakcí. *Graf 1* znázorňuje tzv. kumulativní distribuční křivku pro

kutnohorský vápenec a analyzované doplňky provedené v rámci jednotlivých oprav (1-3). V legendě je navíc uvedena hodnota celkové porozity taktéž stanovená metodou rtuťové porozimetrie. U horniny bylo měření provedeno na vzorcích odebraných z povrchu i hloubky, neboť jeho vlastnosti se mohou v různých hloubkách značně odlišovat.



Graf 1: Distribuce velikosti pórů a celková porozita vápence (Kutná Hora) a tmelů ze sochy sv. Izidora (I), 1.-3. fáze doplňků (viz. výše).

Prvním z výsledků jsou rozdílné vlastnosti zdravé horniny a vápence v povrchových vrstvách, které jsou vystaveny působení atmosférických podmínek. Zde byla zjištěna dvakrát větší porozita vůči nedegradované hornině odebrané z jádra. Pokud posuzujeme porozitu vůči 'zdravé' nezvětralé hornině, mají tmely z historických oprav výborné vlastnosti, které jsou prakticky stejně porézní jako substrát, se stejnou skladbou pórů (odchylka celkové porozity není více než $\pm 20\%$). V případě opravy 2 je porozita nižší oproti tmelené hornině; tento, i když nepatrný rozdíl, může z dlouhodobého hlediska přispívat k problémům pozorovaným na objektu (vystupování tmelů nad povrch horniny). Problém může nastat při tmelení zvětralé horniny, jehož porozita a vlastnosti původní kvalitě horniny neodpovídá a její doplnění, i když dobře navržené, nemusí vyhovovat. V tomto případě jsou hodnoty porozity horniny na povrchu na hranici soudržnosti a při restaurátorském zásahu by bylo nutné její důkladné zpevnění, které by ve výsledku znamenalo i další změnu v porézni struktuře (snížení porozity). Z tohoto hlediska jsou tmely navržené při poslední opravě dostatečné – tmely provedené na zpevněný substrát jsou více porézní v porovnání se zdravou horninou, avšak blíže hornině v aktuálním stavu.

Při hodnocení doplňků je nutné dále upozornit, že se jedná o středně nehomogenní horninu, jejíž vlastnosti mohou v závislosti na nehomogenitách značně kolísat. Také míra zvětrání horniny se může v závislosti na expozici značně měnit. To je druhé hledisko, které je nutné vzít v úvahu při porovnávání materiálových charakteristik; návrh doplňků na nehomogenní, spíše hrubozrnné horniny bude vždy velice komplikovaný a posouzení navržených opravných směsí na základě rozhodných materiálových charakteristik velice orientační.

Kromě celkové porozity je důležitou informací porovnání distribuce pórů a to zejména v oblasti tzv. kapilárně aktivních pórů, tj. pórů s velikostí 5-0,1 μm . Jejich zastoupení ovlivňuje hodnoty celkové porozity, nasákavosti vodou a kapilární absorpci vody.

b. Nasákavost vodou, otevřená porozita

V Tab.4 jsou uvedeny hodnoty otevřené porozity, nasákavosti vodou stanovené za normálního tlaku. Koeficient kapilární absorpce, který je mírou schopnosti materiálu transportovat vodu a vodné roztoky, nebyl stanoven, neboť povrch soch i doplňků byl znečištěný a v rámci restaurátorského zásahu v roce 2006 navíc opatřen hydrofobizací a hodnoty kapilární nasákavosti horniny i tmelů mohou být značně zkreslené. Jeho stanovení v laboratoři je také znemožněno, neboť pro její měření je potřeba odebrat větší množství vzorků navíc pravidelného tvaru.

Vzorek	Otevřená porozita P_0 [obj. %]	Nasákavost vodou A [hm. %]
vápenec (KH)	9,0-17,0	4,9-9,5
I (1)	5,8-15,4	3,0-8,1
I (2)	8,0-14,0	4,5-7,4
I (3)	19,0	9,6
V (I)	3,1-11,6	1,7-6,0
V (2)	-	-
V (3)	21,1	10,6

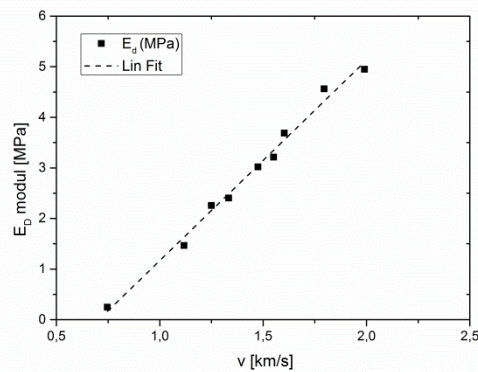
Tab. 4: Vybrané hygrické parametry naměřené na soše sv. Izidora (I) a Václava (V) z kutnohorského vápence a jejich doplňků (1-3).

Z výsledků je patrné, že hodnoty otevřené porozity i nasákavosti vodou horniny a opravných tmelů mohou být značně rozdílné pravděpodobně ovlivněné alteracemi nebo úpravami objektu (stárnutí, znečištění, opravy). Hodnoty otevřené porozity i nasákavosti naměřené na obou typech materiálů nabývají hodnot ve značném rozptylu; samotná hornina se vyznačuje střední porozitou a spíše nižší nasákavostí, shodně se vzorky tmelů. Jediný významný rozdíl pozorovaný při posouzení těchto charakteristik je výrazně vyšší hodnota otevřené porozity tmelů z poslední opravy z roku 2006; jejich nasákavost je srovnatelná nebo vyšší oproti tmelené hornině. Hodnoty nasákavosti vodou i otevřené porozity u materiálů obecně souvisí se zastoupením středních (kapilárních) pórů o velikostech 0,1-5 μm a větších pórů; z výsledků je zřejmá shoda horniny a opravných tmelů v distribuci pórů (všechny typy oprav mají póry lokalizovány do kapilární oblasti), liší se pouze jejich četností. Hlavní rozdíl horniny a tmelů spočívá v zastoupení tzv. makropórů, které tvoří póry o velikosti cca 100 μm a díky jejich velikosti nebudou vyplněné vodou.

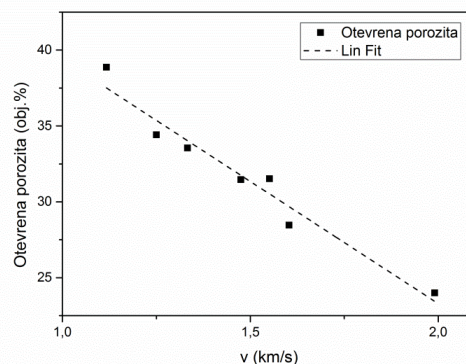
c. Pevnost (v tlaku, tahu za ohybu)

Pro měření pevnostních charakteristik je třeba dostatečné množství vzorků, které při studiích tohoto typu nelze z objektů odebrat a tak parametr stanovit. Určité řešení představuje měření rychlosti ultrazvukové transmise. Jedná se o metodu, jejíž hlavní výhoda spočívá v možnosti

neinvasivního měření. Je určena pro diagnózu či charakterizaci porézních stavebních materiálů jako kamene, omítky, konstrukčních materiálů a umělého kamene. Běžně se tato metoda používá pro detekci poruch v různém typu porézních materiálů, avšak několik příkladů a studií ukazuje, že tato metoda může být i charakteristikou materiálu. Při měření se stanovuje čas průchodu UZ vlny, která se šíří materiálem ve směru jeho délky, tzv. longitudální (podélný) směr. Ze vzdálenosti sond, které se při měření přikládají na objekt, se stanovuje rychlost průchodu v v km/s . Hodnota je závislá na mikrostruktuře a látkovém složení materiálu a dále na jeho stavu (jeho hustotě čili objemové hmotnosti, jinak kompaktnosti). Jak naměřili autoři metodiky na sadě laboratorních malt se známými vlastnostmi, je rychlost průchodu UZ vlny závislá na pružnosti materiálu, tj. souvisí s dynamickým modulem pružnosti E_D (*Graf 3*) jeho porozitou (*Graf 4*), v případě minerálních doplňků na kámen však nikoliv s pevností (v případě minerálních doplňků na omítky či maltoviny závislost rychlosti UZ transmise na pevnosti platí).



Graf 3: Korelace rychlosti UZ transmise a dynamického modulu pružnosti E_D . Stanoveno pro směsi umělého kamene s různým typem pojiva pro tmelení kutnohorského vápence.



Graf 4: Korelace rychlosti UZ transmise a otevřené pórovitosti. Stanoveno pro směsi umělého kamene s různým typem pojiva pro tmelení kutnohorského vápence.

Tento závěr je zřejmý, pokud si uvědomíme, že pevnosti horniny jsou několikanásobně vyšší dané mineralogicky odlišnou skladbou a vznikem horniny.

K charakterizaci doplňků bylo provedeno měření rychlosti UZ transmise na vzorcích horniny a odebraných vzorcích doplňků z jednotlivých fází oprav (Tab. 5). Z porovnání rychlosti ultrazvukové transmise vyplývá, že tmely na kutnohorský vápenec provedené při 1. opravě a poslední z roku 2006 jsou podobné a mírně vyšší hodnota rychlosti pro 2. opravu koreluje s vizuálním průzkumem (tmely jsou pevnější než samotná hornina, tmely vystupují nad tmelené okolí) i ostatními charakteristikami (nižší celková porozita).

Vzorek	sv. Izidor [km/s]	sv. Václav [km/s]
vápenec, Kutná Hora	2,9 (povrch: 1,0-1,3)	
(1)	2,6-4,4	3,7-3,9
(2)	3,5-4,8	-
(3), 2006	1,7-3,1	2,1-2,2

Tab. 5: Rychlost ultrazvukové transmise v (km/s) naměřené na sochách sv. Izidora a Václava z kutnohorského vápence, hodnoty rychlosti pro horninu a doplňky provedené v rámci oprav.

Obdobným způsobem lze charakterizovat jakoukoliv horninu i umělý kámen používaný pro jejich opravu. Hodnoty rychlosti UZ transmise u vybraných typů tuzemských hornin a opravných minerálních malt uvádí (Tab. 6). Na základě měření rychlosti průchodu ultrazvuku (transmise) lze orientačně porovnat tmelenou horninu s navrženým opravným materiálem.

Horniny	v [km/s]	Opravné minerální systémy	v [km/s]
pískovec Hořice	2,1-3,0	vápenné	1,6-2,2
pískovec Maletín	3,2-3,4	NHL5	2,2-2,9
mramor, krystalické vápence	5,5-6,0	Naturální cementy	2,8-3,6
		Portlandský cement	4,0-5,1

Tab. 6: Rychlost ultrazvukové transmise vybraných tuzemských hornin a minerálních opravných malt s různým typem pojiva.

Stručné shrnutí – využitelnost metodiky pro daný typ studie

V daném příkladu studie je zřejmá omezená možnost srovnání doplňků na základě porovnání jejich rozhodných charakteristik. A i srovnání na základě limitovaného počtu z nich je nutné brát s ohledem na jejich historii (předchozí opravné zásahy i přirozené alterace), které mohou měnit skutečné vlastnosti původně navržených materiálů. Srovnání je možné provádět na základě látkového složení, charakterizace mikrostruktury a částečně hygrických vlastností provedené v rozsahu, které objekt umožňuje. Pokud jsou doplňky v umělém kameni rozsáhlé je mírou mikrostruktury, soudržnosti i elasticity rychlost UZ transmise, která může být stanovena bez odběru vzorků přímo na objektu. Z výše uvedených poznatků i výsledků je zřejmé, že hodnocení kompatibility historických doplňků je značně komplikované a více než

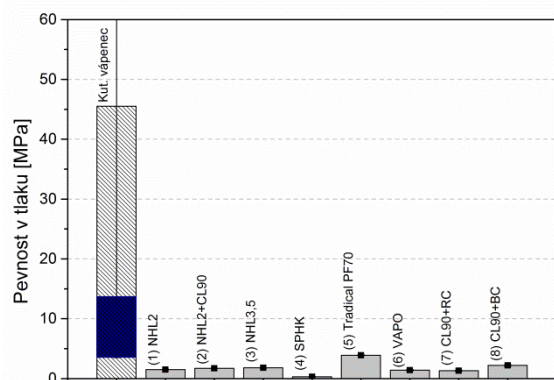
provádět jejich hodnocení v rámci přesných odchylek dané charakteristiky jak uvádí [16] je lepší hodnotit opravu tak, aby byla dosažena maximální shoda ve stanovených charakteristikách se substrátem a to v jejich maximálním počtu [29].

B/ Laboratorní malty navržené pro opravu kutnohorského vápence

Tato část studie představuje druhý typ využití předkládané metodiky. Jejím cílem je na základě znalosti vlastností horniny navrhnout opravný systém na minerální bázi (umělý kámen), který svými vlastnostmi vyhovuje danému typu substrátu, v našem případě kutnohorskému vápenci. Porovnání by mělo být založeno na srovnání vybraných kritických charakteristik, které pro posouzení doplňků navrhuje předkládaná metodika. Za tímto účelem bylo připraveno celkem 8 minerálních směsí umělého kamene s různým typem pojiva podobného chemického a mineralogického složení jako tmelená hornina (s karbonátovým typem pojiva). Kompatibilitu doplňků z pohledu složení podpořilo užití kameniva, kterým byla drcená hornina kutnohorského vápence. Přehled použitých pojiv a složení tvárných směsí udává *Tab. 2 a 3*. Vzhledem k rozsahu studie, která nebyla primárně v rámci metodiky plánována, je postup při hodnocení doplňků proveden pouze na základě porovnání vybraných rozhodných materiálových charakteristik. Stejně jako v případě ověření konsolidačního účinku (*kapitola I. 1*) byly doplňky na vápenec posouzeny na základě mechanických vlastností, tj. pevnosti v tlaku, tahu za ohybu, doplněné o měření modulu pružnosti a ultrazvukové transmise. Pevnost jako materiálová charakteristika byla vybrána záměrně, neboť je v případě posuzování doplňků považována za parametr zásadní pro jejich hodnocení. Studie však ukázala, že v případě posuzování minerálních doplňků určené pro kámen nemůže být tento parametr pro srovnání vůbec užíván; jako kritický se ukazuje být pouze v případě porovnání doplňků historických malt a omítek. Mnohem důležitější v případě hodnocení tvárných směsí umělého kamene jsou ostatní charakteristiky, např. dynamický modul pružnosti, ultrazvuková transmise, hygriční parametry, roztažnost.

a. Pevnost (v tlaku, ohybu), ultrazvuková transmise a modul pružnosti

Graf 5 a 6 ilustruje rozdíly v pevnostech hornin (kutnohorský vápenec) a laboratorně připravených tvárných směsí umělého kamene. Kutnohorský vápenec může nabývat mechanických vlastností ve velmi širokém intervalu hodnot; pro kameno-sochařská díla byla využívána zejména hornina s nižší pevností, ale dobrou opracovatelností, vyznačující se hodnotami pevnosti v tlaku 3,5-13 MPa (naměřeno autory na sadě vzorků odebraných ze sochařských děl). I přes relativně nízkou pevnost vápence je zřejmá její zásadní odlišnost vůči navrženým opravným systémům (max. 3,9 MPa, směs 5, *Tradical PF70*); rozdíly vůči hornině se pohybují v řádu několika desítek procent (v porovnání s horninou pro sochařské účely).



Pojiva opravných minerálních směsí /umělého kamene:

NHL 2, 3,5 – přirozeně hydraulické vápno

CL90 – vápenný hydrát

BC – bílý cement

RC – románský (naturální) cement

VAPO pojivo – vápenné pojivo s přísadami

SPHK – CL90+hydr.pojivo+pig.

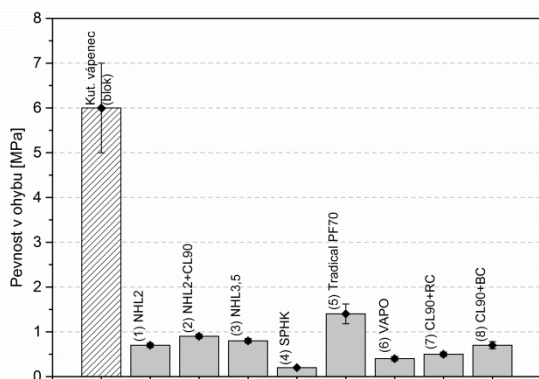
Tradical PF70 – CL90 + hydr. pojivo +pucolán

Graf 5: Pevnost v tlaku kutnohorského vápence a laboratorních tvárných směsí umělého kamene. Hodnoty pevnosti kutnohorského vápence mohou dosahovat značných rozdílů. Kámen pro tvorbu sochařských děl se vyznačoval nižší pevností v tlaku, která se pohybuje v intervalu 3,5-13 MPa (naměřeno autory metodiky na sadě vzorků KH vápence odebraného z vybraných sochařských děl a architektonických prvků).

Identický trend vykazuje pevnost v tahu za ohybu (*Graf 6*), u nichž však autory hodnoty pevnosti charakteristické pro kameno-sochařská díla nebyly určeny. Výsledky zjištěné studií lze zobecnit i pro doplňování jiných typů hornin, tj. pevnostní charakteristiky pro hodnocení umělého kamene na přírodní substrát nemohou sloužit jako srovnávací parametr pro jejich hodnocení. *Graf 7* ilustruje pevnosti v tlaku hornin užívaných pro kameno-sochařské účely v ČR a různé typy minerálních směsí s různým typem minerálního pojiva, ze kterých lze doplňky hornin připravit. Pokud bychom kompatibilitu směsí umělého kamene posuzovali dle přesných intervalů, které uvádí obecná část metodiky ze zdrojů [16, 29], je nutné se v tomto případě přiklonit spíše k platnosti požadavků, které navrhují autoři *Isabaert, Van Parys, Cnudde* [29]. Ti pro doplňky hornin stanovují požadavek na obecně nižší pevnost doplňků vůči originálu; mechanické charakteristiky by měly dosahovat 20-100% hodnot naměřených na substrátu. Sami autoři předkládané metodiky by se přikláněli k více obecnému závěru, tj. že doplňky na kámen musí mít obecně nižší pevnost. Přesnější by dokonce v případě tohoto typu studie (kámen-umělý kámen) bylo vyloučení pevnosti ze skupiny rozhodných charakteristik (pozor - neplatí pro doplňky na maltoviny) a srovnání provést na základě jiných materiálových charakteristik, např. modulu pružnosti, porozity, rychlosti UZ transmise, aj. (*Graf 8-10*). V každém případě ze studie vyplývá, že stanovené intervaly pro doplňky na kámen nejsou přesné, a pokud bychom doplňky na základě nich posuzovali, vyhovovaly by pro většinu hornin pouze tvárné směsi na bázi cementu, jehož škodlivý účinek je všeobecně znám (*Graf 7*).

Jako nejslibnější, zatím však spíše sporadicky užívanou, charakteristikou pro srovnání doplňků s horninou je rychlost UZ transmise. Výhodou stanovení rychlosti je možnost měření in-situ, bez invaze do objektu či odběru vzorků, které je ve většině projektů obnovy znemožněno nebo značně limitováno. Její zásadní význam spočívá v její souvislosti s jinými materiálovými charakteristikami – modulem pružnosti a obecně mikrostrukturními charakteristikami (porozita, mineralogické složení, ztmelení horniny) (viz. *Grafy 3,4*). Pro správné vyhodnocení je však nezbytná znalost daného materiálu, jeho základních vlastností i

naměřená data na standardních vzorcích. Měření i vyhodnocení je tedy nutné provádět s technologem či materiálových inženýrem navíc se zkušeností s touto technikou. Limitem metody je ad 1) vysoká citlivost na nehomogenity v hornině, které mění rychlost UZ transmise. Změny mohou být vyvolány např. mírou ztmelení, uspořádáním sedimentačních vrstev, poruchami. ad 2) malá propracovanost ve smyslu intervalů kompatibility – prozatím nebyly zjištěny ‘dovolené’ odchylky hodnot rychlosti pro kompatibilní zásah, které je nutné stanovit individuálně pro daný typ horniny. Požadavky na možné odchylky doplňku prozatím zůstávají v obecné rovině – doplněk by měl dosahovat nižší nebo srovnatelnou rychlost transmise opravného systému v porovnání s tmeleným substrátem (nižší hodnoty odpovídají menšímu ztmelení materiálu) [46,47]. Z tohoto hlediska lze pozitivně hodnotit prakticky všechny testované systémy tvárných směsí umělého kamene na kutnohorský vápenec (*Graf 8*). Referenční hodnoty horniny (zvětralé, konsolidované nebo naměřené in-situ) vykazují s opravnými maltami prakticky identickou nebo vyšší rychlost transmise v porovnání s minerálními doplňky. Z tohoto hlediska na tento typ horniny vyhovují jako pojiva doplňků přirozeně hydraulická vápna (NHL) samotná nebo ve směsi s vápenným hydrátem, která, jak ukazují výsledky, míru ztmelení neovlivňují. Z hlediska posouzení rychlosti UZ transmise je vyhovující i tradičně užívaná kombinace vzdušného vápna a cementů, avšak přidávaného v nízkých koncentracích do 20% objemu pojiva. Komerční směsi také v zásadě vyhovují, vyšší míru ztmelení vykazuje směs s přísadkou puzzolánů, Tradical PF70, naopak SPHK se vyznačuje výrazně nižší mírou ztmelení ($v < 1$ km/s, takto nízké rychlosti odpovídají materiálům s výrazně nižší soudržností).



Pojiva opravných minerálních směsí /umělého kamene:

NHL 2, 3,5 – přirozeně hydraulické vápno

CL90 – vápenný hydrát

BC – bílý cement

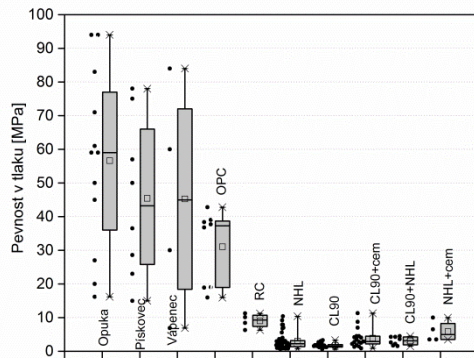
RC – románský (naturální) cement

VAPO pojivo – vápenné pojivo s přísadami

SPHK – CL90+hydr.pojivo+pig.

Tradical PF70 – CL90 + hydr. pojivo +pucolán

Graf 6: Pevnost v tahu za ohybu kutnohorského vápence a laboratorních tvárných směsí umělého kamene. Hodnoty pevnosti kutnohorského vápence mohou dosahovat značných rozdílů. Kámen pro tvorbu sochařských děl se vyznačoval nižší pevností v tahu za ohybu (autory nebyly hodnoty charakteristické pro kameno-sochařská díla naměřeny).

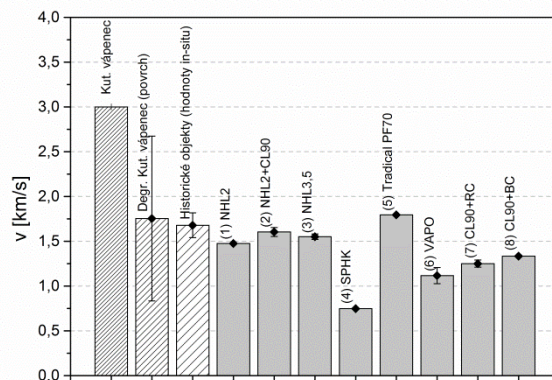


Pojiva opravných minerálních směsí /umělého kamene:

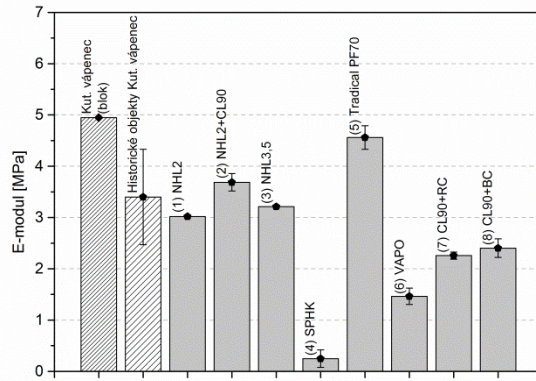
NHL – přirozeně hydraulické vápno
 CL90 – vápenný hydrát
 RC – románský (naturální) cement
 cem – bílý cement

Graf 7: Pevnost v tlaku tuzemský typů hornin užívaných pro kameno-sochařské účely a minerálních tvárných směsí s různým typem pojiva užívaných pro jejich opravu. Data byla shromážděna z literatury [50-58] a naměřena autory na vzorcích historických malt i laboratorně připravených tvárných směsí.

Při hodnocení doplňků je nutné dále sledovat i jiné kritické materiálové charakteristiky, které jsou v příloze metodiky prezentovány pouze s cílem ilustrovat jejich váhu v rámci porovnání s pevností. Např. hodnoty modulu pružnosti poukazují na nižší houževnatost směsí s přidavkem cementu (nižší modul pružnosti) a směsi VAPO a naopak vysokou houževnatost tvárné směsi s pojivem Tradical PF70 (na bázi latentně hydraulické maltoviny). Shodně s ostatními výsledky má nízký modul pružnosti komerční minerální směs SPHK, která však souvisí s nízkou kohezí samotné tvárné směsi umělého kamene. Tmelené hornině z hlediska odezvy materiálu vůči napětí nejlépe vyhovují směsi na bázi přirozeně hydraulického vápna (směsi 1-3).

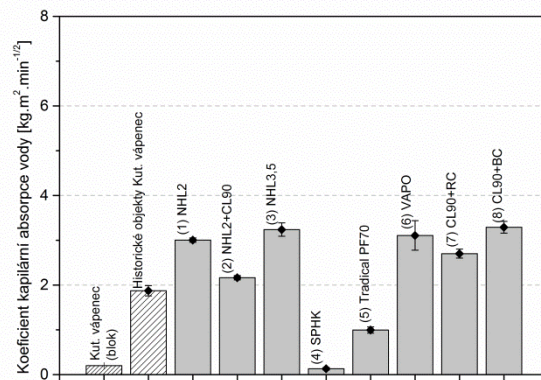


Graf 8: Rychlost UZ transmise v (km/s) pro kutnohorský vápenec a laboratorní tvárné směsi umělého kamene.



Graf 9: Dynamický modul pružnosti E (MPa) pro kutnohorský vápeneč a laboratorní tvárné směsi umělého kamene.

Směsi na bázi hydraulického vápna jsou podobné tmelené hornině i například ve schopnosti transportu vody materiálem (*Graf 10*). Hodnoty horniny (naměřené na sadě kamenosochařských objektů) a tvárných směsí připravených v laboratoři mají koeficient kapilární absorpce vody 2-3,5 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1/2}$, což je minimální rozdíl v rámci porovnání tohoto parametru. Odlišné chování vykazovala směs SPHK s řádově nižší kapilaritou, která však obsahuje hydrofobní přísady snižující nasákavost.



Graf 10: Kapilarita kutnohorského vápence a laboratorních tvárných směsí umělého kamene.

Posouzení ostatních kritických materiálových charakteristik může pomoci při bližší charakterizaci tmelů a popisu jejich možného účinku na tmelenou horninu. Každý z parametrů je schopen detailněji popsat daný systém, na základě něž lze také přesněji optimalizovat systém opravného materiálu/umělého kamene.

Sumarizace výsledků studie

Pro ověření výsledků předkládané metodikou, byly provedeny konkrétní příkladové studie, které řeší hodnocení vybraných opravných materiálů a technologií určených pro opravu historických poréznych materiálů (kámen, omítka). Vyhodnocení zásahů bylo provedeno na základě měření metodikou určených rozhodných charakteristik materiálu před a po opravě, které byly v dalším kroku vyhodnoceny dle na opravu uváděných požadavků. Jejich posouzením a srovnáním s opravovaným materiálem lze definovat kvalitu opravného zásahu, posoudit jeho kompatibilitu a stanovit možná rizika, které z takové opravy vyplývají.

Studie byly provedeny pro dva základní typy opravných zásahů prováděných na různých typech poréznych anorganických materiálů – konsolidace historických omítek a doplňování hornin. Nejrozsáhlejší studie byla provedena pro hodnocení doplňků/umělého kamene na kutnohorský vápenec. Testováním jejich vlastností a optimalizací složení tvárných směsí na tento typ horniny se autoři metodiky dlouhodobě zabývají. Z provedených modelových studií vyplynulo několik obecných i konkrétních poznatků, které významně doplňují předkládanou metodiku.

- Stanovené rozhodné charakteristiky, jak je uvádí předkládaná metodika, mohou být použity pro hodnocení opravného zásahu či opravné technologie. Tak jak jsou u každého typu zásahu uvedeny, lze jimi posoudit kvalitu zásahu a míru změny vlastností opraveného materiálu po intervenci. Ověření opravy lze provádět i na základě dílčího počtu rozhodných charakteristik, avšak tak jak jsou v metodice uvedeny, poskytnou komplexní informaci o účinku opravy (např. na mikrostrukturu, chemické složení, hyrické vlastnosti, atd.). Důkladné vyhodnocení materiálových charakteristik ve vztahu k substrátu by mohlo vést k provedení promyšlené a zodpovědné opravy, která je vzhledem k objektu šetrnější a dlouhodobě účinná.
- V metodice byly požadavky na provedenou opravu stanoveny na základě intervalů, ve kterých se změna dané charakteristiky materiálu po opravě může odchylovat od neošetřeného substrátu, aniž by došlo k jeho poškození. Odchylky materiálových charakteristik byly shromážděny z dosud publikovaných odborných prací a studií. Ve shromážděných datech však na základě ověření autoři metodiky shledali některé nedostatky a rozpory, které spočívají v nastavení mezí, tzv. intervalů kompatibility, které byly zpracovány pro jednotlivé materiálové charakteristiky. Vzhledem k rozsahu, autoři ověřili intervaly navržené pro změnu pevnostních charakteristik pro oba typy opravy.
- Oba případy vedou autory spíše k závěrům hodnotit opravu v obecnější, ale všeobecně platné rovině. Příkladem je posouzení míry konsolidace historických omítek, které uvádí část příkladové studie I.1. Změna pevnosti by více než v přesných intervalech definující povolenou odchylku pevnosti pro pozitivní intervenci měla být vyjádřena limity dané vlastnosti (zejména definováním maximální hodnoty pevnosti po konsolidaci) a popsán její účinek (v tomto případě je požadavkem homogenní distribuce konsolidantu). Tento typ kritérií částečně naplňuje již publikovaná studie autorů *Sneathlage, Sasse* [15], více než v textu citovaná práce [16], která připouští absolutní odchylku pevnosti o 10% oproti nezpevněnému substrátu, aniž by reflektovala jeho aktuální stav a charakter. V případě silně degradovaných substrátů (zvláště omítek) je zvýšení pevnosti o 10% zcela nedostačující. Také pro heterogenní substráty je 10% změny pevnosti v rámci možné odchylky vlastností materiálu.

- Spíše než stanovení přesných intervalů kompatibility, je cílem opravy docílit maximální shody v parametrech s opravovaným substrátem ve 'zdravém' stavu, který je nutné vždy definovat (nutně nemusí být stav počáteční).
- Ještě radikálnější závěry autoři činí při hodnocení doplňků/umělého kamene na minerální bázi pro opravu hornin, které byly hodnoceny na základě odchylky pevnosti doplňku a tmelené horniny. Odlišné petrologické vlastnosti obou typů materiálů mají za následek jejich odlišné mechanické vlastnosti. Např. zatímco pevnost v tlaku hornin dosahuje několik desítek MPa, minerálních směsí jsou méně pevné s pevnostmi dosahující hodnoty o řád nižší. Spíše než pevnost je tedy nutné srovnat doplňky na kámen na základě jiných charakteristik (např. hygrických vlastností, modulu pružnosti, rychlosti UZ transmise, aj.).
- V případě reálně řešených projektů obnovy prováděné na porézních minerálních materiálech je nutné přihlížet ještě k dalším faktorům, které výše uvedené závěry autorů podporují. Minerální porézní materiály jsou často heterogenní substráty s různým složením, historií a poškozením. Všechny tyto charakteristiky materiálu také znemožňují bližší určení intervalů kompatibility, neboť míra odchylky v rámci samotného materiálu může přesahovat meze změny kladené na opravný zásah.
- V některých případech, zejména homogenních, jemnozrnných či středně zrnných substrátů se známou skladbou a historií, však hodnocení lze provést. Na druhou stranu požadavky stanovené metodikou mohou vyhovovat jednomu typu horniny, naopak jiná může být ke změně ve stejném rozsahu citlivější a to díky některé její charakteristice (např. homogenní pískovce s přítomností jílových komponent se liší v chování v porovnání s křemičitými jemnozrnnými pískovci). V neposlední řadě je nutné brát v úvahu vnější vlivy. Příkladem může být účinek solí; i když bude daný materiál vyhovovat v rozhodných charakteristikách vlastnostem substrátu nemusí se 'osvědčit' např. v případě zatížení solemi nebo mrazem.

Reference:

- [51] Gullotta, D., Goidanich, S., Tedeschi, C., Nijland, T.G., Toniolo, L.: Commercial NHL-containing mortars for the preservation of historical architecture. Part 1: Compositional and mechanical characterisation, *Construction and Building Materials* 38, 2013, pp 31-42.
- [52] Starinieri, V., Hughes, D. C., Wilk, D.: Influence of the combination of Roman cement and lime as the binder phase in render mortars for restoration. *Construction and Building Materials* 44, 2013, pp 192-199.
- [53] Pacheco-Torgal, F., Farai, J., Jalali, S.: Some considerations about the use of lime-cement mortars for building conservation purposes in Portugal: A reprehensible option or a lesser evil. *Construction and Building Materials* 30, 2012, pp 488-494.
- [54] K.E Hassan, J.J Brooks, L Al-Alawi, Compatibility of repair mortars with concrete in a hot-dry environment. *Cement and Concrete Composites* 23 (2001) 93-101.
- [55] Papayianni, I., Pachta, V., Stefanidou, M.: Analysis of ancient mortars and design of compatible repair mortars: The case study of Odeion of the archaeological site of Dion. *Construction and Building Materials* 40 (2013) 84-92.
- [56] Marques, S.F., Ribero, Silva, S.F. , Ferreira, V.M., Labrincha, J.A.: Study of rehabilitation mortars: Construction of a knowledge correlation matrix; *Cement and concrete research* 36, 2006, pp 1894-1902.
- [57] Approach for compatible mortars for restoration purposes: stone repairs of the roman amphitheatre of arles (France). dostupné z: <http://www.rilem.net/images/publis/pro067-007.pdf>
- [58] Rosário, M., Aguiar, V.J., Silva, A.S., Carvalho, F.: Methodologies for characterization and repair of mortars of ancient buildings.