

# PŘÍSPĚVEK TECHNICKÝCH VĚD K ZÁCHRANĚ A RESTAUROVÁNÍ PAMÁTEK

Miloš Drdáčký | Zuzana Sližková | Jaroslav Valach | editoři









**Příspěvek  
technických věd  
k záchraně  
a restaurování  
památek**



# PŘÍSPĚVEK TECHNICKÝCH VĚD K ZÁCHRANĚ A RESTAUROVÁNÍ PAMÁTEK

**Miloš Drdáčký, Zuzana Slížková,  
Jaroslav Valach**  
editoři



Ústav teoretické a aplikované mechaniky  
AV ČR, v. v. i.



Centrum excellence Těč

---

Vydáno v roce 2015

**Editoři:** © Miloš Drdácý, Zuzana Slížková, Jaroslav Valach  
© Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., Praha

**Autoři:** © Pavel Beneš, Pavel Beran, Riccardo Cacciotti, Martin Čerňanský, Miloš Drdácý, Jakub Ďoubal, Dita Frankeová, Petr Gläser, Hana Hasníková, Jan Chlád, Karel Juliš, Petr Justa, Michal Kloiber, Zdeněk Kouba, Jiří Kunecký, Jaroslav Lesák, Štěpán Major, Cristiana Lara Nunes, Stanislav Pospíšil, Zuzana Slížková, Jan Tippner, Renata Tišlová, Jaroslav Valach, Jan Válek, Daniel Vavřík, Jan Vojtěchovský, Benjamin Wolf, Pavel Zíma, Jan Žemlička

**Fotografie:** © Ron Anthony, Pavel Beran, Rudolf Bruner-Dvořák, Riccardo Cacciotti, Václav Douša, Miloš Drdácý, Tomáš Drdácý, Milan Dropka, Dita Frankeová, Hana Hasníková, Michal Hřeka, Michal Jánský, Bo Kasal, Michal Kloiber, Jiří Kunecký, Jaroslav Lesák, Štěpán Major, Cristiana Lara Nunes, Stanislav Pospíšil, Zuzana Slížková, Olga Trmalová, Shota Urushadze, Jaroslav Valach, Jan Válek, Daniel Vavřík, Michal Vopálenský, Benjamin Wolf, Pavel Zíma, Jan Žemlička, Národní galerie, <http://www.ikaros.cz>, <http://www.ntm.cz/projekty/vysouseci-pracoviste/index.html>, Die Hausbücher der Nürnberger Zwölfbrüderstiftungen, Amb. 317, fol. 36r

**Recenzent:** © Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Dipl. Arch. ETH Christian Hanus

e-ISBN 978-80-86246-49-9

DOI 10.21495/49-9



# Obsah

<b>Úvod</b> ( <i>M. Drdácý</i> ) .....	<b>13</b>
<b>Určování materiálových charakteristik historických konstrukcí</b> .....	<b>21</b>
Nestandardní laboratorní zkoušky malt ( <i>M. Drdácý</i> ) .....	21
<i>In situ</i> zkoušení kvality a zdraví historického dřeva ( <i>M. Kloiber, M. Drdácý, J. Tippner</i> ) ...	29
Zkoušení betonů a hornin <i>in situ</i> ( <i>Š. Major, P. Beneš</i> ) .....	40
Měření podpovrchové soudržnosti historických materiálů ( <i>M. Drdácý</i> ) .....	50
Terénní měření nasákavosti porézních materiálů ( <i>M. Drdácý, H. Hasníková, P. Zíma</i> ) .....	61
<b>Poruchy a ochrana historických konstrukcí</b> .....	<b>73</b>
Glosář degradace architektonických povrchových vrstev ( <i>M. Drdácý</i> ) .....	73
Degradace mozaik vystavených účinkům povětrnosti ( <i>J. Valach</i> ) .....	85
Ontologie a kulturní dědictví ( <i>J. Valach, R. Cacciotti, M. Čerňanský, Z. Kouba</i> ) .....	95
Teplotní vlivy na degradaci památek ( <i>P. Beran</i> ) .....	107
Analýza poruch a ochrana památek před účinky povodní ( <i>M. Drdácý</i> ) .....	130
<b>Historické materiály a technologie</b> .....	<b>149</b>
Replikace výroby vápna ( <i>J. Válek</i> ) .....	149
Návrh tesařských spojů pro opravy dřevěných konstrukcí ( <i>J. Kunecký, H. Hasníková, M. Kloiber</i> ).....	162
<b>Materiály, technologie a metodická podpora restaurování památek</b> .....	<b>171</b>
Zpevňování omítek vápennou vodou ( <i>M. Drdácý, Z. Slížková</i> ) .....	171
Zpevnění vápenných stavebních materiálů vápennou nanodisperzí ( <i>Z. Slížková, D. Frankeová</i> ) .....	187
Vápenná malta se zvýšenou vnitřní hydrofobicitou ( <i>C. L. Nunes, Z. Slížková</i> ) .....	199
Využití pucolánové aktivity historických malt ke zvýšení konsolidačního efektu ( <i>D. Frankeová, Z. Slížková</i> ).....	211
Pokročilé technologie průzkumů historických konstrukcí ( <i>M. Drdácý, J. Lesák, J. Válek</i> ) .....	222
Zkoušení konsolidačních efektů na maltách a horninách ( <i>M. Drdácý</i> ) .....	243
Modelování účinků prostředí v klimatickém větrném tunelu ( <i>S. Pospíšil, M. Drdácý</i> ) ....	259
Oprava vápenců umělým kamenem – postup při návrhu doplňků pro sochařská díla a prvky architektury ( <i>R. Tišlová</i> ) .....	276
Stanovení ekonomické náročnosti restaurátorského zásahu ( <i>P. Gläser, J. Chlád, J. Důbal, P. Justa, J. Vojtěchovský</i> ) .....	292
<b>Udržitelnost sbírek v muzeích a galeriích</b> .....	<b>299</b>
Sledování kvality prostředí v muzeích a galeriích ( <i>J. Valach, K. Juliš, B. Wolf</i> ) .....	299
Kódované fotometrické stereo pro dokumentaci a prezentaci drobných sbírkových předmětů ( <i>J. Valach</i> ) .....	312
Rentgenové zobrazování plastik a obrazů ( <i>D. Vavřík, J. Žemlička</i> ) .....	322
<b>Místo doslovu</b> ( <i>M. Drdácý</i> ) .....	<b>332</b>
<b>Autoři</b> .....	<b>338</b>



# Předmluva

Kniha přináší přehled vybraných výsledků nedávného mezioborového výzkumu na pracovištích Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., v moderně rozvíjené oblasti památkových věd. Památkové vědy patří mezi mladší vědecké obory, jejichž vývoj je silně ovlivněn současným bouřlivým rozvojem informačních technologií, miniaturizací a pokročilostí výrobních postupů, které jsou podmínkou aplikace metod a technik dříve pro památkovou péči nedosažitelných. Prolomení technických i ekonomických bariér umožňuje využívání nanomateriálů a nanotechnologií pro záchranu, zachování i zhodnocení památkových a dalších historických objektů.

V dekadě 2005–2015 pracovníci ÚTAM AV ČR, v. v. i., řešili patnáct mezinárodních projektů z oblasti památkových věd a získali řadu významných výsledků, většinou publikovaných v zahraničních odborných časopisech nebo knihách. Výsledky dalších patnácti národních projektů podporovaných z programu NAKI (výzkum národní a kulturní identity) Ministerstva kultury ČR nebo Grantovou agenturou ČR tvoří hlavní jádro této publikace.

Posláním této knihy je seznámení odborné veřejnosti s nedávnými výsledky výzkumu pro záchranu a zachování kulturního dědictví. Jedná se o výsledky autorů publikované vesměs v zahraničí a pro českého čtenáře hůře dostupné, ať již z jazykových důvodů, nebo proto, že média, která je vydala, nejsou v ČR běžně k dispozici.

Kniha je rozdělena do pěti oddílů volně sdružujících kapitoly s příbuznou náplní v oblastech určování materiálových charakteristik historických konstrukcí, poruch a možností jejich předcházení, historických materiálů a technologií, materiálové, technologické a metodické podpory restaurování památek a udržitelnosti sbírek v muzeích a galeriích.

Autoři přejí poučné čtení a uvítají připomínky a podněty čtenářů a uživatelů publikovaných rad, doporučení a postupů.



# Poděkování

Výzkum prezentovaný v této knize byl podpořen řadou projektů financovaných z národních i mezinárodních programů. Autoři proto vyslovují svůj hluboký dík následujícím projektům:

**Projekt MŠMT LO1219 (2014–2018)** „Udržitelný pokročilý rozvoj CET“, odpovědný řešitel prof. Ing. Miloš Drdácký, DrSc., dr. h. c., a Ing. Jakub Novotný, Ph.D.

**Program NAKI Ministerstva kultury ČR (aplikovaný výzkum Národní a kulturní identity):**

DF11P01OVV001 (2011–2015) Diagnostika poškozování a životnosti objektů kulturního dědictví, příjemce ÚTAM AV ČR, v. v. i., odpovědný řešitel Ing. Daniel Vavřík, Ph.D.

DF11P01OVV002 (2011–2015) Poruchy nemovitých památek: znalostní systém pro analýzu, návrh intervencí a prevenci, společně s FEL ČVUT Praha (příjemce), odpovědný řešitel za ÚTAM AV ČR, v. v. i., Ing. Jaroslav Valach, Ph.D.

DF11P01OVV008 (2011–2015) Vysokohodnotné a kompatibilní vápenné malty pro extrémní aplikaci při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví, společně s FSv ČVUT Praha (příjemce), odpovědná řešitelka za ÚTAM AV ČR, v. v. i., Ing. Zuzana Slížková, Ph.D.

DF11P01OVV009 (2011–2015) Metodika a nástroje ochrany a záchrany kulturního dědictví ohroženého povodněmi, společně s FSv ČVUT (koordinátor), NTM v Praze a PEF ČZU, odpovědná řešitelka za ÚTAM AV ČR, v. v. i., Ing. arch. Klára Nedvědová.

DF11P01OVV010 (2011–2015) Tradiční vápenné technologie historických staveb a jejich využití v současnosti, společně s dalšími účastníky NTM a ARUP AV ČR, v. v. i., odpovědný řešitel Ing. Jan Válek, Ph.D.

DF11P01OVV012 (2011–2015) Nové materiály a technologie pro konzervaci povrchů památkových objektů a preventivní památkovou péči, společně s FCHT VŠCHT a ÚFCH JH AV ČR, v. v. i. (příjemce), odpovědná řešitelka Ing. Zuzana Slížková, Ph.D.

DF12P01OVV004 Návrh a posuzování dřevěných tesařských spojů historických konstrukcí – společně s FSv ČVUT (příjemce) a MENDELU, odpovědný řešitel za ÚTAM AV ČR, v. v. i., Ing. Jiří Kunecký, Ph.D.

DF11P01OVV017 (2012–2015) Technologie údržby a konzervace mozaiky Posledního soudu a metody restaurování-konzervování středověkého skla, společně s FCHT VŠCHT (příjemce), odpovědný řešitel za ÚTAM AV ČR, v. v. i., doc. Ing. Stanislav Pospíšil, Ph.D.

DF12P01OVV018 (2012–2015) Podmínky a požadavky kompatibilní péče o historické anorganické porézní materiály (ÚTAM AV ČR, v. v. i., příjemce), společně s FRUP Litomyšl, odpovědný řešitel Mgr. Petr Gláser.

DF12P01OVV027 (2012–2015) Jednotný modulární systém dálkového on-line sledování environmentálních charakteristik depozitářů a expozic, společně s NM v Praze (příjemce), odpovědný řešitel za ÚTAM AV ČR, v. v. i., Ing. Karel Juliš.

DF11P01OVV027 (2011–2015) Vybrané památkové postupy pro zkvalitnění péče o sochařské a stavební památky, společně s FRUP (příjemce), odpovědní řešitelé Ing. Jan Válek, PhD., a Ing. Zuzana Slížková, Ph.D.

### **Projekty Grantové agentury České republiky:**

Projekt GAČR 103/09/2067 „Zpevnování degradovaných vápenných omítek a malt“, odpovědná řešitelka Ing. Zuzana Slížková, Ph.D.

Post-doc projekt GAČR 105/10/P573 „Chování dřeva při zatlačování trnu“, odpovědný řešitel Ing. Michal Kloiber, Ph.D.

Projekt center excelentního výzkumu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“, společně s FSV ČVUT (příjemce koordinátor) a Kloknerovým ústavem ČVUT, odpovědný řešitel za ÚTAM AV ČR, v. v. i., prof. Ing. Miloš Drdáký, DrSc., dr. h. c.

### **Projekty mezinárodní:**

Projekt č. CRAFT-1999-72054 Intelligent Measurement Technology for Laser Cleaning of Historic Buildings and Monuments HISTO-CLEAN, 2003–2004, 5. rámcový program EC, odpovědní spoluřešitelé za ÚTAM AV ČR, v. v. i., M. Drdáký, Z. Slížková, J. Valach, D. Vavřík

Projekt č. SSPI-CT-2004-501609 CULTSTRAT (FP 6) „Assessment of air pollution effects on cultural heritage – management strategies“, 2004–2007, koordinátor SCI Stockholm, odpovědní spoluřešitelé za ÚTAM AV ČR, v. v. i., M. Drdáký, S. Pospíšil, Z. Slížková, J. Valach

Projekt č. FP6-2005-SSP-5A CHEF Cultural heritage Protection against Flood, 2007–2010, koordinátor BAM Berlín, odpovědní spoluřešitelé M. Drdáký, T. Drdáký, Z. Slížková, J. Valach

Projekt č. FP7-NMP-2007-SME-1 No. 213651 STONECORE (Stone conservation for building refurbishment), 2008–2011, koordinátor IBZ Freiberg, odpovědní spoluřešitelé M. Drdáký, C. Moreau, Z. Slížková

## **Poděkování spolupracovnícím a spolupracovníkům**

Autoři upřímně děkují řadě lidí, bez nichž by se tato kniha nemohla stát skutečností. Obdivuhodnou práci vykonala paní Daniela Šafránková, která celou knihu připravila do tisku. Děk jí patří i za řadu užitečných rad a dobrých nápadů, které velmi pozitivně ovlivnily celkový výsledek. Zvláštní děk patří paní RNDr. Ivaně Frolíkové za pečlivou přípravu a sjednocení obrázků i za trpělivé korektury textu. Dále paní Zuzaně Strakové za jazykovou úpravu textu. Publikované výsledky byly získány s přispěním mnoha dalších kolegyně a kolegů ze spolupracujících pracovišť. Jmenujme M. Blaška, P. Křemena, J. Kufnera, M. Šmída z FEL ČVUT, J. Maříkovou-Kubkovou, I. Herichovou, M. Suchého z Archeologického ústavu AV ČR, v. v. i., Praha, M. Ebelu, P. Koderu z Národního technického muzea, Š. Chlumskou, R. Ševců z Národní galerie, P. Štefcovou z Národního muzea, J. Hradilovou z AVU Praha. V ÚTAM AV ČR, v. v. i., to byli zejména P. Alexander, J. Bryscejn, M. Černý, D. Frankeová, E. van Halem, P. Hauková, J. Hodrment, J. Jiroušek, T. Fíla, J. Frankl, V. Kocour, I. Kumpová, S. Kuznetsov, J. Maddox, A. Mordanova, T. Matas, M. Panáček, V. Petráňová, M. Slížek, E. Stuchlíková, P. Šašek, O. Tomanová, D. Vrba, A. Zeman.





# Úvod

## Miloš Drdáký

Péče o záchranu a zachování památek kulturního dědictví v posledních dekadách stále více mezioborově využívá vědeckých poznatků a výsledků z oblasti přírodních a technických věd. To vedlo ke vzniku dnes již svébytné vědní disciplíny, obvykle v anglické terminologii označované jako „conservation science“<sup>1</sup>. Český termín pro tuto činnost se dosud neustálil, což je možná způsobeno i problémem s překladem slova „conservation“ do českého jazyka, kde je tento termín většinou chápán jako „památková péče“, neboť byl velmi silně ovlivněn německým „Denkmalpflege“. Conservation science však není prostou vědou o památkové péči, spíš by se dalo říci, že je to věda pro památkovou péči nebo věda pro i o konzervaci kulturního dědictví.

Co tedy je „conservation science“? Ve vztahu ke kulturnímu dědictví je tato „věda o konzervaci“ interdisciplinárním studiem záchrany a zachování uměleckých, architektonických a dalších kulturních děl s využitím vědecké metodologie. Obecně zahrnuje výzkum technologických a strukturních parametrů uměleckých a historických děl a materiálů, ze kterých jsou zhotovena. Využívá vědecké metody a principy k podpoře konzervace a restaurování uměleckých a architektonických památek a k podpoře péče o předměty kulturního dědictví v muzeích a jiných sbírkách. Věda o konzervaci památek zahrnuje identifikaci materiální substance památkových objektů nebo uměleckých předmětů včetně jejich chemického složení, studium a klasifikaci změn způsobujících chátrání a vývoj materiálů a metod, které chátrání kulturního dědictví zpomalují.

Rozlišujeme tedy tři širší kategorie vědy o konzervaci kulturního dědictví: a) důkladné zkoumání a analýzy historické substance, b) studium příčin chátrání a c) vývoj materiálů a technik k záchraně a ochraně památek kulturního dědictví. Věda o konzervaci kulturního dědictví zahrnuje především aspekty chemické, fyzikální, biologické i technické (inženýrské), ale prováděný výzkum nezářídka využívá i poznatky a metody oborů humanitních. Často se inspiruje i empirií, vždy však jen pro formulaci hypotéz, které musí být vědecky ověřeny se všemi důsledky, především s možností reprodukovatelnosti výsledků.

Potřeba spolupráce s dalšími obory vedla k tomu, že byl v roce 2006 ve Velké Británii<sup>2</sup> zaveden širší vědní obor – „heritage science“ – věda o kulturním dědictví, jako obor zpřístupňující kulturní dědictví a podporující jeho konzervaci, interpretaci a správu. Věda

<sup>1</sup> Např. A Diverse Discipline: A Discussion about Conservation Science, GCI Newsletter 20.2, Summer 2005 nebo [https://en.wikipedia.org/wiki/Conservation\\_science\\_\(cultural\\_heritage\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Conservation_science_(cultural_heritage)), 25. 12. 2015.

<sup>2</sup> Více základních informací např. na [https://en.wikipedia.org/wiki/Heritage\\_science](https://en.wikipedia.org/wiki/Heritage_science), 25. 12. 2015.

o kulturním dědictví tak zahrnuje nejen výzkum pro konzervaci kulturního dědictví („conservation science“), ale i další oblasti výzkumu, zejména vývoj nových inženýrských nástrojů pro zpřístupnění kulturního dědictví, výzkum a interpretaci kulturního dědictví včetně archeometrie, např. výzkum datování či provenience, dále výzkum správy kulturního dědictví, např. vývoj nástrojů a poskytování znalostí pro strategické rozhodování, a výzkum širšího společenského zapojení kulturního dědictví.

Cílem činností v britské vědě o kulturním dědictví je dlouhodobá udržitelnost dědictví pomocí správy a řízení změn a rizik při dosahování maximalizovaných sociálních, kulturních a ekonomických přínosů v současnosti s tím, že bude dnešní kulturní dědictví zachováno i pro příští generace. Oblasti výzkumu, kde se očekává nejvyšší přínos v oboru vědy o kulturním dědictví, se týkají muzeí, galerií, knihoven, archivů, archeologie a prostředí historických architektonických a technických děl.

Výzkumník v užším oboru vědy o konzervaci kulturního dědictví se tedy zabývá výzkumem kulturního dědictví – uměleckých objektů, historických předmětů, staveb a jiných památek – s využitím vědecké metodologie. Provádí většinou aplikovaný vědecký výzkum k určení materiálových, chemických a technologických aspektů kulturního dědictví. Výsledky tohoto výzkumu a shromážděné technické informace pak využívají konzervátoři, kurátoři nebo památkáři k rozhodování o nejvhodnějších konzervačních nebo restaurátorských zákrocích na zkoumaných nebo podobných objektech. Dále výsledky přispívají k rozšíření znalostí o památkách, o jejich materiálovém složení, způsobu výroby nebo výstavby, autenticitě nebo předchozích restaurátorských pracích.

V oboru konzervace kulturního dědictví patří mezi nejzákladnější úlohy určení složení a charakteristik historických materiálů. V předkládané knize jsou této úloze věnovány kapitoly prvního odborného bloku. Obvykle jsou používány nedestruktivní nebo šetrně destruktivní metody pro zkoušení přímo na objektu nebo na malých odebraných vzorcích. Získané informace jsou často podkladem pro preventivní opatření na památce nebo pro záchranný zásah, u stavebních památek i pro posuzování jejich bezpečnosti a využitelnosti.

Další důležitou výzkumnou aktivitou je studium mechanismů degradace a chátrání materiálů a staveb. Chemické a fyzikální analýzy změn materiálů obvykle poskytnou dostatek informací pro vytvoření hypotéz popisujících procesy, které vedly k degradaci. V moderním výzkumu jsou tyto hypotézy ověřovány experimentálně komplexními zkouškami. Analýza poruch staveb nebo konstrukcí většinou vyžaduje provádění dlouhodobého sledování (monitoringu) odezvy památky na zatížení vnějšími silami a vlivy okolního prostředí. I některé z těchto procesů lze zkoumat laboratorně ve speciálních zkušebnách. Výsledky jsou využívány k návrhu oprav, restaurování a preventivních ochranných opatření a v naší knize nalezneme čtenář příklady zejména ve druhém bloku odborných kapitol.

Pro restaurátorské či opravné zásahy jsou neustále vyvíjeny nové materiály a technologie, případně se testuje použití některých tradičních materiálů či způsobů stavění. Nové materiály i postupy je nutno pečlivě a hluboce prozkoumat z hlediska dopadů na historickou substanci v přítomnosti i do budoucna. To je další velmi odpovědná a důležitá oblast výzkumu ve vědě o konzervaci kulturního dědictví. Výzkum tak zajišťuje záchranu a další existenci památky v optimálních podmínkách vzhledem k jejímu stavu a stáří. Konzervátoři (památkáři) zde obvykle spoléhají na znalosti a dovednosti vědců při vývoji nových konzervačních materiálů. Vědci jsou často žádáni o podklady k hodnocení efektivnosti a bezpečnosti materiálů

a technologií. Cílem je vyvinout takové postupy a materiály, které efektivně zpomalí degradaci a nepoškodí objekt. Výsledky některých zajímavých projektů tvoří náplň třetího a čtvrtého bloku kapitol. Kniha se zde již dotýká řady oblastí výzkumu ve výše zmíněném rozšířeném oboru „heritage science“, tj. vědy o kulturním dědictví.

Intimní znalost speciálních problémů při výzkumu kulturního dědictví je zdrojem inspirace pro další výzkumnou oblast vědy o konzervaci a tou je vývoj a návrh nových diagnostických nebo aplikačních přístrojů, zařízení a metod. Podstatnou část této práce tvoří i vývoj nových metod identifikace a analýz objektů a předmětů kulturního dědictví.

Odpovědnosti i povinnosti vědce v oboru konzervace kulturního dědictví (conservation science) jsou tedy výrazně odlišné od náplně práce a odpovědnosti konzervátorů (památkářů) nebo kurátorů, kteří však výsledky práce vědce v oboru kulturního dědictví potřebují a aplikují v praxi. Nicméně spolupráce těchto odborníků i při výzkumu konzervace kulturního dědictví je obvykle prospěšná a vědci vítaná.

Konzervace a restaurování památek má na rozdíl od vědy o konzervaci památek dlouhou historii. Je to dáno tím, že potřebná a velmi sofistikovaná vědecká infrastruktura existuje teprve několik desetiletí, kdežto opravy a restaurování stačilo provádět pouze s využitím řemeslné zručnosti a zkušeností. Je známo, že již ve starověku se lidé k památkám chovali ohleduplně a prováděli konzervační zásahy, dokládá to např. záznam o babylonském králi Nabodovi z klínopisné destičky ze 6. stol. př. n. l., který nechal řemeslníkem-specialistou opravit sochu Sargona, otce Naram Sina, které chyběla polovina hlavy<sup>1</sup>. Podobně existují doklady o konzervaci a restaurování soch a staveb ze starého Řecka a Říma<sup>2</sup>. Restaurování maleb představuje technologicky složitější problém a právě zde se začala nejvíce rozvíjet věda o konzervaci památek. Restaurování maleb a zejména obrazů se stalo samostatnou profesí ve Francii až v 18. století, nicméně jedním z prvních známých restaurátorských zásahů bylo restaurování maleb Sixtinské kaple v roce 1562. Od počátku 19. stol. byly prováděny systematické analýzy pigmentů, což můžeme považovat za počátky vědy o konzervaci kulturního dědictví<sup>3</sup>. Michael Faraday např. prováděl v letech 1850–1853 analytické studie v londýnské Národní galerii, kde se zabýval výzkumem degradace laků, metodami čištění a dopady znečištění ovzduší na změnu barvy povrchových vrstev. Jeho výsledky byly obecně ignorovány, nicméně v Německu a Francii pokračovaly výzkumy jednotlivých vědců, zejména v oblasti chemie a fyziky (např. Pettenkofer, Pasteur). První chemickou laboratoř sloužící výhradně účelům konzervace předmětů kulturního dědictví založil v roce 1888 Friedrich Rathgen pro berlínská muzea. Následovala výzkumná laboratoř Britského muzea v roce 1920, vedená Alexandrem Scottem, která měla za úkol zlepšit bídny stav muzejních sbírek, a v roce 1928 první americká vědecká laboratoř při harvardském Fogg Art Museum. Další podobné laboratoře byly intenzivněji zakládány až po roce 1930, kdy se ve dnech 13.–17. října konala v Římě první mezinárodní konference o studiu vědeckých metod pro zkoumání a ochranu

<sup>1</sup> J. Podany: *Lessons from the Past* (GCI 2003), kde cituje A. K. Graysona, „O Sin ... Deliver Me“: Nabonidus and the Fall of Babylon, in *Papyrus and Tablet*, ed. A. K. Grayson and D. B. Redford (Englewood Cliffs, N. J., 1973).

<sup>2</sup> Např. Jukka Jokilehto: *A History of Architectural Conservation*, D. Phil Thesis, University of York, 1986, <http://mestrado-reabilitacao.fau.pt/disciplinas/jaguiar/jukkajokilehto1986historyofconservation.pdf>, staženo jako pdf 25. 12. 2015.

<sup>3</sup> Např. Sir Humphry Davy cestoval s malou přenosnou chemickou laboratoří pro analýzy pigmentů po Evropě doprovázen Michaellem Faradayem v letech 1813–1815.

uměleckých děl. Tak byly založeny např. laboratoře v Muzeu krásných umění v Bostonu nebo v Louvru (1931). Záhy bylo také zahájeno vydávání speciálního časopisu *Technical Studies in the Field of the Fine Arts* ve Fogg Art Museum (1932–1942) a vznikly i vzdělávací programy. V pozdějších letech byly založeny nové instituce (Doerner Institut, IRPA v Bruselu a řada dalších), zaměřené na vědeckou podporu konzervace a restaurování, většinou v souvislosti se sbírkami v muzeích a galeriích. Bylo institucionalizováno zapojení dalších vědních disciplín, např. v roce 1957 byla ustavena laboratoř biologie pro konzervaci při centrálním ústavu pro konzervaci a restaurování kulturního dědictví v Římě. Následovala řada dalších mezníků v historii spolupráce vědecké činnosti a konzervace či restaurování a můžeme říci, že v osmdesátých letech již ve většině kulturních zemí existovala solidní institucionalizovaná základna pro další rozvoj vědy o konzervování uměleckých památek.

V oblasti konzervace a restaurování architektonického dědictví není historický vývoj tak dobře čitelný, neboť se využívá vědeckých poznatků obecně získávaných v technických vědách bez primárního cíle v památkové péči. Nicméně i zde se dají vystopovat záznamy o technologiích pro ochranu historických objektů již ve starověku, např. proti požáru nebo při využití periodického sledování chování staveb pro plánování oprav či konzervačních intervencí. Např. kupole Brunelleschiho chrámu St. Maria del Fiore má aktivní trhliny, které vznikly záhy po dokončení a jejichž šířka je monitorována od 16. století. K většímu rozvoji výzkumu souvisejícího se záchranou a zachováním památek však došlo až po druhé světové válce, kdy bylo vážně poškozeno mnoho objektů architektonického dědictví. Byla to i příležitost pro získání mnoha zkušeností a znalostí o historických materiálech a konstrukcích pro pracovníky Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., vydavatele této knížky, neboť se podíleli jako experti a inženýři na řadě významných rekonstrukcí nebo restaurátorských zásahů.

Památky jsou i bez válek v trvalém ohrožení přírodními hrozbami, např. zemětřesením, vichřicemi, povodněmi, sesuvy půdy i katastrofami způsobenými lidskou činností. Na přelomu tisíciletí to bylo zejména znečištění ovzduší, které výrazně přispělo i k současné hrozbě změny klimatu. Tyto jevy ohrožují téměř celou Evropu, a proto Evropská komise podporovala výzkum směřující k eliminaci nebo redukci dopadů výše uvedených změn na zachování kulturního dědictví. Dlouhodobá udržitelnost kulturního dědictví potřebuje výzkum i v řadě dalších témat, neboť společnost může mít prospěch z památek nejen v oblasti duchovní a kulturní. Kulturní dědictví má pozitivní dopad i na řešení mnoha sociálních a ekonomických problémů. Státní podpora výzkumu kulturního dědictví a jeho konzervace má i v České republice dlouhou tradici a je rozhodně na vedoucí úrovni v celém světě.

Ministerstvo kultury ČR navázalo na úspěšné programy podpory výzkumu v devadesátých letech a na přelomu tisíciletí a otevřelo v roce 2010 nový program výzkumu Národní a kulturní identity (NAKI), který se dočkal již druhé edice s výzvami v roce 2015 a podporou projektů od roku 2016. Jedná se o výjimečný počín ve světovém měřítku a odpovídá péči, kterou ČR věnuje svým památkám u vědomí toho, že se jedná o trvalý zdroj duchovní, kulturní, sociální i ekonomické prosperity národa a naší země. Je potěšitelné, že jsme se stali příkladem pro řadu jiných evropských zemí. O výjimečnosti programu NAKI svědčí i to, že jeho rozpočet byl v minulém období vyšší než rozpočet, který se podařilo složit z příspěvků jednotlivých členských států EU do společného „hrnce“ v rámci tzv. iniciativy společného plánování výzkumu s prioritou kulturního dědictví.

Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR řešil v uplynulých dekádách téměř dvě desítky výzkumných projektů zaměřených na problémy kulturního dědictví, podporovaných na národní úrovni Grantovou agenturou ČR, MK ČR a MŠMT, dále více než dvě desítky společných výzkumných projektů v rámci podpory Evropské komise a jejích rámcových programů a bilaterálních smluvních či přeshraničních výzkumných projektů. Vybrané výsledky těchto projektů jsou předkládány v této knize.

Výzkum pro konzervaci kulturního dědictví je v ÚTAM prováděn od samého založení ústavu v roce 1921, později se intenzivní práce týkaly zejména poválečných rekonstrukcí (např. Míčovna na Pražském hradě, Emauzský klášter, Belveder, arciděkanství kostel v Ústí nad Labem, transfer kostela v Červené nad Vltavou) díky spolupráci ředitele prof. B. Haccara s prof. O. Stefanem<sup>1</sup>. V sedmdesátých letech ústav významně přispěl k rekonstrukci kolonády v Mariánských Lázních. V roce 1995 ÚTAM otevřel specializované detašované pracoviště Centrum pro historické materiály, konstrukce a sídla (ARCHISS) v Telči a zabýval se především sledováním a analýzou poruch historických konstrukcí a výzkumem problémů rozvoje historických měst.

Přelomovým rokem byl rok 1999, kdy ústav uspěl ve velmi náročné soutěži o Evropská centra excelence projektem ARCCHIP (Advanced Research Center for Cultural Heritage Interdisciplinary Projects) a stal se mezi 25 evropskými centry jediným centrem excelence pro výzkum kulturního dědictví. Tříletý projekt pomohl ústavu vytvořit rozsáhlou síť spolupracujících výzkumných pracovišť v celé Evropě a shromáždit přehled výzkumu v nejvýznamnějších 18 oblastech problémů udržitelnosti kulturního dědictví. Výsledkem je pětidílná publikace „European Research into Cultural Heritage“<sup>2</sup>. Ústav získal skvělé renomé nejen ve vědecké komunitě, ale i ve sféře evropského plánování a řízení vědeckého výzkumu pro zachování kulturního dědictví. Výsledky následného společného evropského výzkumu se staly podkladem pro další knihy, do kterých pracovníci ÚTAM výrazně přispěli<sup>3</sup>.

Vědci ústavu se podíleli jako partneři na společných mezinárodních výzkumných projektech, většinou řešících naléhavé problémy a vysoce oceňovaných. Tak např. průkopnický výzkumný projekt „Noah’s Ark“, zaměřený na předpověď a zmírňování dopadů změny klimatu na udržitelnost kulturního dědictví, získal v roce 2009 hlavní cenu (Grand Prix) Evropské unie za výzkum v kulturním dědictví a zároveň Cenu Europa Nostra. Podobně se projekt

<sup>1</sup> Viz „40 let práce Ústavu teoretické a aplikované mechaniky ČSAV“, Nakladatelství ČSAV, Praha 1961, 144 s.

<sup>2</sup> European Research on Cultural Heritage – State-of-the-Art Studies (M. Drdáký ed.), ISBN 80-86246-21-3 (all), Vol. 1 (ISBN 80-86246-22-1) 575 s., Vol. 2 (ISBN 80-86246-23-X) 539 s., Vol. 3, (ISBN 80-86246-24-8) 760 s., ITAM, Praha 2004; Vol. 4 (ISBN 80-86246-25-6) 599 s., ITAM, Praha 2006; *ibid* (M. Drdáký, S. Simon ed.), ISBN 80-86246-21-3 (all), Vol. 5 (ISBN 80-86246-28-0) 368 s., ITAM, Praha 2006.

<sup>3</sup> Např. Safeguarded Cultural Heritage (SAUVEUR Project – M. Drdáký, M. Chapuis – eds), ISBN 978-80-86246-29-1 (all), ISBN 978-80-86246-31-4 (Vol. 1), ISBN 978-80-86246-32-1 (Vol. 2), ITAM 2007; Dupagne, A., Teller, J., Dumont, E., Drdáký, T. et al.: PICTURE – Pro-active management of the impact of cultural tourism upon urban resources economies (Strategic urban governance framework for the sustainable management of cultural tourism), ISBAN 2-87456-043-X, European Commission, 136 s., 2007; The Effects of Air Pollution on Cultural Heritage (J. Watt, J. Tidblad, V. Kucera, R. Hamilton – eds), Springer 2009; Sabbioni, C., Bonazza, A., Drdáký, M. et al.: The Atlas of Climate Change Impact on European Cultural Heritage – Scientific analysis and management strategies, ISBN-13: 978 1 84331 798 2 (Hbk), ISBN-10: 1 84331 798 2 (Hbk), ISBN-13: 978 1 84331 861 3 (eBook), ISBN-10: 1 84331 861 X (eBook), Anthem Press, London/New York, 146 p., 2010; CHEF – Cultural Heritage Protection Against Flooding – M. Drdáký, L. Binda, I. Ch. Hennen, Ch. Köpp, L. G. Lanza, R. Helmerich (eds), ISBN 978-80-86246-37-6, ITAM Prague, 2011, 229 s.

„STONECORE“, řešící konsolidaci zvětralých anorganických materiálů nanotechnologiemi, umístil mezi 10 nejlepších evropskými výzkumnými projekty v soutěži EuroNanoForum 2013.

Výše uvedená soustavná a rozsáhlá výzkumná činnost přivedla ÚTAM i k úspěchu v soutěži MŠMT o Evropská centra excelence v rámci Operačního programu „Věda a výzkum pro inovace“ s projektem vybudování unikátního komplexního vědeckého centra pro výzkum interdisciplinárních problémů záchran, zachování a využití kulturního dědictví v Telči Centra excelence Telč (CET)<sup>1</sup>.

Centrum CET zahájilo činnost 1. ledna 2014. Výzkum je zaměřen nejen na řešení specifických a komplexních problémů kulturního dědictví, ale obecněji i na úkoly výzkumných priorit v oblastech udržitelného rozvoje (nové ekologicky šetrné technologie), materiálového výzkumu (vědecké reference i průmyslově chráněné výsledky pro inovace materiálů pro záchranu kulturního dědictví), konkurenceschopného strojírenství (přístrojové inovace v diagnostice a zkušebnictví), informační společnosti (specializovaná data a rozvoj databází a monitorovacích sítí) a bezpečnostního výzkumu (dopady, zmírnění škod a prevence přírodních a civilizačních pohrom) v podmínkách očekávaných změn klimatu a souvisejících jevů, i v podmínkách společenských tlaků na intenzifikaci využívání kulturního a přírodního dědictví a v podmínkách rostoucích přírodních i antropogenních hrozeb.

Výzkum je podpořen špičkovou, v několika případech i světově unikátní, výzkumnou infrastrukturou a probíhá zejména ve třech okruzích: a) modelování chování historických i moderních materiálů a konstrukcí při synergickém působení klimatických činitelů, b) studium životnosti a degradačních procesů v konstrukčních materiálech a jejich povrchových úpravách pokročilými experimentálními metodami a c) materiály, technologie a metody pro dosažení dlouhodobé udržitelnosti památek.

První okruh využívá klimatický větrný tunel „Vincenc Strouhal“, který má dvě měřicí sekce – klimatickou s možností modelování rychlosti větru, deště, slunečního záření a strídání teplot vzduchu s přechodem přes nulu, a aerodynamickou bohatě instrumentovanou sekci. Vědeckým cílem výzkumu je vytváření modelů interakcí těles s okolním prostředím při využití znalostí, získaných numerickým i experimentálním modelováním působení větru na stavební objekty včetně památek s uvážením vlivů dalších povětrnostních faktorů – teploty a jejích náhlých nebo cyklických změn i deště. Dalším cílem je získání nových poznatků a znalostí pomocí dlouhodobého a udržitelného monitoringu a modelování chování reálných konstrukcí, vystavených dlouhodobě účinkům povětrnosti a náchylných ke kmitání a poškození únavou. Výstupy vědeckých projektů jsou návrhy na řešení otázek aeroelastického a aerodynamického chování konstrukcí, modely a návrhy opatření na zvýšení pohody prostředí v sídelních útvarech a v okolí dopravních staveb při uvážení poznání a simulace nejvýznamnějších klimatických parametrů, jako jsou vítr, teplota, solární radiace, dešť a vlhkost působící na budovy, historické objekty a památky.

Vědeckým cílem druhého okruhu je získání nových poznatků o stárnutí a korozi materiálů, zejména kovů, kamene a anorganických kompozitů a nalezení optimálních způsobů jejich povrchových ochrann. Jsou vytvářeny modely degradace materiálů a kalibrovány a verifikovány pomocí infrastruktury centra, dlouhodobého monitoringu a studia chování materiálů

<sup>1</sup> <http://cet.arcchip.cz>

v reálných klimatických podmínkách. Jsou shromažďována data o životnosti historických materiálů, navrhovány metodiky monitorování chování materiálů a konstrukcí včetně sledování poruch na památkách. Cílem je i tvorba inovované a udržované databáze stavebních vad a poruch. K tomu CET soustavně buduje odpovídající unikátní experimentálně analytickou infrastrukturu, která bude využitelná i pro obecnější úlohy. Proto jsou zde vyvíjeny nové experimentální metody včetně nových nebo inovovaných metodik, přístrojů a zařízení, zejména pro zkoušení dřeva a anorganických kompozitů. Výzkumné úlohy využívají laboratorní modul radiografie a mikrotomografie a speciálních klimatických a analytických laboratoří, včetně mobilní laboratoře. Možnosti této infrastruktury jsou dobře ilustrovány několika kapitolami předkládané knihy.

Cílem výzkumu v posledním okruhu je návrh, vývoj a ověření nových materiálů a technologií, kompatibilních s historickými materiály a technologiemi, zaměřených na konsolidaci a restaurování degradovaných historických materiálů, na prodloužení jejich životnosti a životnosti památkových objektů. Dalším cílem je návrh systému analýzy dopadů přírodních katastrof a jiných hrozeb na stavební fond se zvláštním zřetelem k udržitelnosti kulturního dědictví a navržení postupů a technologií vedoucích ke zmírnění škod způsobených tímto nebezpečím. Mezi přírodní nebezpečí (zejména zemětřesení, povodně a sesuvy půdy) jsou zahrnovány i účinky povětrnostních faktorů. Tento balík se zabývá i vývojem metodiky optimalizace záchranných zásahů za použití mobilních diagnostických laboratoří v případech nouzových situací. Významným cílem je vytvoření metodik a nástrojů pro posuzování a hodnocení dopadů rozvojových programů (cestovní ruch, lokalizace, nová architektura apod.) na udržitelnost památkových a socioekonomických kvalit historických sídel a nástrojů pro integraci památek do urbanizovaného prostředí. Centrum excelence Telč se zapojilo i do přípravy ustavení nové evropské velké distribuované infrastruktury pro výzkum kulturního dědictví ERIHS (European Research Infrastructure for Heritage Science) spolu s Archeologickým ústavem AV ČR. Těsně před vydáním této knihy byl projekt ERIHS schválen a zařazen do nové „cestovní mapy“ ESFRI, a tak se můžeme těšit na další pokračování rozvoje vědy o a pro kulturní dědictví.





# Určování materiálových charakteristik historických konstrukcí

## Nestandardní laboratorní zkoušky malt

Miloš Drdácký

Mnoho budov a zejména výjimečné architektonické a umělecké památky jsou chráněny jako významné hmotné kulturní dědictví. Jejich zachování je podmíněno odolností proti vlivům a zatížením, které na ně působí po dlouhá staletí. Památky přitom nesmí dosáhnout stavu, který by mohl ohrozit jejich uživatele, návštěvníky nebo obdivovatele. Potřebná bezpečnost a spolehlivost stávajících konstrukcí a budov je posuzována podle kritérií technických norem a předpisů, které společnost přijímá pro zajištění přijatelné míry rizika. Aplikace těchto norem na posouzení budov vyžaduje znalost stavu a vlastností materiálů a konstrukcí, které tvoří substanci jejich hmotné existence. Vyšetřování a určování hodnot těchto vlastností na stávajících konstrukcích je u památek obvykle povoleno pouze za předpokladu vyloučení jejich poškození nebo možnosti zanedbatelného zásahu. I zde se však již dnes můžeme opřít o speciální normy. Normalizací v oblasti zkoušení historických materiálů a památek obecně se zabývá technický výbor CEN/TC 346 – Conservation of Cultural Heritage, který dosud zpracoval pouze zlomek potřebných norem, většinou obecnějšího charakteru.

Pro odběr vzorků taková obecná norma existuje – EN 16085 (srpen 2012) Conservation of cultural property – Methodology for sampling from materials of cultural property – General rules, tedy norma o obecných pravidlech pro odběr vzorků historického materiálu z kulturních památek. Účel této normy je popsán v úvodu a normu charakterizuje jako obecnou normu pro odběr vzorků materiálu, vytvářejícího kulturní památku za účelem jeho charakterizace během všech stadií konzervátorského procesu. Procedura odběru vzorků závisí na typu a podmínkách materiálu, který má být vzorkován, na specifickém studovaném případě a na zvolené metodě vyšetřování.

Vzorkování je vždy invazivní a nevratně poškozuje kulturní památku, jakkoliv málo. Odběr vzorků má být proto proveden pouze v silně zdůvodněných případech a v nejtěsnější konzultaci s osobami odpovědnými za památku a s osobami, které budou vzorky studovat. Konzultace musí vzít v úvahu, zda nelze stejnou informaci získat neinvazivním způsobem. Norma definuje vyšetřování jako získání informací nutných pro rozhodování o procesu konzervace (o konzervátorském záměru). Dále je pak definován vzorek jako část materiálu vyjmutá z kulturní památky pro vědecké vyšetřování, která vhodně materiál reprezentuje.

Minimální počet vzorků není definován, ale má být v souladu s plánem vyšetřování. Podobně je určena potřeba množství, které má být odebráno jako minimální, ale dostatečné. Množství závisí na typu památky, povaze materiálu a způsobu vědeckého vyšetřování, které má být použito. Relevantní evropská norma tedy nepředepisuje žádný konkrétní počet vzorků nebo množství materiálu ke zkoušení a to je podstatný rozdíl oproti technickým normám pro zkoušení materiálů a výrobků, např. střešní krytiny. Dalším významným rozdílem je i to, že zkouškami odebraného historického materiálu většinou nezískáme dostatek dat pro jejich statistické zpracování ve smyslu moderních norem.

Základními požadavky metodik pro šetrné průzkumy a zkoušení historických konstrukcí tedy jsou odběry materiálových vzorků o malých objemech a malých rozměrech. Pro zkoušení malt jsme obvykle dále omezeni tloušťkou malty ve spáře mezi kusovými stavivými, která umožňuje odběr vzorků o tloušťce okolo 20 mm. Takový rozměr neumožňuje vyrobít standardní zkušební tělesa. V případě dřevěných konstrukcí jsou přijatelné rozměry odebíraných vzorků ještě menší. Proto byla vyvinuta řada metod a technik překonávajících tyto překážky (např. Drdáký 2007).

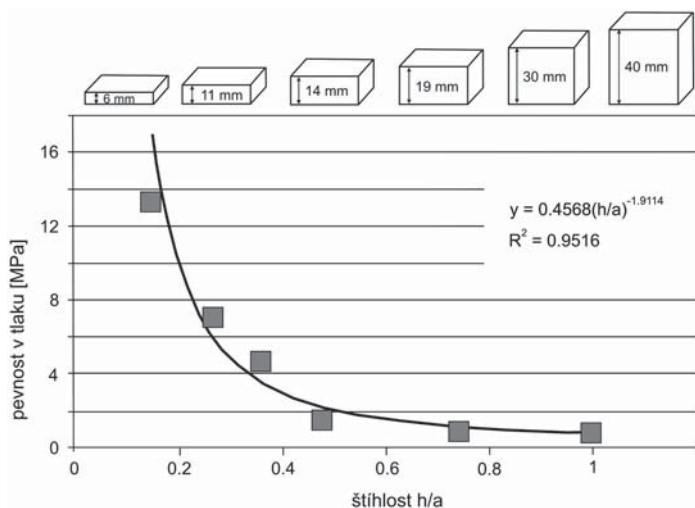
Zkoušení malt historických objektů je stále předmětem diskusí, neboť je zřejmé, že tradiční pojetí zkoušení malt dává v podstatě nesmyslné výsledky, prakticky nepoužitelné pro posouzení skutečné bezpečnosti, nebo naopak ohrožení historické konstrukce. Malta se, až na zanedbatelné výjimky, nevyskytuje ve zděné konstrukci v tloušťkách požadovaných pro výrobu zkušebních těles, není v těchto konstrukcích namáhána ani ohybem ani tlakem způsobem podobajícím se podmínkám zkoušky. Proto se objevují i požadavky na změnu metodiky zkoušení malt odebraných z historického zdiva a je snaha aplikovat zkušenosti z mechaniky zemin a hornin. To znamená např. zkoušet maltu v podmínkách trojosé napjatosti, což je samozřejmě mnohem náročnější a vyžaduje potřebné přístrojové vybavení. V této kapitole jsou popsány jednodušší přístupy.

Metodika nestandardních zkoušek je ovlivněna několika faktory. Jak již bylo zmíněno výše, především tím, že reálná velikost odebraného vzorku malty z historické konstrukce – zdiva – obvykle nedosahuje ani dvoucentimetrové tloušťky. Dále výroba tělíska pro zkoušku tlakem (vyřezání krychle) výrazně ovlivňuje vlastnosti vzorku, protože nevyhnutelně dojde k narušení povrchových vrstev a ke snížení pevnosti. Proto se v poslední době pro tlakové zkoušky dává přednost tělesům ve tvaru nepravidelného „koláče“ malty ze spáry zdiva, jehož tloušťka je obvykle vyrovnána sádrkou na konstantní rozměr (např. Binda et al. 2004). Metodika zkoušení se neliší od klasických tlakových zkoušek, jenom vyhodnocení musí vzít v úvahu faktor štíhlosti (viz níže).

Na takovýchto nízkých vzorcích se obtížně měří modul pružnosti. To je i jeden z důvodů, proč byla rozvíjena i metodika zkoušení skutečné malty v ohybu. I zde však musíme řešit vzorky se stejnými problémy povrchového narušení. Nicméně, alespoň dva líce vzorku zde mohou zůstat bez obrábění a tudíž s intaktními vlastnostmi. Jedná se však vždy o plochy kontaktu mezi maltou a kusovým stavivem a tudíž o plochy technologicky ovlivněné jinak než základní materiál. Tento vliv obecně může zlepšit, ale i zhoršit vlastnosti malty. Zatím nebyl detailně studován. Velikost vzorku je však stále malá pro ohybovou zkoušku. Proto autoři navrhli a používají prodloužení vzorku jiným materiálem, tzv. protézování.

## Zkoušení pevnosti historických malt v tlaku

Metodika zkoušení tlakové pevnosti historických malt představená v této kapitole je rozšířením staršího výzkumu zkoušení pevnosti cementových malt. Je známo již od 19. století, že velikost zkoušeného vzorku má významný vliv na měřenou pevnost a během doby byla navržena řada



**OBRAZEK 1:** Tendence zvýšení naměřené tlakové pevnosti vápenných malt ve vztahu ke štíhlosti (Drdáček 2011)

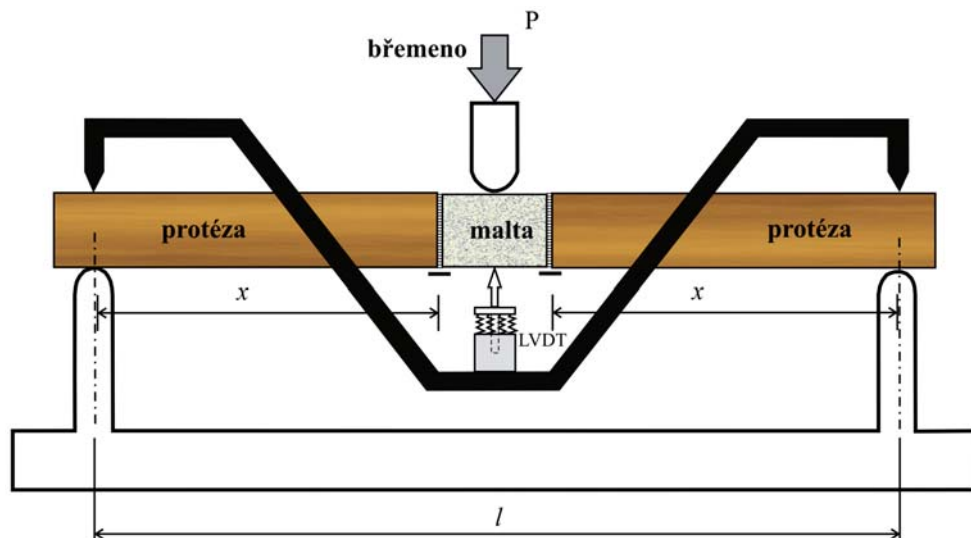
vzorců pro převod charakteristik získaných na nestandardních tělesech na hodnoty měřené při standardních zkouškách. Existuje bohatá bibliografie o vlivu faktoru velikosti pozorovaném při zkouškách malých betonových krychlí nebo válců (např. Del Viso et al. 2007). Na základě více než 80<sup>1</sup> vědeckých článků bylo pro nízké hranoly se čtvercovou podstavou zjištěno, že korekční funkce závisí zejména na délce hrany základny, na štíhlosti vzorku, neboli na poměru výšky k délce hrany základny i na pevnostní kvalitě malty. Maximální velikost zrna písku v maltě nehraje tak významnou roli jako jiné faktory, např. uspořádání zkoušky (excentricita a/nebo tlačné desky zkušebního stroje a jejich třecí charakteristiky – Schickert 1981, Konvalinka 2002). Pevnost změřená na nestandardních vzorcích je vyšší než pevnost z normových zkoušek, když se sníží štíhlost nebo délka hrany podstavy nebo pevnost malty. Nicméně veškerá starší literatura se odkazovala na cementové nebo betonové malty (Drdáček a Slížková 2008).

Pro vápenné historické malty byl vliv velikosti studován na maltách nízké pevnosti (okolo 0,365 MPa), která odpovídá pevnostem degradovaného historického materiálu. Převodní vzorec na pevnosti zkoušené standardním způsobem je uveden v rovnici (1):

$$f_c = f_e / (h/a)^{1.9114} \quad (1)$$

kde  $f_c$  označuje vypočtenou tlakovou pevnost ekvivalentní standardní zkoušce,  $f_e$  je experimentálně zjištěná tlaková pevnost na nestandardním vzorku,  $h/a$  štíhlost vzorku. Vzorec platí pro vzorky s délkou hrany čtvercové podstavy  $a$  rovnou cca 40 mm a maltu nízké pevnosti [poměr složek ve směsi vzdušné vápno:písek byl pouze 1:9 (obj.)]. Na obr. 1 je rovnice porovnává s výsledky zkoušek. Při zkouškách nejsou tlačné čelisti ani styk mezi maltou a čelistí nijak upravovány z hlediska tření. Empirický vzorec (1) závisí na štíhlosti zkoušeného vzorku, na délce hrany jeho základny, na pevnosti malty, na typu zkušebního tělesa (hranol s podstavou rovnou tlačným deskám nebo větší „koláč“ nepravidelného tvaru, tlačný uvnitř plochy tlačnými deskami).

<sup>1</sup> Např. Sėjourné 1914, Gaber 1934, Gaede 1962, Graf 1921, Schickert 1981, Horký a Dohnálek 1982.



OBRÁZEK 2: Zkouška ohybové pevnosti protézovaného vzorku malty tříbodovým ohybem

Teoretické vysvětlení výše zmíněného efektu musí uvážit několik vlivů. Nejvýznamnějším je omezení příčné deformace na styku s tlačnými deskami, což vytváří v části objemu vzorku trojosou napjatost a tato část zaujímá větší procento objemu u menších vzorků. Působení malty a odhad mezního zatížení lze dobře modelovat numericky při popisu materiálového chování pružně plastickým Mohr-Coulombovým konstitutivním modelem (Drdáček et al. 2008).

Metoda je úspěšně používána pro analýzy domácích i zahraničních historických malt a vápenných betonů (Drdáček et al. 2013).

## Zkoušení pevnosti historických malt v ohybu

Pro ohybové zkoušky je velmi obtížné získat dostatečně dlouhý vzorek malty, abychom mohli vyrobiť zkušební trámeček. Proto byla vyvinuta metoda doplnění vzorku odebraného materiálu nastavujícími protézy na potřebnou délku, odpovídající podmínce Navierova předpokladu lineárního rozdělení napětí po průřezu při ohybu. Tento předpoklad je základem technické nauky o pružnosti a pevnosti materiálů a je použit při odvození matematických modelů potřebných pro vyhodnocení zkoušek. Při použití krátkého vzorku by byla měřená deformace navíc silně ovlivněna příspěvkem posouvající síly. Vhodným materiálem pro protézování malt je dřevo, neboť je dostatečně pevné, lehké, levné, dobře se obrábí a dobře se lepí. Celkové uspořádání zkoušky je znázorněno na **obr. 2**.

Pro vyhodnocení deformačních charakteristik ze zkoušek při tříbodovém ohybu – modulu pružnosti v ohybu – se naměřené závislosti přepočtou podle vzorce (2):

$$E_2 = P l E_1 (l^2 - 4x^2) / 32y E_1 J - 4P l x^2 \quad (2)$$

kde  $P$  je působící síla,  $l$  rozpětí nosníku (vzorku),  $E_1$  modul pružnosti dřevěných protézy,  $J$  moment setrvačnosti průřezu nosníku,  $x$  délka protézy =  $0,5 (l - \text{délka maltové části})$ .

Vliv protézování je zanedbatelný podle výsledků zkoušek porovnávajících naměřené ohybové pevnosti na čistě maltových trámečcích s pevnostmi, zjištěnými na identickém materiálu při použití protézování. Rozlomená tělíska po zkoušce ohybem totiž byla použita pro testování vlivu protézování na možnost zkoušení ohybové pevnosti malt. Tělíska o velikosti cca  $2 \times 2 \times 3$  cm a  $3 \times 3 \times 4$  cm byla nastavena na délku potřebnou k ohybové zkoušce přilepením dřevěných protéz na oba konce a zatěžována čtyřbodovým ohybem. Poměr pevností protézovaného vzorku ku „standardnímu“, tj. celomaltovému dosahoval při zkouškách hodnot od 0,98 do 1,02, pokud došlo k porušení vzorku v jeho střední části (v nenarušené maltě). Při hodnocení výsledku je nutné poznamenat, že se protézované vzorky většinou porušují v těsné blízkosti dřevěné protézy nebo se od ní odtrhnou v tenké přechodové vrstvě malty. V takovém případě je zjištěná pevnost nižší a pohybuje se okolo 65–70 % pevnosti maltového vzorku pro tělesa o průřezu cca  $2 \times 2$  cm, 80–100 % pro tělesa se stranami průřezu  $3 \times 3$  cm. Jak již bylo řečeno, při výrobě protézovaného vzorku dochází k narušení oblasti malty v okolí řezné plochy lepeného konce. Technologie protézování tak vyžaduje úspěšně vyřešit problém zpevnění koncové oblasti a použití dostatečně pevného lepidla v kombinaci s přiměřeným typem zatěžování vzorku. Z tohoto hlediska je zřejmě v tomto případě tříbodový ohyb vhodnější než čtyřbodový, neboť méně namáhá oblast lepeného spoje. Osvědčilo se zesílit bandáží lepenou spáru mezi maltou a dřevěnou protézou (**obr. 3**). Zkušební tělesa se pak lámala v místě největšího namáhání trámečku (**obr. 4**). Metoda byla úspěšně použita i pro výzkum lomových charakteristik vápenných malt vyztužených organickými vlákny (Drdácký a Michoinová 2003). Obecně můžeme říci, že pro informativní hodnoty pevností historických malt odebraných konkrétních lokalit je metoda protézování dostatečně spolehlivá. Výhodou je zejména snadný odběr vzorků a objektivní výsledek.

Pro praktické aplikace zkoušení malt ze spár zdíva je vhodné poznamenat, že výsledek závisí na orientaci vzorku. Malta ve spáře je vždy ovlivněna na kontaktu s kusovým stavivem (cihlou, kamenem) a odebraný vzorek proto vykazuje vrstevnatou nestejnorodost. Zkušební těleso pro ohybové zkoušky by mělo být vyrobeno tak, že zatěžujeme kolmo k vrstevnaté struktuře. V opačném případě dochází k porušení oddělením vrstev a zkouška je neúspěšná.

Při použití nestandardních vzorků se dále musíme vyrovnat s tzv. faktorem velikosti, tj. vlivem rozměrů vzorku na jeho chování a naměřené mechanické vlastnosti. Tento faktor je zatím nejlépe prozkoumán pro vápenné malty a jejich ohybovou pevnost pilotní sérií zkoušek. Výsledky jsou uvedeny na **obr. 5**.

Ačkoliv výše uvedené zkoušky byly vzhledem k nízkému počtu zkušebních těles (minimálnímu pro základní vyhodnocení) jen orientační, je z grafu na **obr. 5** zřejmé, že zjištěná tendence poklesu ohybové pevnosti s růstem velikosti vzorku odpovídá známému „vlivu velikosti“, tj. na menších vzorcích zjišťujeme větší ohybové pevnosti a pro porovnání s normativními hodnotami musí být korigovány.

Je zřejmé, že velikost zrn neovlivňuje tendenci změny vlivu velikosti, přestože lehce ovlivňuje velikost pevnosti. Vliv velikosti pro vápennou maltu může být odhadnut podle vzorce (3):

$$f_b = f_e / (1 + C_{ssb} - C_{ssb} h/h_s) \quad (3)$$

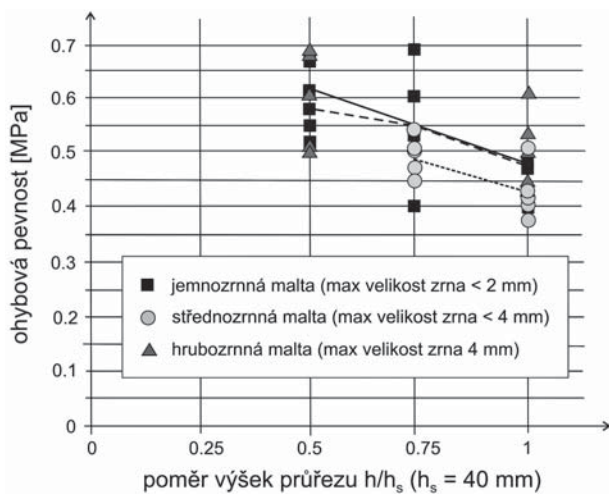
kde  $f_b$  označuje vypočtenou standardní ohybovou pevnost,  $f_e$  experimentálně dosaženou ohybovou pevnost,  $h/h_s$  poměr výšky průřezu ke standardní výšce průřezu  $h_s = 40$  mm a korekční



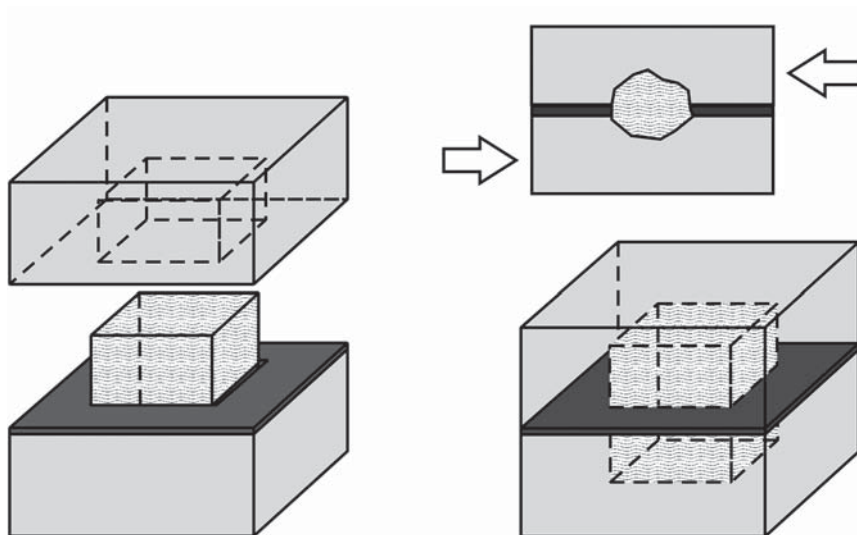
OBRÁZEK 3: Ukázka způsobu zesílení lepeného spoje podkladní bandáží



OBRÁZEK 4: Příklad zkoušky protézované malty vyztužené vlákny



OBRÁZEK 5: Vliv velikosti na hodnotu experimentálně zjištěné ohybové pevnosti malty



**OBRAZEK 6:** Princip smykové zkoušky na nepravidelné hroudě malty – pro jednoduchost znázorněna rozložená skladba hranolem

koeficient pro ohyb malých vzorků  $C_{sb}$  v průměru dosahuje 0,47 pro trámečky z vápenné malty o výšce 20-40 mm (měřené hodnoty  $C_{sb}$  se měnily od 0,36 do 0,58 a zjevně závisí i na technologických parametrech, zejména na hutnění a ošetřování vzorků).

## Zkoušení smykové pevnosti historických malt

Pro zjištění smykové pevnosti byla vyvinuta metodika založená na zkoušení smykové pevnosti zemin. Pro tuto zkoušku je vzorek malty konvexního tvaru zalit do bloků tuhého materiálu (např. do epoxidové pryskyřice) tak, že spojuje oba bloky přemostěním separační vrstvy mezi nimi. Separací vrstvou může být teflonová fólie, která zároveň zajišťuje posun bloků po sobě s velmi nízkým třením (**obr. 6**). Celý blok je vložen do smykového přístroje a zkoušen standardní zkouškou mechaniky zemin. Jako zkušební vzorky mohou být použity zlomné části trámečku po ohybové zkoušce.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

Binda, L., I. Papayianni, E. Toumbakari a R. Van Hees. Mechanical tests on mortars and assemblages. In: Groot, C., G. Ashall a J. Hughes (eds.). *Characterisation of old mortars with respect to their repair – final report of RILEM TC 167-COM*. [S. l.]: RILEM publications SARL, 2004, 57-76. <https://doi.org/10.1617/2912143675.005>

- BS EN 16085:2012 Standard. *Conservation of Cultural property – Methodology for sampling from materials of cultural property – General rules*. London: British Standards Institution, 2012.
- Del Viso, J. R., J. R. Carmona a G. Ruiz. Experimental study on the influence of the shape and the size of the specimen on compression behaviour of high strength concrete. In: Gdoutos E. E. (ed.). *Experimental analysis of nano and engineering materials and structures*. Amsterdam: Springer, 2007, 189–190. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6239-1\\_93](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6239-1_93)
- Drdácký, M. Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars. *International Journal of Architectural Heritage*. 2011, 5(4–5), 383–394. <https://doi.org/10.1080/15583051003717788>
- Drdácký, M. Testing of historic mortars on non-standard small size specimens. In: Binda, L., M. Drdácký a B. Kasal (eds.). *In-situ evaluation and non-destructive testing of historic wood and masonry structures*. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, 2007, 130–139. ISBN 978-80-86246-36-9.
- Drdácký, M., F. Fratini, D. Frankeová a Z. Slížková. The Roman mortars used in the construction of the Ponte di Augusto (Narni, Italy) – A comprehensive assessment. *Construction and Building Materials*. 2013, 38, 1117–1128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.044>
- Drdácký, M., D. Mašín, M. D. Mekonone a Z. Slížková. Compression tests on nonstandard historic mortar specimen. In: *Book of Abstracts, HMC08 1st Historical Mortars Conference*. Lisbon: LNEC, 2008, 53. (+ CD ROM full paper).
- Drdácký, M. F. a D. Michoinová. Lime mortars with natural fibres. In: Brandt, A. M., V. C. Li a I. H. Marshall (eds.). *Brittle Matrix Composites 7*. Cambridge: Woodhead, 2003, 523–532. ISBN 978-1-85573-769-3.
- Drdácký, M. a Z. Slížková. Mechanical characteristics of historical mortars from tests on small-sample non-standard specimens. *Material Science and Applied Chemistry (Materiālzinātne un lietišķā ķīmija)*. 2008, 17, 20–29. ISSN 1407-7353.
- Horký, B. a J. Dohnálek. Influence of size and slenderness of nonstandard specimens on the compression strength of concrete and mortars. *Zpráva č. 512*. Praha: Stavební ústav ČVUT, 1982, 136.
- Konvalinka, P. Effects of loading conditions of concrete under uniaxial compression on its behavior. *CTU Reports*, 2002, 6(4), 82.
- Schickert, G. Formfaktoren der Betondruckfestigkeit. *Die Bautechnik*. 1981, 58(2), 52–57.



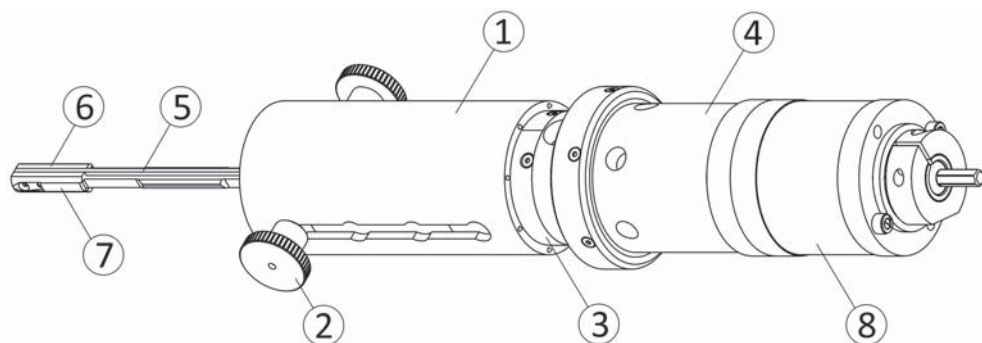
# ***In situ* zkoušení kvality a zdraví historického dřeva**

**Michal Kloiber, Miloš Drdácký, Jan Tippner**

Zkoušení kvality dřevěných konstrukcí je speciálním oborem inženýrské činnosti, využívaným při hodnocení zdravotního stavu dřeva zabudovaného ve stavbách, při analýze poruch a při posuzování bezpečnosti a spolehlivosti stávajících dřevěných konstrukcí, zejména při přestavbách nebo změně užívání. Zvláštním úkolem je diagnostika dřevěných historických objektů (konstrukcí) památkově chráněných nebo v památkovém zájmu. V takových případech obvykle nelze používat standardní zkušební postupy pro určení charakteristických vlastností dřeva, neboť je nutno splnit požadavek minimálního zásahu do konstrukce nebo objektu (Kloiber a Drdácký 2015).

Úkolem projektantů je zajistit funkci či provozuschopnost a prodloužení životnosti historické dřevěné konstrukce a přitom zachovat co největší objem původního materiálu, který dokládá jedinečnost a kulturní hodnotu stavby a je zdrojem cenných informací. Ke splnění tohoto úkolu prostý vizuální průzkum jako podklad pro odpovědný sanační návrh nestačí a je nutná znalost mechanických vlastností dřevěných prvků spolu s podrobným popisem jejich vad a poškození. Získání potřebných dat pomocí destruktivní zkoušky (DT – destructive testing) je obecně nemožné z různých důvodů, zejména těch, které souvisejí s hodnotou historické konstrukce, nebo vzhledem k vysoké variabilitě mezi jednotlivými prvky, z čehož vyplývá, že je třeba otestovat velký počet prvků, které není možné z konstrukce odebrat.

Z těchto důvodů bylo vyvinuto a používá se několik neinvazivních metod (NDT – non-destructive testing) diagnostiky kondice dřevěného materiálu (Riggio et al. 2014). Nicméně, z výsledků měření pomocí NDT metod lze jen omezeně predikovat mechanické vlastnosti dřevěných konstrukčních prvků, korelace orientačních parametrů z NDT metod s pevností a tuhostí je střední, pohybuje se okolo 50% úspěšnosti stanovení materiálových charakteristik dřeva. Kompromisem integrující destruktivní a neinvazivní přístup jsou metody částečně invazivní (MDT – moderately destructive testing), někdy také označované jako (SDT – semi-destructive testing), které vyžadují odběr malého kousku materiálu (např. radiální vývrt, tahový mikrovzorek) s následným zkoušením odebraného vzorku v laboratoři (Tannert et al. 2014). MDT metody odběru vzorku nemají významný vliv na mechanické vlastnosti prvku, z kterého jsou odebírány, takže není ohrožena bezpečnost, stabilita nebo životnost konstrukce, navíc místo odběru se snadno opraví, čímž se skryje zásah vizuálně nepřijatelný. Velikost odebraného vzorku umožňuje dosažení velmi vysoké úspěšnosti predikce materiálových charakteristik dřeva. Nevýhodou MDT metod je časová náročnost, kdy není možné výsledky měření získat přímo *in situ*, ale je potřeba vzorek zkoušet v laboratoři, čímž narůstá čas na vyhodnocení měření, ale i cenová dostupnost diagnostiky.



**OBRÁZEK 7:** Axonometrie přístroje s roztláčováním čelistí ve vrtu (Kloiber et al. 2015)

Časovou náročnost dosud používaných MDT metod se podařilo eliminovat pomocí dvou nově sestavených funkčních vzorků přístrojů (roztlačování čelistí ve vrtu a zatlačování trnu), které byly vynalezeny v Ústavu teoretické aplikované mechaniky AV ČR, kde jsou v současné době používány k hospodářské činnosti při stavebně-technických průzkumech. Výsledky z nových přístrojů jsou okamžitě k dispozici při terénním měření, což umožňuje případné korekce či doplnění dalších měření podle uvážení pracovníka provádějícího průzkum. Navíc pomocí nových přístrojů získáme přesnou informaci o stavu posuzovaných prvků v celém průřezu na rozdíl od povrchových MDT metod (např. zatlačování kuličky, zarážení trnu).

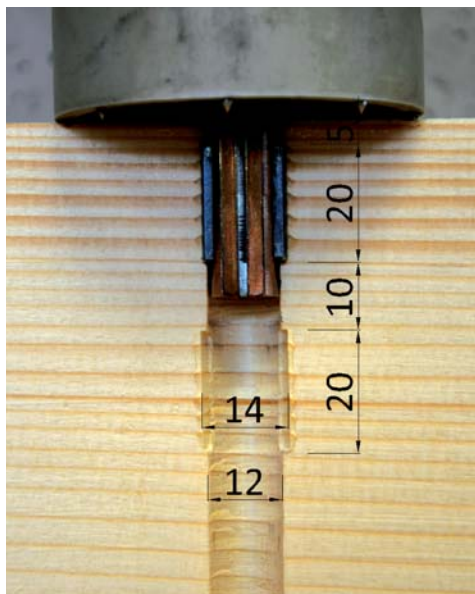
Přístroj na obrázcích 7 a 8 je určen k měření mechanických vlastností a deformační odezvy dřeva při zatěžování miniaturním lisem, vloženým do vyvrtaného otvoru. Zařízení lze použít jak v laboratoři, tak přímo v terénu pro hodnocení stavu a kvality dřeva. Při aplikaci je měřena závislost deformace na působícím napětí při roztlačování symetricky uspořádaných tlačných čelistí („kamenů“), zatěžujících protilehlé stěny ve vyvrtaném radiálním otvoru průměru 12 mm.

Konstrukčně přístroj dle obrázku 7 obsahuje těleso, k jehož obvodu je v podélném směru připevněno stavitelné pouzdro (1) s aretačními šrouby (2), kryt baterií a kryt elektrické instalace (3), zajištěné šrouby krytů. V horní části je k tělesu přístroje připevněno pohybové ústrojí (4), složené ze šroubu táhla, zajištěného proti otáčení čepem šroubu táhla. Na šroubu táhla je v jeho dolní kónické části přišroubován siloměr, k siloměru (5) je přišroubované táhlo, které umožňuje výkyv do stran pomocí kloubu táhla a čepu kloubu. Ke spodní části táhla jsou připojené rozevírací klíny (6), spojené pomocí šroubu rozevíracích klínů a kolíků rozevíracích klínů. Čelisti s pružnými rameny (7) jsou kotvené pomocí šroubu čelistí do tělesa přístroje. Pružná ramena umožňují pohyb čelistí při roztlačování rozevíracími klíny a udržují konstantní vzdálenost od tělesa přístroje. K tělesu přístroje je v horní části připojen snímač posuvu, složený z dvojice planžet s tenzometrickým měřením ohybové deformace vyvolané kuželovou částí šroubu táhla, která je úměrná osovému posuvu, a tudíž i roztlačení čelistí. Uvnitř tělesa přístroje je v horní části připojen vysílač, elektronicky propojený se snímačem posuvu a siloměrem. Vysílač je bezdrátově propojen s počítačem. Planetová převodovka (8) přístroje je poháněna pomocí běžné akumulátorové vrtačky, nicméně může být využito i manuální pohon pomocí jednoruční kliky (Kloiber a Drdáčeký 2014).

Výhodou přístroje je možnost plynulého snímání síly a posunutí při roztlačení čelistí v různých hloubkách, odpovídajících požadavkům na hodnocení prvků konstrukcí běžných



**OBRÁZEK 8:** Celkový pohled na přístroj při in situ měření

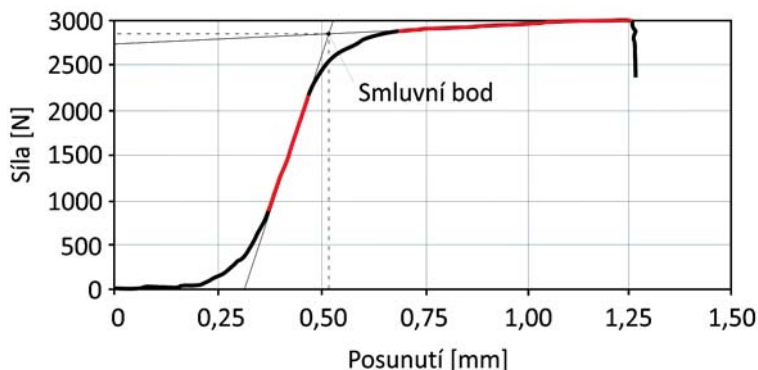


**OBRÁZEK 9:** Detail táhla s rozvírácím klínem a zakulacenými čelistmi (Kloiber et al., 2015)

dimenzí. Přístroj se na testovaný objekt přikládá (zpravidla na rovinnou stranu konstrukčního prvku) pomocí válcovitého pouzdra, které je typicky upraveno tak, že umožňuje měření ve čtyřech zvolených polohách předem vyvrtaného otvoru. Aretace pouzdra je zajištěna pomocí dvou rýhovaných šroubů, pro typicky zvolené polohy: (hloubka vrtu) 5–25 mm, 35–55 mm, 65–85 mm a 95–115 mm. Po zasunutí měřicí části přístroje do vyvrtaného otvoru a přiložení na testovaný objekt jsou pomocí táhla s rozvírácím klínem roztačovány zakulacené čelisti do stěn vyvrtaného otvoru (**obr. 9**). Maximální hloubka zatlačení čelistí je na obou stranách 1,5 mm. Zakulacené čelisti mají šířku 5 mm a délku 20 mm. Čelisti jsou vyrobeny ze speciální nástrojové oceli. Součástí čelistí jsou pružná ramena, jejichž pohyb při roztačování je zajištěn pomocí rozvírácího bronzového klínu, osazeného na dolním konci táhla pomocí kolíku a šroubu. Vrcholový úhel klínu je  $15^\circ$ . Tento úhel není samosvorný a pro odlehčení čelistí stačí uvolnění roztačovací síly (Drdácký a Kloiber 2013).

Průběžně je snímána a zaznamenána působící síla při vytahování táhla, která je kalibrovaná na skutečnou sílu při roztačování čelistí a následně simultánně vztažena k měřené dráze roztačení (posuvu) čelistí (**obr. 10**). Signály jsou z přístroje bezdrátově přenášeny do měřicího přenosného počítače, kde jsou zpracovány.

Samotné měření probíhá tak, že do radiálního otvoru se zasune měřicí část a současně je přístroj přiložen na testovaný objekt pomocí válcovitého pouzdra (**obr. 8**). K roztačování čelistí ve směru podél vláken dřeva dochází při vytahování táhla s rozvírácím klínem, po kterém se pohybují čelisti. Otisky ve dřevě po roztačování čelistí jsou patrné na **obrázku 9**, patrný jsou na tomto obrázku i zestupy mezi jednotlivými polohami měření napříč prvkem. Mechanické vlastnosti se následně určují ze záznamu měřených dat v podobě pracovního diagramu se záznamem působící síly při vytahování táhla (**obr. 10**). Na ose x je znázorněno posunutí při



**OBRÁZEK 10:** Příklad výstupu přístroje: záznam síly při roztačování čelistí vztažené k měřené dráze roztačení (posuvu) čelistí (Kloiber a Drdácáký 2015)



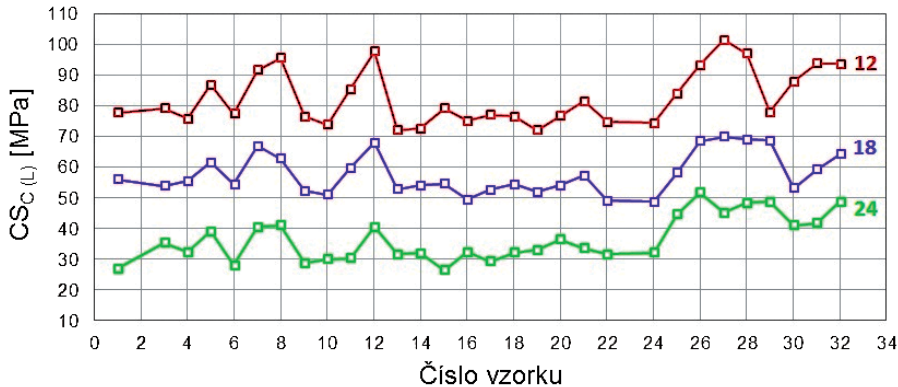
**OBRÁZEK 11:** Detail frézovacího vrtáku pro přípravu vrtu průměru 12 mm



**OBRÁZEK 12:** Speciální stojánek pro upevnění vrtáčky s vrtákem a ukotvení k prvku

roztlačování čelistí a na ose  $y$  síla potřebná pro roztačení čelistí. Maximální síla ( $F_{max}$ ) je stanovena z průsečíku přímkou (smluvní bod), které tvoří tečny k elastické a plastické části průběhu pracovního diagramu. Konvenční pevnost v tlaku podél vláken ( $CS_{C(L)}$ ) se stanoví z podílu mezního zatížení a plochy zatlačovaných čelistí. Modul pružnosti není možné vypočítat přímo z pracovního diagramu, nicméně ze sklonu přímky proložené přímoou částí záznamu síly a deformace je možné stanovit modul přetvárnosti v tlaku podél vláken ( $MOD_{C(L)}$ ).

Mezi výhody představené metody patří vysoká přesnost stanovení mechanických vlastností (pevnosti a modulu přetvárnosti v tlaku podél vláken) hodnoceného dřeva přímo v terénu. Podařilo se prakticky ověřit spolehlivost použití přístroje, který je dostatečně citlivý k přirozeným rozdílům mezi různými prvky historického dřeva, přirozeným změnám vlastností (distribuce po šířce a délce výřezů, výskyt vad). Silné korelační vztahy byly nalezeny zejména mezi konvenční pevností v tlaku podél vláken ( $CS_{C(L)}$ ) a pevností dřeva standardních těles ( $S_{C(L)}$ )

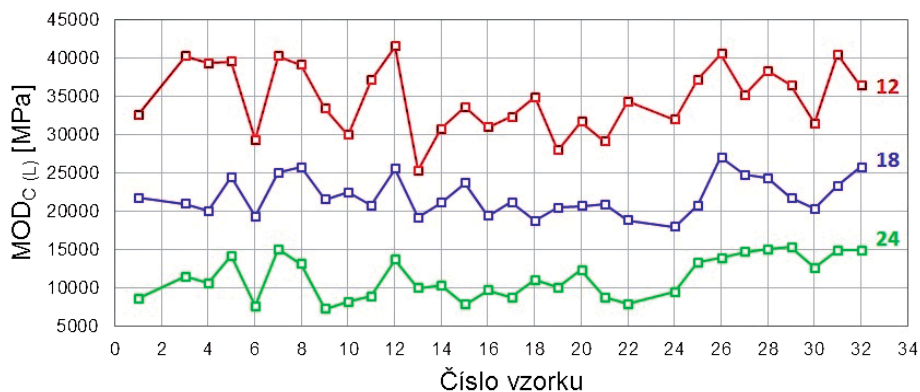


**OBRÁZEK. 13:** Vliv vlhkosti dřeva na konvenční pevnost v tlaku podél vláken ( $CS_{C(L)}$ ) (Kloiber *et al.* 2016)

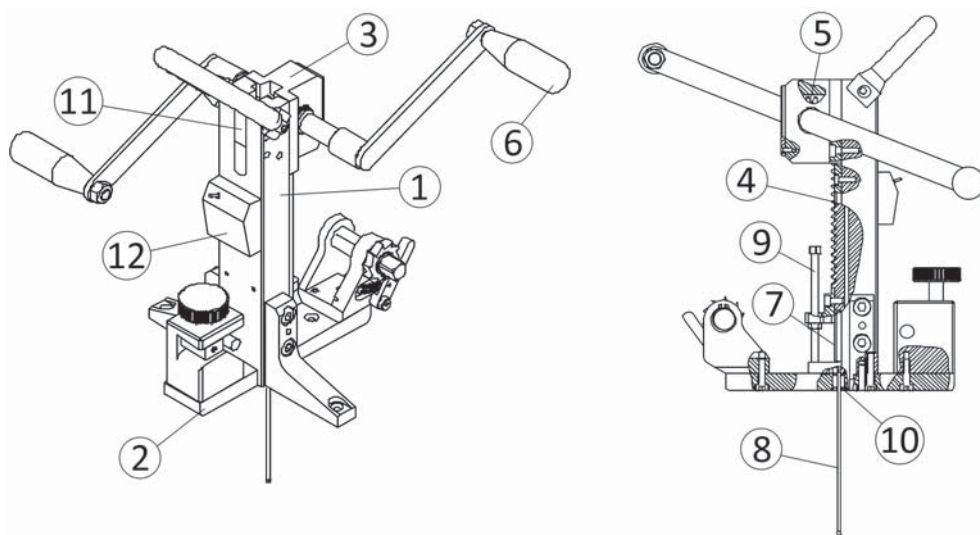
(korelační koef. 0,7–0,95). Konvenční pevnost v tlaku podél vláken koreluje i s ostatními sledovanými parametry dřeva, např. ( $\rho$ ) hustotou (korelační koef. 0,7–0,95) a ( $H_{(L)}$ ) tvrdostí podél vláken (0,7–0,9). Přístroj pomáhá s odhadem mechanických vlastností na čistém dřevě a je tedy nutné provádět vizuální korekci, kde se zohlední vliv přirozených vad.

Otvor pro zkoušku je připravován frézovacím vrtákem vnějšího průměru 12 mm (**obr. 11**), který je upnutý do akumulátorové ruční vrtačky. Z důvodu možného bočního pohybu vrtáku v průběhu vrtání je vrtačka upevněna ve speciálním stojánku, který zajišťuje pevné ukotvení k prvku (**obr. 12**). Stojánek může být připevněn přímo na zabudovaný prvek nebo na podpůrné pevné lešení. Vyžaduje volnou plochu o rozměrech 150 × 150 mm. Pro zajištění kvality vrtání se doporučuje řídit rychlost vrtání, zejména posun vrtáku do vrtaného otvoru. Ze stejného důvodu musí být ostří vrtáku udržováno stále ostré a čisté. Tupá nebo zanesená ostří mohou způsobovat vytrhání vláken ze stěn vrtu, čímž může následně dojít ke zkreslení výsledku měření. Příprava vrtu by měla probíhat v nepoškozených místech prvku bez přirozených vad a zjevného poškození. Měření je přesné pouze tehdy, když je vrt orientován kolmo k vláknům v radiálním směru, kde dochází k pravidelnému střídání jarní a letní části letokruhu, a když jsou čelisti roztlačovány podél vláken, u konstrukčních prvků zpravidla rovnoběžně s osou prvku. V tangenciálním směru dochází k ovlivnění měření větším zastoupením jarní nebo letní zóny dřeva, což vede ke zkreslování výsledků. Vyšší počet nevhodně zvolených umístění vrtů může ovlivňovat mechanickou odolnost hodnoceného prvku. Čím vyšší počet vrtů na jednom prvku je pro měření připraven, tím spolehlivější bude odhad mechanických vlastností. Nicméně nejmenší přípustný počet vrtů u jednoho hodnoceného prvku jsou 2 vrtů. V případě, že se data z měření v obou vrtech výrazně odlišují, je potřeba navíc provést ještě jeden vrt a použít naměřená data ze dvou vrtů, které jsou si podobné.

Jako jiné *in situ* metody používané při diagnostice zabudovaného dřeva vykazuje popísaná metoda měření pevnosti a modulu přetvárnosti dřeva v tlaku podél vláken významnou závislost na obsahu vody ve zkoumaném materiálu. Jak je patrné na **obrázcích 13 a 14**, s rostoucí vlhkostí se konvenční pevnost a modul přetvárnosti v tlaku podél vláken snižují. Vliv vlhkosti je největší v okolí meze hygroscopicity, kdy jsou hodnoty měřených mechanických vlastností přibližně o polovinu nižší než při vlhkosti 12%. Zvýšená vlhkost dřeva



**OBRÁZEK 14:** Vliv vlhkosti dřeva na modul přetvárnosti v tlaku podél vláken ( $MOD_{C(L)}$ ) (Kloiber et al. 2016)



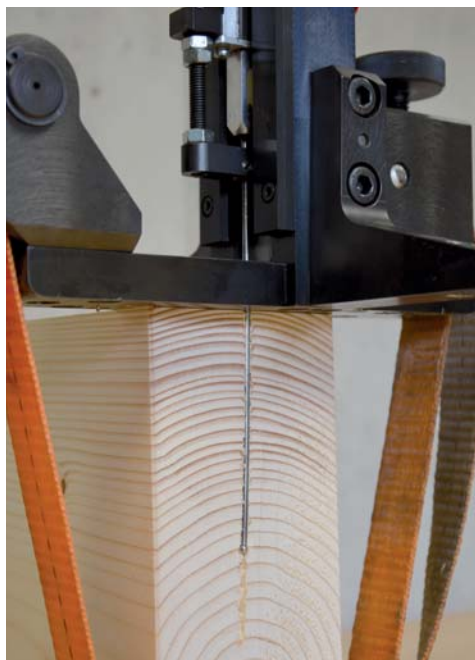
**OBRÁZEK 15:** Axonometrie přístroje se zatlačováním trnu

je tedy nežádoucím faktorem, který negativně ovlivňuje pevnostní vlastnosti dřeva. Nezbytnou součástí zkoušky je proto měření vlhkosti v místě zkoušky, pokud možno pomocí zarážecích sond, které lépe zaznamenají vlhkostní změny po průřezu prvkem. Naměřené mechanické vlastnosti je potřeba přepočítat na hodnoty při 12 % vlhkosti dřeva (Kloiber et al. 2016).

Významnou charakteristikou terénní zkoušky je skutečnost, že měření probíhá na zatíženém prvku za přítomnosti neznámých vnitřních sil. Pomocí digitální korelace obrazu bylo prokázáno, že se po vyvrtání otvoru stav napětí uvolní do vzdálenosti přibližně 2 mm od jeho okraje. Pokud nebyl prvek trvale poškozen (vznik plastické deformace), není měření ovlivněno vnitřní napjatostí konstrukčního prvku. Výše uvedené tvrzení bylo potvrzeno i zkouškami na ohýbané dřevěné konzole.



**OBRÁZEK 16:** Přístroj pro měření mechanického odporu dřeva při zatačování trnu

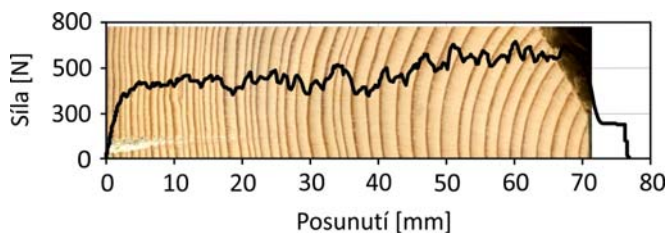


**OBRÁZEK 17:** Detail průniku trnu materiálem a ukotvení k materiálu

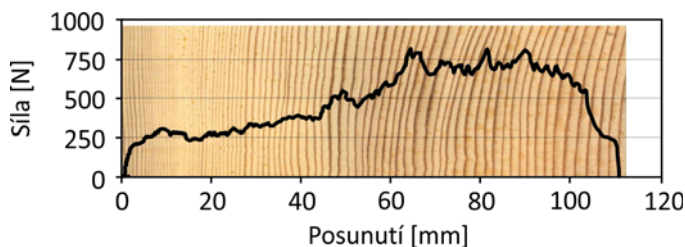
Ve spolupráci Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR a Ústavu nauky o dřevě Mendelovy univerzity v Brně byl vyvinut přístroj (**obr. 15 a 16**) umožňující stanovení mechanického odporu vůči pozvolnému vnikání tělesa do dřeva, a to do hloubky odpovídající rozměrům běžných dřevěných konstrukčních prvků, využitelný pro následné nepřímé stanovení hustoty a mechanických vlastností dřeva.

Konstrukčně se přístroj dle **obrázku 15** skládá z tělesa vedení (1), k jehož spodní části je v kolmém směru připevněna základna (2), v horní části je k tělesu vedení připevněno těleso pohybového ústrojí (3), v tělese vedení je umístěn ozubený hřeben (4) poháněný přes ozubené kolo (5) umístěné v tělese pohybového ústrojí, na ozubené kolo je přenášena síla lidských paží přes kliky (6) pomocí hřídele. Na ozubený hřeben je v jeho dolní části připojen 5kN siloměr (7), k siloměru je přišroubován zatačovací trn (8), který je vyroben z pružinové oceli. Zatačovací trn je opatřen pŭlkulatým hrotem. K tělesu vedení je v rovnoběžném směru s pohybem ozubeného hřebene připojeno přímočaré pohyblivé vedení (9), které tvoří doraz a chrání siloměr před poškozením. Zatačovací trn prochází základnou mezi bronzovými pouzdry (10), která snižují tření při pohybu trnu a která jsou v základně zajištěna pomocí tenké matice. Přístroj je osazen snímačem posuvu, který obsahuje snímací čidlo (11), pevně spojené s tělesem vedení a kódovaný proužek upevněný v drážce na zadní stěně ozubeného hřebene, v zadní části tělesa vedení je umístěn vysílač (12) elektronicky propojený se snímacím čidlem, vysílač je bezdrátově propojen s počítačem (Kloiber a Tippner 2012).

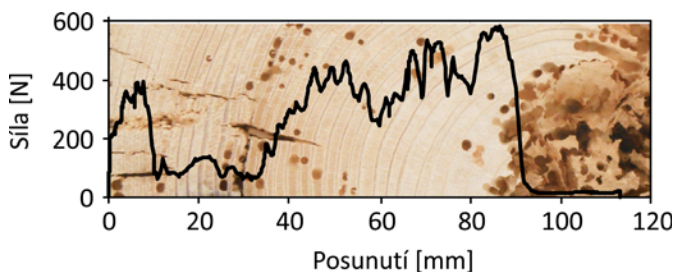
Těleso přístroje lze k testovanému objektu upevňovat různými způsoby, nejčastěji textilním popruhem (**obr. 17**), nebo opásáním pomocí válečkového řetězu, případně pomocí spojovacích



**OBRAZEK 18:** Záznam síly vztažený k posunu trnu při měření na dřevě smrku (Kloiber a Drdácký 2015)



**OBRAZEK 19:** Záznam síly vztažený k posunu trnu při měření na dřevě borovice (Kloiber a Drdácký 2015)



**OBRAZEK 20:** Záznam průběhu síly a posunutí při průniku trnu do dřeva smrku s hnilobou a požerky od dřevokazného hmyzu (Kloiber a Drdácký 2015)

vrutů. Po upevnění k měřenskému prvku je kolmo k základně přístroje do dřeva vtlačován trn (dřík trnu má průměr 2,5 mm a délku 120 mm) vyrobený z pružinové oceli, dřík je zakončen půlkulatým hrotem průměr 3 mm (**obr. 17**), přes ozubený hřeben a ozubené kolo, které je poháněno oboustranně pomocí dvou proti sobě uložených klik. Průběžně je při vtlačování trnu snímána a zaznamenávána působící síla, která je vztažena k měřené dráze (Kloiber et al. 2014). Měřicí program přístroje zajišťuje zpracování, zobrazování a ukládání dat v reálném čase. Zobrazuje se vždy právě měřený průběh síly (buď v závislosti na čase, nebo posuvu trnu). Během měření jsou v počítači počítány i základní charakteristiky: práci vyjadřující plochu pod křivkou síly vztaženou k posuvu, délku průniku trnu, čas posuvu trnu a maximální ( $F_{max}$ ) a minimální sílu ( $F_{min}$ ). Dělením plochy pod křivkou hloubkou zatlačování je následně vypočtena průměrná síla ( $F_{AVG}$ ) potřebná pro zatlačení trnu. Tento parametr je klíčový pro hodnocení zjišťovaného mechanického odporu dřeva.

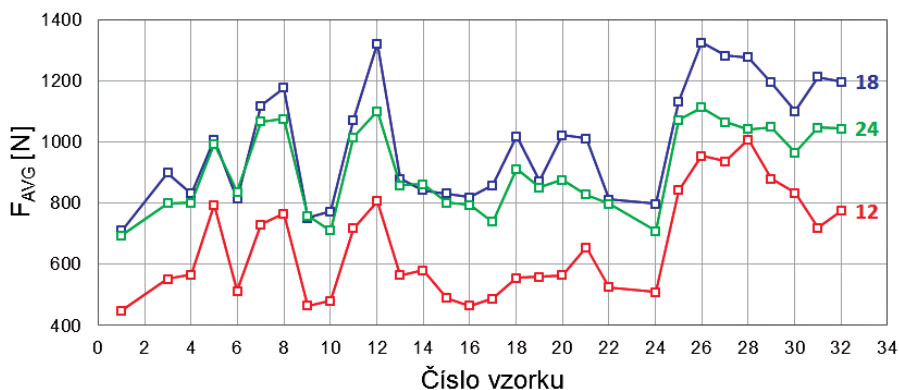


Plynulý záznam síly vztažený k posunu trnu je schopen postřehnout změnu vlastností v celé hloubce vniku, ať již přirozenou distribucí vlastností, tak např. změnu vlastností způsobenou biodegradací. Průběh sil v případě nepoškozeného smrku odpovídá střídání zón letokruhů dřeva (zóny letního dřeva s vyšším mechanickým odporem a zóny jarního dřeva s mechanickým odporem nižším) (**obr. 18**). Průběh síly rovněž umožňuje stanovit šířky letokruhů (přírůsty) v průřezu prvku. Celkový průběh pak odpovídá rovnoměrnému rozložení mechanického odporu v průřezu, tedy vyrovnané kvalitě zdravého dřeva smrku. Při měření mechanického odporu dřeva borovice je opět patrný rozdíl v zónách letokruhů a šířkách letokruhů (**obr. 19**). Záznam s nárůstem sil odhaluje tzv. jádrové dřevo typické pro dřevo borovice tvořené dřevem s vyšší hustotou a tedy i vyšším mechanickým odporem. Absolutní hodnoty sil pak odpovídají mechanickému odporu proti vtlačení trnu u zdravého dřeva borovice. Na **obrázku 20** je uveden záznam měření na prvku ze dřeva smrku obsahujícího biodegradaci. Relativní pokles síly v zóně s hnilobou vůči zóně zdravého dřeva i pokles absolutní hodnoty sil velmi dobře indikují pokles mechanického odporu způsobený degradací dřeva hnilobou (Kloiber a Drdácý 2015).

Lze konstatovat, že přístroj je použitelný v široké škále vlastností zdravého i poškozeného dřeva. Výsledky zkoušek představují především velmi dobrou korelaci průměrné síly potřebné na zatlačení trnu do dřeva s hustotou dřeva a pevností zjišťovanou laboratorně na standardních tělesech v tlaku napříč a podél vláken (Tippner et al. 2011).

Stejně jako u roztačování čelistí ve vrtu tak i u zatlačování trnu je výhodou vysoká přesnost stanovení mechanických vlastností na základě korelace s průměrnou silou, která je zapotřebí na zatlačení trnu do dřeva. Podařilo se prakticky ověřit spolehlivost použití přístroje, který je dostatečně citlivý k přirozeným rozdílům mezi různými prvky historického dřeva, přirozeným změnám vlastností (distribuce po šířce a délce výřezů, výskyt vad). Silné korelační vztahy byly nalezeny zejména mezi průměrnou silou ( $F_{AVG}$ ) a pevností dřeva standardních těles ( $S_{C(L)}$ ) (korelační koef. 0,7–0,8). Průměrná síla koreluje i s ostatními sledovanými parametry dřeva, např. ( $\rho$ ) hustotou (korelační koef. 0,8–0,9) a ( $H_{(L)}$ ) tvrdostí podél vláken (0,6–0,8). Přístroj pomáhá s odhadem mechanických vlastností na čistém dřevě a je tedy nutné provádět vizuální korekci, kde se zohlední vliv přirozených vad (Kloiber et al. 2014).

Přístroj byl navržen a testován pro hodnocení zabudovaného dřeva, zdravého či o různém stupni degradace. Měření vyžaduje volný povrch o velikosti cca 150 × 150 mm pro upevnění zařízení. Přístroj zaznamenává poměrně široké spektrum mechanického odporu dřeva proti vnikání trnu, plynoucí jak z přirozených vlastností různého dřeva, tak z různého stupně degradace. Odpor je ovlivněn nejen druhem, kvalitou a hustotou dřeva, ale rovněž vlhkostí dřeva (Tannert et al. 2014). Tyto parametry musí být při interpretaci výsledků zohledněny. Případné vady dřeva, jako jsou trhliny, suky, cizí tělesa apod., výrazně zkreslují výsledky. Měření v místech s vadami dřeva je velmi vhodné se vyhnout, nebo výsledky takového měření interpretovat velmi opatrně. Podmínkou pro zatlačování trnu napříč vláken do dřeva je zachování radiálního směru, při kterém dochází k pravidelnému střídání jarní a letní části letokruhu. Odchylna až do přibližně 10° od čistě radiálního směru je přijatelná. Když je trn zatlačován v tangenciálním směru, výsledky mohou být zkreslené, protože u dřevin s výrazným přechodem mezi jarním a letním dřevem trn často proniká jen méně hustým jarním dřevem a nepronikne do hustých přírůstů letního dřeva.



**OBRAZEK 21:** Vliv vlhkosti dřeva na průměrnou sílu potřebnou pro zatlacení trnu ( $F_{AVG}$ ) (Tippner et al. 2016)

Jako jiné *in situ* metody používané při diagnostice zabudovaného dřeva vykazuje popisovaná metoda měření průměrné síly potřebné pro zatlacení trnu do dřeva významnou závislost na obsahu vody ve zkoumaném materiálu. Jak je patrné na **obrázku 21**, s rostoucí vlhkostí se průměrná síla potřebná pro zatlacení trnu snižuje. Vliv vlhkosti je největší v okolí meze hygroscopicity, kdy jsou hodnoty měřených mechanických vlastností přibližně o třetinu nižší než při vlhkosti 12%. Zvýšená vlhkost dřeva je tedy nežádoucím faktorem, který negativně ovlivňuje pevnostní vlastnosti dřeva. Nezbytnou součástí zkoušky je proto měření vlhkosti v místě zkoušky, pokud možno pomocí zarážecích sond, které lépe zaznamenají vlhkostní změny po průřezu prvkem. Naměřené mechanické vlastnosti je potřeba přepočítat na hodnoty při 12% vlhkosti dřeva (Tippner et al. 2016).

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu DF11P01OVV001 programu NAKI, MKČR „Diagnostika poškození a životnosti objektů kulturního dědictví“ a post-doc projektu GAČR 105/10/P573 „Chování dřeva při zatláčování trnu“.

## Použitá literatura

- Drdácký, M. a M. Kloiber. In-situ compression stress-deformation measurements along the timber depth profile. *Advanced Materials Research*. 778, 2013, 209-216. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.778.209>
- Kloiber, M. a M. Drdácký. *Diagnostika dřevěných konstrukcí*. Praha: ČKAIT, 2015. ISBN 978-80-87438-64-0.
- Kloiber, M. a M. Drdácký. *Zařízení pro terénní měření konvenční pevnosti a modulu přetvárnosti při roztláčování čelistí ve vyvrtaném otvoru*. Patent číslo: CZ 304384, 2014.
- Kloiber, M., M. Drdácký, J. Kunecký, V. Sebera a J. Tippner. Mini-jack based direct determination of wood mechanical characteristics in situ. Paper presented at *17th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM 17)*, 3.-7. 7. 2016, Rhodes, Greece. (In press).

- Kloiber, M., M. Drdácý, J. Tippner a J. Hrivnák. Conventional compressive strength parallel to the grain and mechanical resistance of wood against pin penetration and micro-drilling established by in-situ semi-destructive devices. *Materials and Structures*. 2015, 48(10), 3217-3229. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0392-6>
- Kloiber, M. a J. Tippner. *Zařízení pro terénní měření mechanického odporu dřeva proti vnikání nástroje (trnu) nebo při vytahování vrutu*. Patent číslo: CZ 303641, 2012.
- Kloiber, M., J. Tippner a J. Hrivnák. Mechanical properties of wood examined by semi-destructive devices. *Materials and Structures*. 2014, 47(1), 199-212. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0055-z>
- Riggio, M., R. W. Anthony, F. Augelli, B. Kasal, T. Lechner, W. Muller a T. Tannert. In-situ assessment of structural timber using non-destructive techniques. *Materials and Structures*. 2014, 47(5), 749-766. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0093-6>
- Tannert, T., R. Anthony, B. Kasal, M. Kloiber, M. Piazza, M. Riggio, F. Rinn, R. Widmann a N. Yamaguchi. In-situ assessment of structural timber using semi-destructive techniques. *Materials and Structures*. 2014, 47(5), 767-785. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0094-5>
- Tippner, J., M. Kloiber a J. Hrivnák. Derivation of mechanical properties by pushing of a pin into wood. In: Divos, F. *17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Vol. 2. Sopron: University of West Hungary, 2011, 575-582. ISBN 978-963-9883-83-3.
- Tippner, J., M. Kloiber, V. Sebera a J. Kunecky. Health diagnostics of timber by continual pushing-through method. Paper presented at *17th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM 17)*, 3.-7. 7. 2016, Rhodes, Greece. (In press).

# Zkoušení betonů a hornin *in situ*

Štěpán Major, Pavel Beneš

Mezi základní mechanické charakteristiky stavebních materiálů patří pevnost v tlaku, tahu a ohybu nebo modul pružnosti. Pevnost v tlaku je zřejmě vůbec nejčastěji stanovovanou veličinou. Tato pevnost slouží například k ověření shody se specifikovanou pevnostní třídou betonu. U materiálů s výrazně větší pevností v tlaku než v tahu (kámen, beton, keramika ap.) dojde při namáhání ohybem k porušení na taženém povrchu trámce, a tím dostaneme při mezním zatížení pevnost v tahu za ohybu. Různé skupiny materiálů je vhodné charakterizovat pomocí různých mechanických veličin dle jejich použití. V případě betonů jsou normalizovány zkoušky pevnosti v tlaku, v tahu za ohybu a v příčném tahu. Zatímco v případě testování cementů jsou to pouze pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu, u cihlářských výrobků a vápenopískových zdělicích prvků je standardně realizována pouze tlaková zkouška. Základní přehled zkoušek stavebních materiálů uvádí např. Svoboda et al. (2013).

Při měření dalších mechanických vlastností stavebních materiálů se často setkáváme s tím, že mnohé postupy navržené například pro kovy nelze použít. Mezi obtížně měřitelné charakteristiky patří například lomová houževnatost  $K_{IC}$ , pevnost v tahu  $\sigma_{UT}$  nebo modul pružnosti  $E$  v tahu (pro křehké materiály jsou hodnoty modulu pružnosti v tahu a tlaku odlišné a nelze tyto hodnoty jednoduše přepočítat, tj. mezi oběma veličinami neexistuje jednoduchý vztah reprezentovaný například jejich poměrem). Typickým příkladem takové obtížné stanovitelné veličiny je právě pevnost v tahu  $\sigma_{UT}$  (viz Major et al. 2014).

Při odběru vzorků materiálu z existujících architektonických objektů nebo vzorků kamene při geologickém průzkumu se často setkáváme s tím, že materiál postupně mění své vlastnosti (např. v důsledku vysychání). To je důvodem, proč je často žádoucí provést měření přímo na místě.

Základní typy zkoušek používaných v technické praxi jsou: zkouška pevnosti v tlaku, zkouška tahové pevnosti v ohybu a pevnost v příčném tahu. Většinou jsou prováděny v laboratoři, ale pokud je k dispozici mobilní zatěžovací zařízení, mohou být prováděny i v terénu. Níže je uveden krátký přehled.

## Zkoušení pevnosti v tlaku

Zkoušení pevnosti v tlaku je nejčastěji realizovaná pevnostní zkouška stavebních hmot. Standardní zkušební těleso má tvar krychle nebo válce. V případě betonů jsou vlastnosti zkušebního tělesa specifikovány normou ČSN EN 12390-3. Zkušební tělesa mají většinou tvar krychle o hraně 100 mm. Pro zkoušení materiálů ze stávajících konstrukcí se používají

válcové vzorky získané jádrovým vyvrtáváním. Tyto mají stejný průměr i výšku. Zkušební tělesa upravená z vývrtů z konstrukce charakterizuje ČSN EN 12504-1.

Zkoušení přírodního kamene je popsáno v ČSN EN 1926. Zkušební tělesa mohou mít tvar krychle (o hraně 50 nebo 70 mm) nebo válce (průměr a výška 50 nebo 70 mm). Rozměr se vztahuje k velikosti největšího zrna v hornině v poměru 10:1. Osa zkušebního tělesa musí být kolmá k plochám anisotropie. Zkušební tělesa jsou před zkouškou vysušena na ustálenou hmotnost.

V případě zkoušení malt lze využít analogie se zkoušením cementových tmelů, kdy se jako zkušební tělesa používají díly získané zlomením zkušebního hranolu v průběhu zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Poloviny trámečků se vloží bočními plochami (kolmo na směr hutnění) mezi pomocné ocelové destičky, které přesně vymezují velikost plochy, na níž působí zatěžující síla na povrchu nepravidelného úlomku. Podle ČSN EN 196-1 jsou rozměry destiček z tvrzené oceli 40 × 40 mm a tloušťka vzorku min. 10 mm. Při zkoušení malt však je přirozené zatěžovat ve směru skutečného působení zatížení ve stavbě, nikoliv v příčném směru. Zkoušení malt je věnována samostatná kapitola.

Rychlost zatěžování by v průběhu experimentu měla dosahovat hodnot v rozmezí 2400 ± 200 N.s<sup>-1</sup>. Nové cihlářské a vápenopískové zdící prvky se musí zkoušet celé. Pouze v případě, že rozměry kolmé na působící sílu jsou větší než 500 mm nebo výška prvků je 300 mm a více, je možné z těchto prvků vyříznout pro stanovení pevnosti v tlaku zkušební tělesa podle přílohy B ČSN EN 771-2. Tyto standardní postupy většinou nelze u historických materiálů dodržet a je nutno řídit se při přípravě zkušebních těles příslušnými normami pro památky, viz kapitola Nestandardní laboratorní zkoušky malt.

Výsledkem měření je max. hodnota síly  $F$ , dosažená při vyhovujícím způsobu porušení (rozdrcení) zkušebního tělesa. Samotná pevnost v tlaku  $\sigma_{cp}$  (MPa) se stanoví ze vztahu (4):

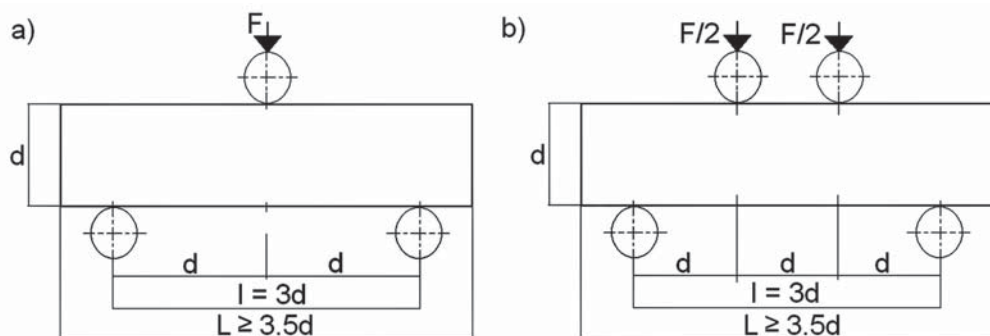
$$\sigma_{cp} = F / A_c \quad (4)$$

kde  $F$  je max. zatěžovací síla při porušení,  $A_c$  plocha, na kterou působí zatěžovací síla. Pevnost v tlaku se zaokrouhuje na nejbližších 0,5 MPa. U existujících staveb je často nutno provést test pevnosti, aniž by bylo možno získat vzorek materiálu. To je důvodem k použití nedestruktivních metod, většinou založených na měření tvrdosti.

Tvrdoměrné metody se využívají jak pro zjišťování pevnosti v tlaku, tak pro měření tvrdosti vyšetřovaných materiálů (Brožovský 2005). Ve stavební praxi jsou rozšířené zejména pro zkoušení pevnosti v tlaku betonu. Tvrdoměrné metody se dělí na: odrazové – jsou založeny na odrazu pružného tělesa od povrchu materiálu; vtiskové – jsou založeny na měření vtisku vytvořeného ve vyšetřovaném materiálu zatlačením či zaražením tělesa definovaného tvaru; špičákové – spočívají ve zjištění hloubky průniku špičáku do zkoušeného materiálu; brusné – spočívá v měření energie spotřebované na vybroušení stopy o určité délce a šířce ve zkoušeném materiálu; vrtací – spočívají ve zjišťování hloubky průniku vrtacího nástroje do materiálu nebo měření odporu proti vnikání vrtáku za definovaných podmínek – počet otáček, přitlačná síla, a nakonec metody vrypové.

## Zkouška tahové pevnosti v ohybu

U materiálů s výrazně vyšší pevností v tlaku než v tahu dochází k jeho porušení na taženém povrchu trámce během ohybového zatěžování. Tato zkouška byla navržena pro křehké stavební materiály (betony, vápenopískové prvky, přírodní kámen) jako náhrada za klasickou



**OBRÁZEK 22:** Uspořádání zkoušky tahové pevnosti v ohybu: a) tříbodový ohyb – zatěžování jedním břemenem uprostřed; b) čtyřbodový test – zatěžování dvěma břemeny

tahovou zkoušku snadno realizovatelnou v případě houževnatých a vysoce homogenních materiálů, jako jsou kovy. Při zkoušce tříbodovým ohybem se zatěžuje jedním břemenem, při zkoušce čtyřbodovým ohybem se zatěžuje dvojicí břemen, viz schéma na **obr. 22**.

Tahová pevnost materiálu v tahu ohybem  $\sigma_{cf}$  se stanoví při zatížení tělesa dvěma břemeny (viz **obr. 22b**) ze vztahu (5a):

$$\sigma_{cf} = F / d_1 d_2 d_2 \quad (5a)$$

při zatížení tělesa jedním břemenem uprostřed (5b):

$$\sigma_{cf} = 3F / 2d_1 d_2 d_2 \quad (5b)$$

kde  $F$  je maximální zatěžovací síla,  $l$  je vzdálenost mezi podpěrami,  $d_1$  je šířka a  $d_2$  výška průřezu zkušební hranolu. Pevnost v tahu za ohybu se zaokrouhuje na nejbližších 0,1 MPa. Výsledek zkoušky musí být doplněn údajem o typu uspořádání experimentu (zatěžování dvěma nebo jedním břemenem).

Pevnost betonu v tahu za ohybu se zkouší dle ČSN EN 12390-5 na zkušebních tělesech ve tvaru hranolu dle ČSN EN 12390-1. Tělesa jsou rovnoměrně zatěžována ve zkušebním lisu prostřednictvím zatěžovacího zařízení až do konečného porušení.

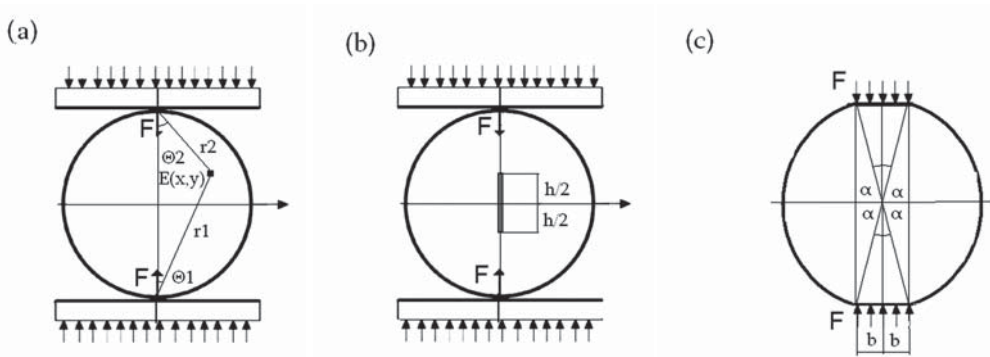
Pro zkušební tělesa z přírodního kamene s rozměrem největšího zrna menším než 25 mm jsou doporučeny rozměry 50 × 50 × 300 mm. Při přípravě je nutné dbát na orientaci vrstev anisotropie, detailní informace obsahuje norma ČSN EN 12372.

## Pevnost v příčném tahu

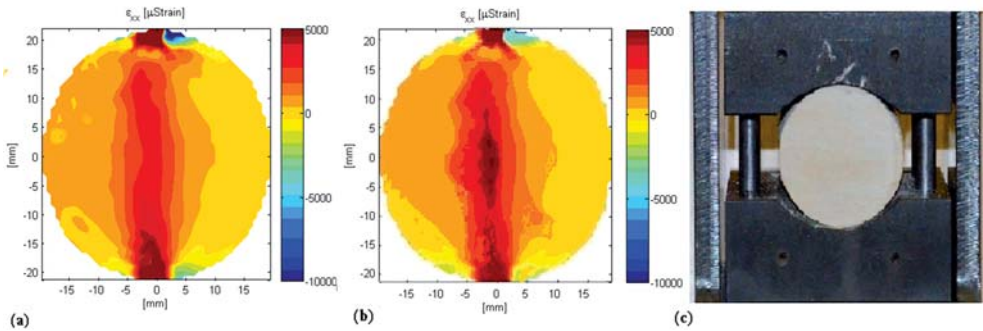
Jeden ze způsobů měření tahové pevnosti na vzorcích získávaných např. jádrovým vrtáním je tzv. „Brazilský test“. Tato zkouška je dnes používána jako standardní zkouška pro stanovení pevnosti v tahu u křehkých materiálů.

Tato zkouška spočívá v zatěžování válcového vzorku podle **obr. 23**. Z obrázku je zřejmé, že se předpokládá lineární kontakt mezi čelistmi zkušebního stroje a vzorkem. Pevnost v příčném tahu lze pak počítat podle vztahu (6):

$$\sigma_w = -2F / \pi D \quad (6)$$



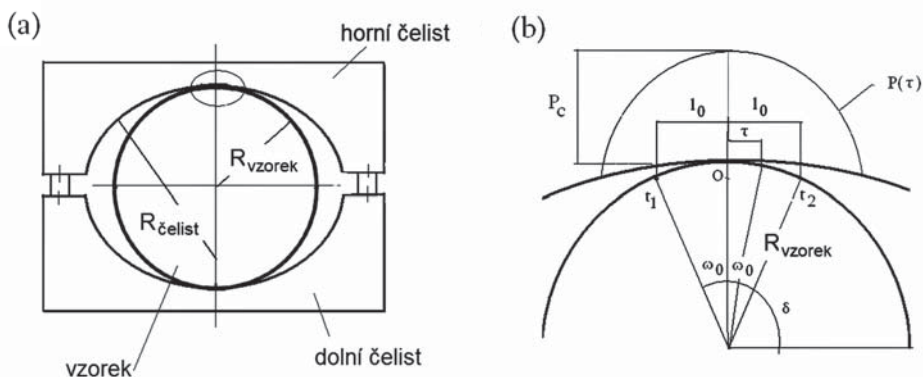
**OBRÁZEK 23:** Schéma Brazílského testu; a) základní uspořádání; b) vzorek s vrubem, který má zajistit iniciaci trhliny uprostřed zkušebního tělesa; c) vzorek s ploškou



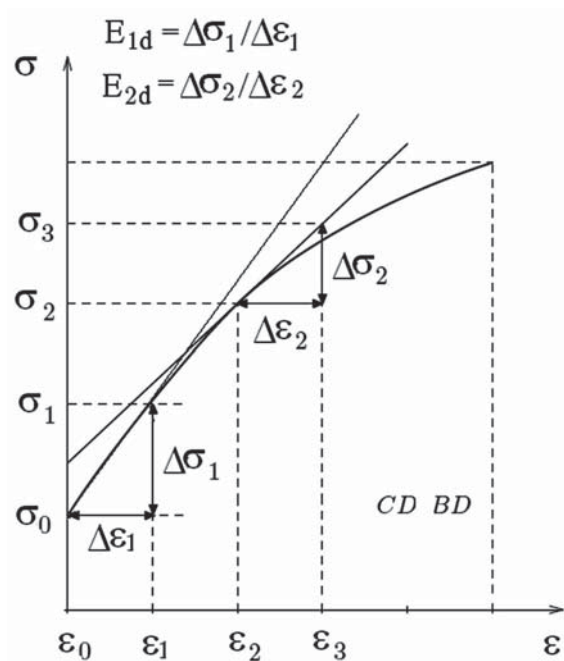
**OBRÁZEK 24:** Analýza napětí a deformace ve válcovém vzorku disku pomocí DIC: a) deformace ve válcovém vzorku v průběhu Brazílského testu – trhlina zjevně vzniká v oblasti kontaktu; b) případ Brazílského testu, při němž došlo k iniciaci trhliny ve středu vzorku; c) Split test s použitím čelistí s válcovou plochou (Major et al. 2014)

kde  $F$  je maximální zatěžovací síla,  $D$  je průměr zkušebního tělesa a  $L$  je tloušťka zkušebního disku, resp. výška zkušebního válce. Tloušťka zkušebního tělesa odpovídá délce dotykové přímky tělesa.

Při Brazílském testu je průměr vzorku větší než tloušťka vzorku, tj. zkušební těleso má tvar disku. V případě, že průměr zkušebního válce je menší, než je jeho tloušťka, hovoříme o tzv. Split testu. Zkoušení pevnosti betonu v příčném tahu specifikuje ČSN EN 12390-6. V případě zkoušení betonu norma povoluje i zkoušku na hranolovém vzorku. V tomto případě je lineární kontakt zajištěn pomocí dřevovláknité lišty. Výpočet pevnosti v příčném tahu se realizuje dle vztahu (6). Do vztahu dosazujeme na místo průměru válce  $D$  výšku hranolu, tj. vzdálenost kontaktů,  $L$  je pak délka lineárního kontaktu. Klasická teorie Brazílského testu předpokládá, že zatížení je koncentrováno na velmi úzké ploše, prakticky se jedná o lineární zatížení. Za těchto podmínek by měla trhlina vzniknout ve středu disku. Místo iniciace trhliny a celý průběh porušení zkušebního tělesa lze studovat např. pomocí digitální korelace obrazu (DIC – Digital Image Correlation). Jedná se o optickou metodu měření posunů a deformací na povrchu objektu. DIC sleduje polohu určitého bodu v deformovaném obrazu a srovnává ho s odpovídajícím bodem v referenčním obrazu. Toto párování odpovídajících bodů se provádí automaticky,



**OBRÁZEK 25:** Modifikace Brazílského/Split testu pomocí čelistí s válcovou plochou: a) schéma testu s vyznačeným poloměrem zkušebního válce  $R_{\text{vzorek}}$  a čelistí  $R_{\text{čelist}}$ ; b) detailní pohled na kontaktní plochu s vyznačeným parabolickým zatížením  $P_c$ , resp.  $P(\tau)$  (Major et al. 2015)



**OBRÁZEK 26:** Idealizovaná zatěžovací křivka při Brazílském testu. Z obrázku je zřejmý fyzikální význam veličiny  $E_d$  při určování elastického modulu  $E$ .

pomocí párovacího algoritmu. Analýza experimentů však ukazuje, že tato podmínka není velmi často splněna (Major et al. 2014). Na **obr. 24** je zobrazeno napětí v reálném pískovcovém válci během Split testu. Z obrázku je zřejmé, že maximální napětí je v oblasti kontaktu čelist – vzorek a právě v tomto místě iniciuje trhlinka. Z tohoto důvodu je tento test často kritizován, protože vzorec (6) dává chybný výsledek. Podmínka vzniku trhliny uprostřed vzorku se snadno (např.



dle doporučení American Material Society) zajistí pomocí vrubu ve zkušebním vzorku, dle **obr. 23b**. V tomto případě je ale rozložení napětí ve zkušebním tělese natolik odlišné od podmínek, pro něž byl vztah (6) odvozen, že mnozí autoři toto řešení zpochybňují.

Jedno z navrhovaných řešení problému je založeno na použití čelistí s poloměrem, viz **obr. 24c** a **obr. 25**. Potom je kontakt charakterizován poměrem poloměru čelisti a zkušebního válce  $R_{čelist} / R_{vzorek}$ . Tento případ představuje kontakt dvou válcových ploch pod parabolicky rozloženým zatížením (**obr. 25b**). Skutečné zatížení není lineární, ale je rozloženo po oblouku válce. Na první pohled je popis napětí/deformace složitější než v případě lineárního kontaktu, ale experimenty ukazují, že je tak lépe dosaženo splnění okrajových podmínek. Toto řešení se využívá v konstrukci přenosného zkušebního zařízení.

## Deformační zkoušky a určení Youngova modulu

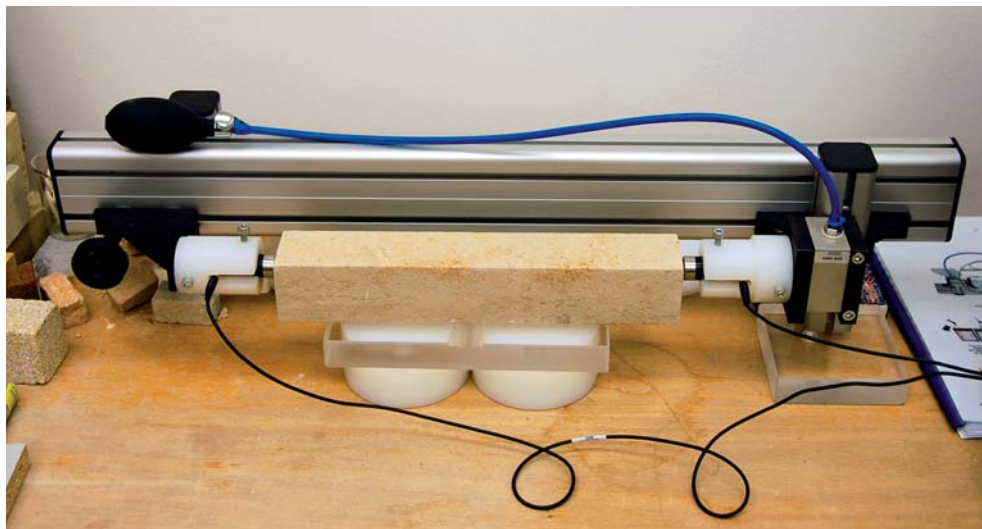
Deformační zkoušky stavebních materiálů zahrnují stanovení statického modulu pružnosti a stanovení objemových změn betonu. Tyto zkoušky se zpravidla provádějí jen v případě zvláštních doplňkových požadavků při specifikaci betonu nebo při vědecké experimentální činnosti. Zjišťování modulu pružnosti kamene, cihlářských a vápenopískových zdících prvků se provádí méně často. Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku se standardně provádí dle ČSN ISO 6784. Metoda stanovuje hodnotu sečnového statického modulu pružnosti při opakovaném plynulém zatěžování zkušebního tělesa tlakem z výchozího základního zatěžovacího stavu při vyvozeném napětí 0,5 MPa na horní zatěžovací napětí ve výši odpovídající zhruba jedné třetině dříve stanovené hodnoty pevnosti studovaného materiálu v tlaku  $\sigma_{cp}$ . Vzorky používané pro tyto experimenty mají většinou tvar válce, ale lze použít i zkušební těleso ve tvaru hranolu. V průběhu experimentu se předepsaným způsobem pomocí průtahoměrů a tenzometrů sledují deformace betonu a zaznamenávají se v čase jejich ustálené hodnoty na určitých zatěžovacích stavech. Statický modul pružnosti v tlaku  $E_C$  se vypočte pomocí vztahu (7):

$$E = \sigma_a - \sigma_b / \varepsilon_a - \varepsilon_b \quad (7)$$

kde  $\sigma_a$  je horní zatěžovací napětí v MPa ( $\sigma_a = 1/3 \sigma_{cp}$ ),  $\sigma_b$  základní napětí (0,5 MPa),  $\varepsilon_a$  průměrná relativní deformace při horním zatěžovacím napětí,  $\varepsilon_b$  průměrná relativní deformace při základním napětí. Statický modul pružnosti se zaokrouhluje na nejbližších 100 MPa, resp. 500 MPa, je-li výsledek menší nebo větší než 10 000 MPa.

Youngův modul  $E$  lze také odhadnout na základě zatěžování disku při Brazílském testu. Pro stanovení bylo navrženo několik metod, žádná však dosud nezískala všeobecné uznání. Jeden z postupů navrhli Yu a Wang (2004) a vychází z předpokladu, že sklon zatěžovací křivky je definován jako  $E_d$ . Modul pružnosti  $E$  by pak mohl být stanoven vynásobením  $E_d$  opravným koeficientem  $k$ . Hodnota koeficientu  $k$  pro případ žuly je 19,2. Z **obr. 26** je zřejmý fyzikální význam veličiny  $E_d$  při určování elastického modulu  $E$ . Jiný postup určení  $E$  navrhl Wang et al. (2004). Tato metoda využívá zploštělého Brazílského disku (**obr. 23c**). Metoda porovnává měřenou deformaci disku s modelem kombinujícím metodu konečných prvků (MKP) a s analytickým výpočtem. Tato metoda je kritizována, protože používá Caweallertsův popis zatížení na kruhovém oblouku, přičemž rozložení tlaku na zploštělém disku je úplně jiné.

Nedestruktivní způsob určování elastického modulu pružnosti využívá ultrazvuku (Brožovský 2005). Na základě stanovení rychlosti průchodu ultrazvukové vlny se určuje



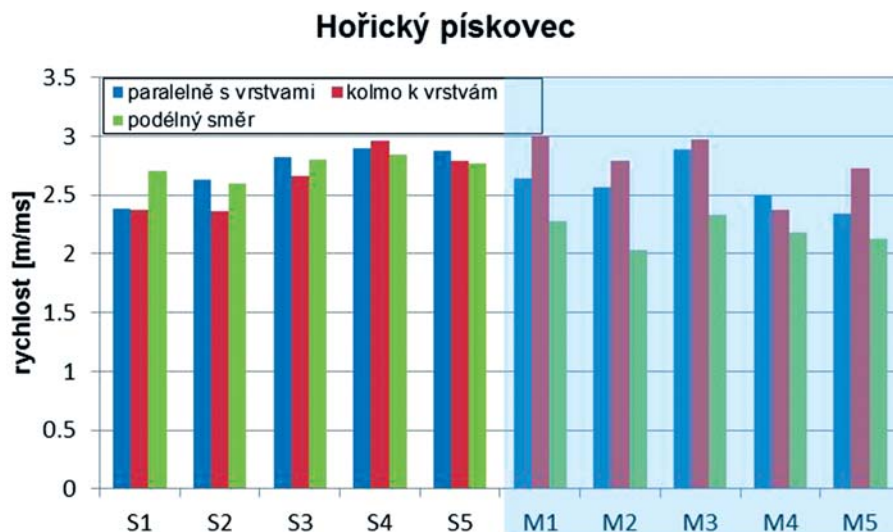
**OBRAZEK 27:** Měření rychlosti průchodu ultrazvukové vlny přírodním kamenem

dynamický modul pružnosti. Stanovení rychlosti šíření zvuku v přírodním kameni je normalizováno v ČSN EN 14579. Vzorek se upevní mezi dva snímače (jeden ultrazvukový impulz budí a druhý jej přijímá) o známé vzdálenosti a měření spočívá v odečtu času, který vlna potřebuje na průchod materiálem vzorku. Příklad zkoušky hořického pískovce je na **obr. 27**. Rozměry vzorku odpovídají požadované velikosti trámečku pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu. Rychlost šíření vlny je ovlivněna mj. orientací vrstev anisotropie nebo vlhkostí materiálu, což je nutné brát v úvahu při vyhodnocení. Vlhčím materiálem se ultrazvuk šíří pomaleji, viz **obr. 28**.

### Zkoušení mechanických vlastností v místě odběru vzorku

Kromě možné změny ve vlastnostech materiálů (např. v důsledku změny vlhkosti) během přepravy je dalším důvodem pro měření *in situ* zejména v geologii obtížná dostupnost lokalit, kde je primární výzkum realizován. Z tohoto důvodu bylo vyvinuto přenosné zařízení, které je určeno pro zkoušení vzorků získaných jádrovým vyvrtáváním. Toto zařízení je založeno na principu Split testu (viz **obr. 29 a 30**).

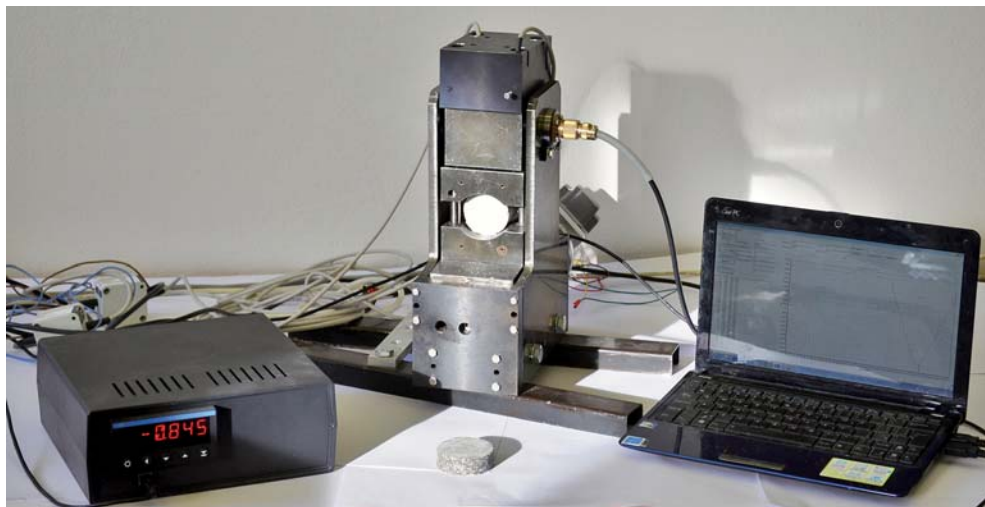
Tento přístroj využívá výměnné čelisti s rádiem, nicméně na místo čelistí lze vložit další vložky určené k realizaci jiných testů, jako jsou zkouška pevnosti v ohybu (tříbodový ohyb) nebo tlaková zkouška (viz **obr. 30b a 30c**). Toto zařízení má hmotnost zhruba 30 kg, pohyb čelistí je zajištěn pomocí pohybového šroubu a dvojice klínů. Zkušební stroj je schopen vyvinout maximální zatížení o velikosti 100 kN (Major et al. 2015). Zařízení je určeno pro měření vzorků získaných jádrovým vyvrtáváním. K pohonu slouží krokový motor napájený z baterie, případně lze použít ruční pohon. Posuv čelistí, resp. deformace zkušební tělesa, je měřena pomocí optoelektronických mikrometrů, resp. polohovými senzory využívajícími laserové triangulace. Přístroj vedle mechanické části obsahuje řídicí jednotku, která komunikuje s počítačem. Naměřené hodnoty spolu s aktuálním zatížením jsou zaznamenávány pomocí



**OBRÁZEK 28:** Měření rychlosti průchodu ultrazvukové vlny hořickým pískovcem; vzorky S1-S2 byly vysušeny dle požadavků normy, vzorky M1-M5 byly saturované (Hasníková 2011)

řídícího softwaru. Naměřené hodnoty se ukládají do souborů v textovém formátu. Tento software umožňuje přímo vypočítat nejen pevnost v příčném tahu  $\sigma_{UT}$ , pevnost v tlaku a pevnost v ohybu  $\sigma_{UC}$ , ale i odhadnout modul pružnosti testovaného materiálu.

Přenosný přístroj určený ke zkoušení mechanických vlastností materiálů využívá k odhadu elastického modulu metodu založenou na srovnávání výsledků měření a modelu MKP sestavy zkušební vzorek a čelist (Major et al. 2015). Vzhledem k tomu, že přenosné zkušební zařízení je relativně malých rozměrů, je třeba také zahrnout do modelu vliv deformace zkušebního stroje, tj. čelistí. Vzhledem k tomu, že tato metoda je integrována přímo do řídicího softwaru zkušebního stroje, je možné provést odhad modulu pružnosti na každém bodě zatěžovací křivky. Definice kontaktu mezi vzorkem válcového tvaru a čelistí je důležitou součástí MKP modelu. Tento model předpokládá pevné spojení mezi prvky čelisti a prvky zkušebního válce při kontaktním úhlu  $5^\circ$ ,  $10^\circ$  a  $15^\circ$ . Model předpokládá izotropní materiál. MKP model využívá kubické síť a síť tvořená čtyřstěny. Pro odhad  $E$  se používají ty body zatěžovací křivky, které se nacházejí zhruba v její první třetině vzhledem k tomu, že především kámen obsahuje velké množství mikrotrhin, což má za následek opakující se lokální relaxace a vznik lokálních maxim a minim na zatěžovací křivce. Vzhledem k tomu není počáteční část zatěžovací křivky vhodná k analýze. Proto se výpočet  $E$  realizuje teprve od okamžiku, kdy počítač či pozorovatel zaznamená kontinuální růst napětí, resp. zatěžující síly. Přesnost odhadu modulu pružnosti výrazně narůstá, pokud je experiment cyklicky opakován, mezní hodnoty zatěžovacího cyklu odpovídají přibližně 1/3 pevnosti vzorku. Vztah mezi hodnotou získanou srovnáním MKP modelu a měřených hodnot je třeba korigovat pomocí opravných koeficientů. Pokud experiment realizujeme na materiálu se známou hodnotou  $E$ , lze vytvořit tabulku korelačních koeficientů. Tyto korelační koeficienty  $K_i$  a  $C_i$  odpovídají aktuálním hodnotám zatěžujících sil v intervalu  $F_i$  a  $F_{i+1}$ . Materiály lze rozdělit do několika skupin podle předpokládaného poměru mezi modulem pružnosti čelistí a vzorku (Major et al. 2015).



**OBRÁZEK 29:** Pohled na přenosný zkušební stroj pracující na principu Split testu

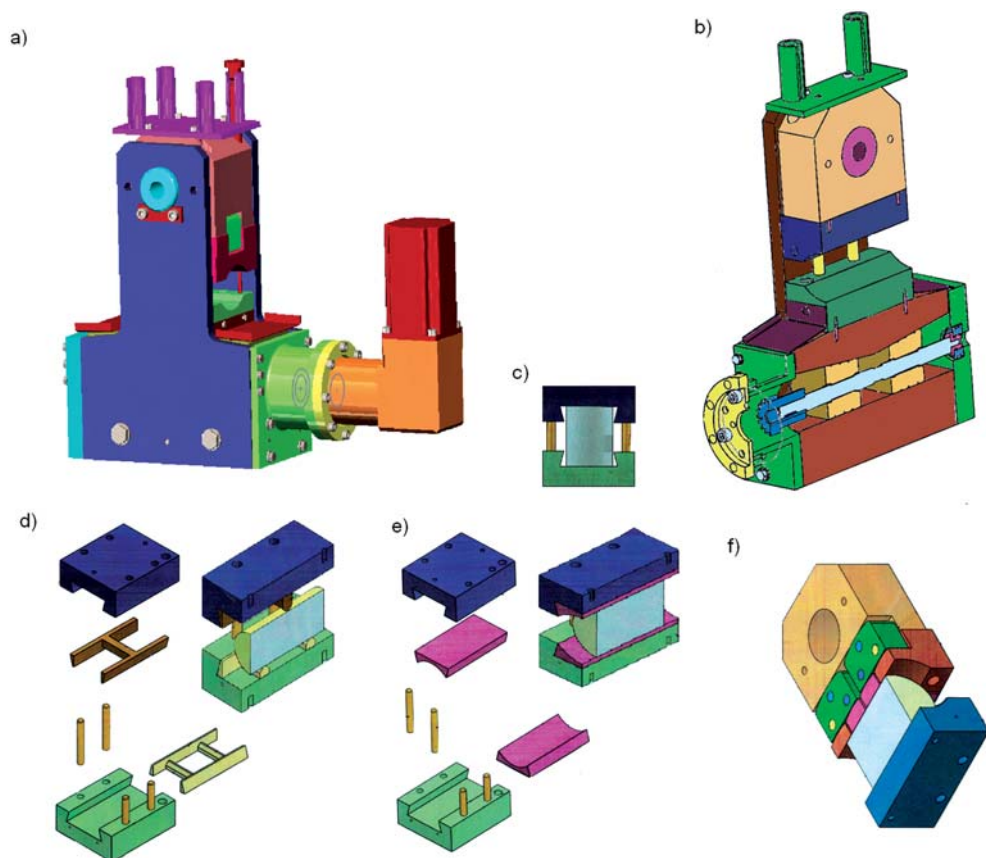
Program určený k výpočtu  $E$  pak pracuje se třemi různými tabulkami. Některé experimenty ukazují, že poměr mezi elastickým modulem v tahu a tlaku je zhruba 0,6–0,9. Pomocí přenosného zařízení pracujícího na principu Split testu lze tedy (alespoň přibližně) změřit všechny základní mechanické veličiny v terénu.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu DF11P01OVV001 programu NAKI MKČR „Diagnostika poškození a životnosti objektů kulturního dědictví“.

## Použitá literatura

- Brožovský, J. *Nedestruktivní zkušební metody – nástroj pro hodnocení pevností stavebních materiálů a výrobků*. Brno: VUTIUM, 2005.
- Hasníková, H. Ultrasonic material characteristics. In: *STONECORE Deliverable D6.5 Comparative tests of NDT methods used for material characteristics of stone*. Praha: ÚTAM AV ČR, 2011
- Major, Š., P. Beneš, D. Vavřík a V. Kocour. Determination of Young modulus using portable device for split test. In: Popovac, M. et al. *Conference Importance of Place – Conference proceedings (CDROM)*. Sarajevo: CICOPBH, 2015, 3, 277–286.
- Major, Š., I. Jandjsek, D. Vavřík a J. Valach. Portable device for indirect assessment of strength in tension of building materials and problem of boundary condition. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, 486, 307–312.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.486.307>
- Major, Š. a D. Vavřík. *Přenosné zařízení pro zjišťování mechanické pevnosti stavebního materiálu*. Užitiný vzor. Číslo vzoru: CZ 28151 U1, Úřad průmyslového vlastnictví, 2015.



**OBRAZEK 30:** Přenosné zkušební zařízení založené na principu Split testu: a) zkušební stroj poháněný krokovým motorem; b) řez zkušebním zařízením – zdvihový mechanismus; c) vložka pro tlakovou zkoušku; d) výměnná vložka určená k realizaci ohybové zkoušky; e) vložka s rádiem pro Split test; e) segmentová čelist pro zkoušení asymetrických vzorků (Major a Vavřík 2015)

Svoboda, L. a kol. *Stavební hmoty*. Praha: Luboš Svoboda, 2013. ISBN 978-80-260-4972-2.

Wang, Q. Z., X. M. Jia, Wang, S. Q. Kou, Z. X. Zhang a P.-A. Lindqvist. The flattened Brazilian disc specimen used for testing elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: analytical and numerical results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2004, 41(2), 245–253.

[https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00093-5](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00093-5)

Yu, Y. a Wang, T. X. (2004). Study on relationship between splitting behavior and elastic modulus of Three Gorges granite. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 2004, 23(19), 3258–3261.

# Měření podpovrchové soudržnosti historických materiálů

Miloš Drdáký

Zkoušení koheze historických povrchů hornin a omítek trpí nedostatkem vhodných nedestruktivních metod. Přitom se jedná o velmi důležitou charakteristiku nezbytnou pro posouzení rozsahu a intenzity degradace povrchu stejně jako posouzení efektivity a kvality konsolidačního zásahu na zchátralém povrchu.

Mělká podpovrchová koheze omítek a hornin může být spolehlivě měřena pomocí lepicí pásky (v anglické terminologii tzv. peeling test nebo Scotch tape test<sup>1</sup>). Metoda byla původně navržena a užívána pro zkoušení soudržnosti nátěrových vrstev s podkladem. Pro tento účel je definována jako *metoda pro hodnocení adheze povrchové úpravy k podkladu. Na přitlačení citlivá lepicí páska je přiložena na povrchovou vrstvu, která je křížem nařezána do obrazce mřížky<sup>2</sup>. Adheze je vyhovující, pokud při odstranění pásky nedošlo k odloučení částí povrchové vrstvy<sup>3</sup>.*

Do oboru restaurování a konzervace byla metoda zavedena pravděpodobně poprvé pro zkoušení kohezní kvality historických materiálů, zejména malt a hornin, P. Morou a G. Torracou (1965). Nicméně po dlouhá léta nebyla aplikace metody podepřena žádnou normou nebo ověřeným návodem k užívání v památkové péči. Byla aplikována bez potřebných znalostí a porozumění, což vedlo k měřením, která nebyla srovnatelná, reprodukovatelná a spolehlivá, v mnoha případech i s nesprávnými výsledky. Proto byl proveden výzkum<sup>4</sup> s cílem stanovit meze pro aplikaci spolehlivého postupu měření a navrhnout standardní protokol pro zkoušení charakteristické soudržnosti křehkých a kvazikřehkých materiálů, hlavně kamene (Drdáký et al. 2012) a malt (Drdáký et al. 2015). V citované publikaci (Drdáký et al. 2012) je i vyčerpávající rešerše k tématu s uvedením řady variantních aplikací, které používali jednotliví autoři.

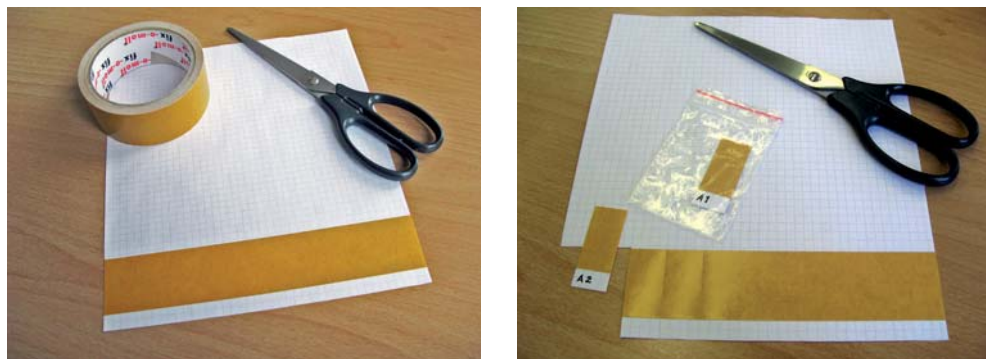
Protokol navržený a používaný v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR odstraňuje především nedostatek nesprávnosti jediného měření, které nestačí pro zjištění skutečné podpovrchové soudržnosti. Jediné měření je zkruseno řadou faktorů a nevypovídá téměř nic o skutečné soudržnosti a zejména o její změně po aplikaci konsolidačního zásahu. Množství

<sup>1</sup> Pozor na záměnu s termínem „tape test“, který má specifický význam v lékařství.

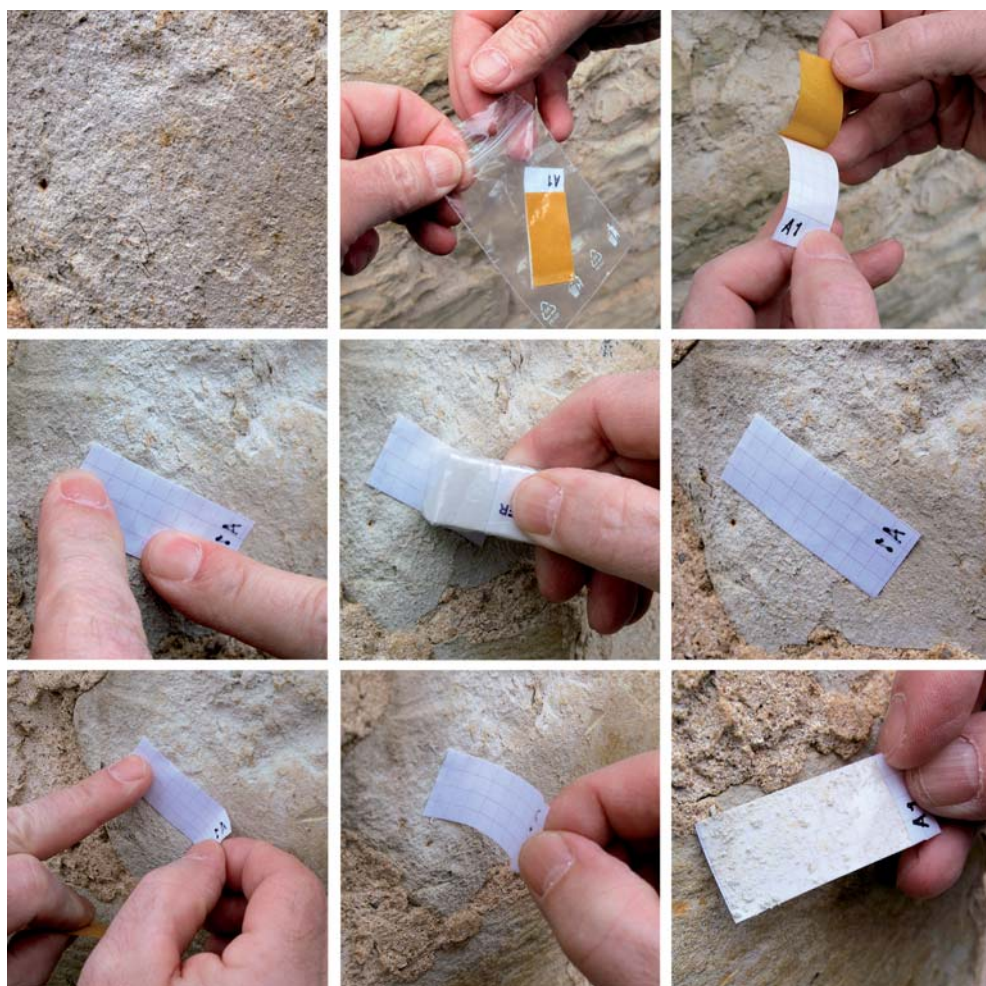
<sup>2</sup> Nařezání se nepoužívá u povrchů bez povrchové vrstvy, např. u kamene a malt.

<sup>3</sup> Definice <http://composite.about.com/library/glossary/s/bldef-s4726.htm> Copyright ©1989 CRC Press LLC. All rights reserved.

<sup>4</sup> SME-cílený společný výzkumný projekt „Stone conservation for refurbishment of buildings“, podpořený grantem No. 213651 v rámci EC 7<sup>th</sup> Framework Programme, koordinovaný Prof. Dr. Geraldem Ziegenbalgem, IBZ Freiberg, Germany.



**OBRÁZEK 31:** Příprava vzorkovacích pásek 20 × 50mm pro měření v terénu (Drdáčký et al. 2012)



**OBRÁZEK 32:** Postup aplikace metody lepicí pásky na opukovou kamennou zeď – jednotlivé kroky bez opětovného pokrytí lepicí vrstvy ochrannou fólií a vložení zpět do plastového sáčku

odloučené hmoty z povrchu je totiž silně ovlivněno charakterem degradace okolí povrchu směrem do hloubky a historií dotýkání se povrchu při konsolidaci či při prostém čištění povrchu ometáním. Každým dotykem se totiž odloučí menší a menší množství materiálu, takže po několika dotycích se dostaneme na úroveň skutečné podpovrchové soudržnosti, což může být chybně interpretováno jako zdánlivý konsolidační efekt. Proto je navrženo aplikovat odlučovací zkoušku lepicí páskou ve sledu opakovaných měření na stejném místě tak dlouho, až se množství odlučované hmoty ustálí nebo kolísá kolem konstantní průměrné hodnoty. Pro dosažení tohoto stavu není v praktické situaci potřeba více než deseti měření, obvykle stačí i méně.

Výběr techniky měření závisí na tom, zda je možno měřit množství odloučené hmoty přímo v terénu nebo jsou vzorkovací pásky převáženy do laboratoře a tam zkoumány a vyhodnocovány. Preferujeme druhý případ, při kterém je ovšem třeba vyřešit problém bezpečného transportu pásky s nalepeným materiálem z terénu do laboratoře. Vlastní měření je možno provádět použitím dvoustranné lepicí pásky, ze které se vyrobí vzorkovače nalepením pásky nechráněnou vrstvou na papírovou podložku a dopravují se v plastovém sáčku. Použití v terénu je popsáno níže. Nebo lze provádět měření pomocí jednostranné lepicí pásky, pak je třeba pro přepravu použitých pásek zajistit přepravní box (viz níže).

Ideální vzorkovač lze připravit z dvoustranné lepicí pásky 40 mm šířky, kterou nalepíme na čtverečkováný papír a následně nastříháme na pásky 10–20 mm široké a 50 mm dlouhé (**obr. 31**). Přesah papíru se použije pro číslování vzorkovačů. Vzorkovače očíslováme a vložíme do plastových uzavíratelných sáčků. Sáček s vzorkovačem zvážíme na laboratorních váhách s citlivostí 0,1 mg a hodnotu zapíšeme do připravené tabulky.

Při použití jednostranné lepicí pásky tato příprava odpadá, neboť pásku stříháme přímo v terénu z cívky po odstranění nepoužitelných dvou kompletních závitů před začátkem série měření v terénu. Pásku z cívky odvineme plynulým tahem bez cukání a pak ustříhneme na potřebnou délku. Zde se používají delší pásky (více než cca 100 mm) kvůli snadnější přepravě do laboratoře.

Pro vlastní měření je vhodné vybrat na zkoumaném povrchu místo bez hrubých vad a nedokonalostí. Povrch by měl být přirozeně suchý (bez vody v kapalně formě) a reprezentující zkoušený materiál, tj. přiměřeně čistý. Měření může být ovlivněno extrémní relativní vlhkostí a teploty, neboť plastová páska i lepidlo jsou obvykle citlivé na tyto podmínky.

V dalším kroku nalepíme pásku na povrch. U vzorkovače z dvojstranné lepicí pásky nejdříve vyjmeme vzorkovač z plastového sáčku, odstraníme ochrannou fólii z lepivé vrstvy a uschováme si ji pro opětovnou adjustaci po sejmutí pásky z povrchu. Při použití jednostranné pásky prostě nalepíme ustříženou pásku na povrch.

Přihladíme pásku prstem nebo měkkou gumou v celofánovém obalu k povrchu.

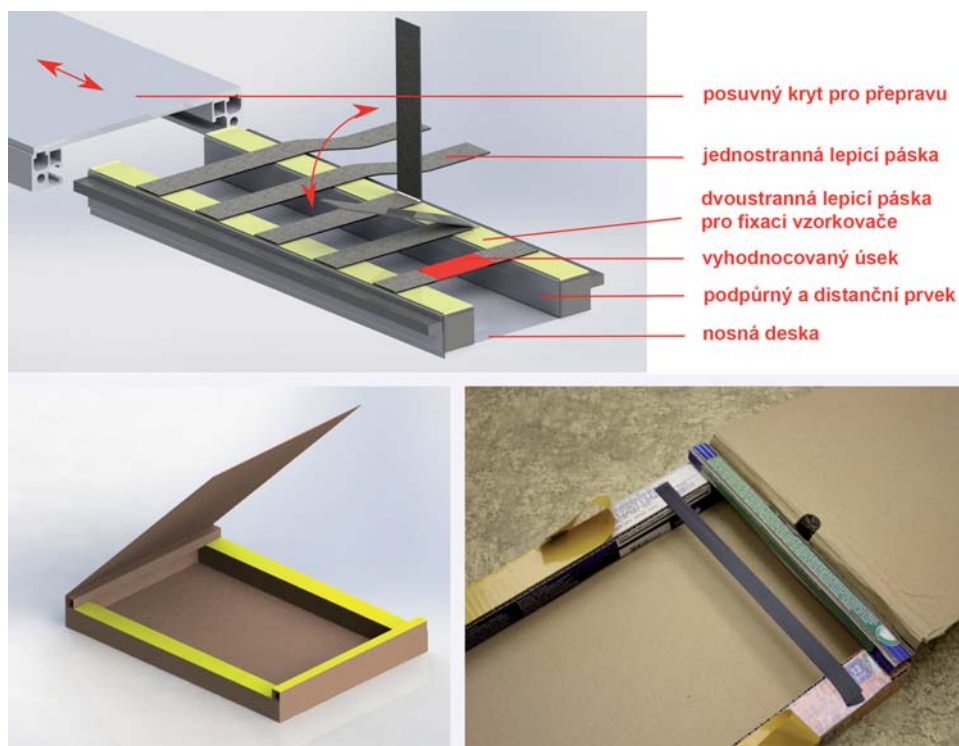
Přibližně po 90 vteřinách po nalepení můžeme pásku odlepit uchopením za volný konec papíru a plynulým tažením (bez cukání) rychlostí cca 10 mm/s a v ideálním sklonu odtažené části pásky kolmo k povrchu.

Nasadíme zpět na lepivou vrstvu s odloučeným materiálem ochrannou fólii, vložíme do plastového sáčku a uzavřeme zip. Nyní je vzorkovač připraven k transportu do laboratoře, kde je pak zvážen. Celý postup je názorně zobrazen na **obr. 32**.

Měření se opakuje desetkrát na stejném místě.

Celá procedura se pak opakuje na dalších místech zkoumaného povrchu. Počet zkoušených míst závisí na kvalitě povrchu a jeho proměnlivosti v celé vyšetřované ploše. Obvykle stačí vyzkoušet soudržnost na třech místech.

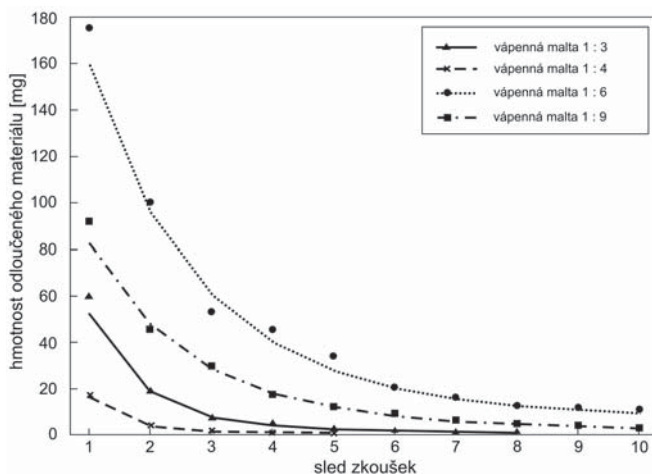




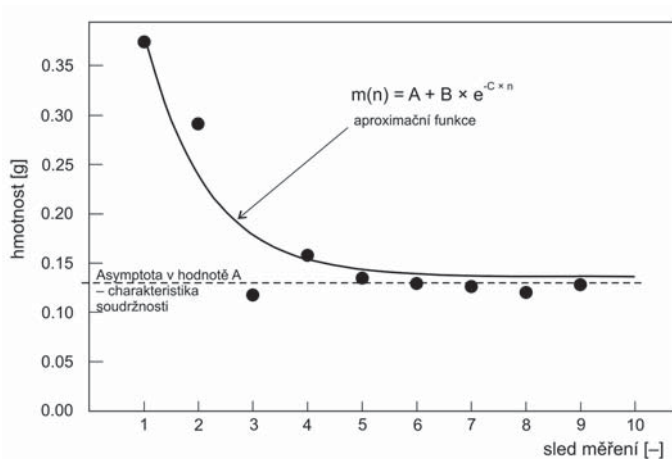
**OBRAZEK 33:** Přepravní box z hliníkových profilů pro jednostranné dlouhé pásky (vlevo nahoře) a cenově výhodnější varianta ze skládané papírové lepenky (dole) – vizualizace (vlevo) a funkční model (vpravo), návrh Tomáš Fíla a Miloš Drdácký (Drdácký a Slížková 2015)

Při použití jednostranné pásky se páska po sejmutí přeloží na polovinu tak, aby lepiivá vrstva s odloučeným materiálem zůstala po přeložení uvnitř a pro přepravu do laboratoře se umístí do speciálního přepravního boxu (**obr. 33**). Z přeložené pásky se pak v laboratoři odstříhne přesná délka požadovaná pro vyhodnocení. Jednostrannou pásku není třeba vážit před aplikací, neboť je vyráběna se zanedbatelnými rozdíly v tloušťce a hmotnosti vzhledem k hmotnosti odloučeného materiálu. Toto zjednodušení podstatně zrychluje měření a činí metodu více přátelskou pro aplikace, než výše uvedené použití dvojstranné pásky. Místo plastové pásky lze použít i průmyslově vyráběné papírové štítky s chráněnou lepicí vrstvou, pokud nehrozí nebezpečí jejich zvlhnutí (Drdácký et al. 2015, Drdácký a Slížková 2015).

V laboratoři jsou vzorky s odloučeným materiálem zváženy. Opakování měření na stejném místě odstraňuje zkreslení výsledků, neboť uvolněné částice na „čerstvém“ povrchu nejsou charakteristické pro podpovrchovou soudržnost. Při opakování měření pozorujeme snižování objemu a hmotnosti odlučovaného materiálu z povrchu, což vypadá jako zpevňování. Stejný problém vzniká, když chceme posuzovat efektivitu konsolidačního zásahu na degradovaných plochách. Po několika opakováních se začne odlučovat téměř konstantní množství materiálu a získáváme data pro hodnocení podpovrchové soudržnosti materiálu. **Obr. 34** ukazuje, že metoda je dostatečně citlivá na to, aby postihla rozdíly v soudržnosti vápenných malt různé kvality a tudíž i různé pevnosti.



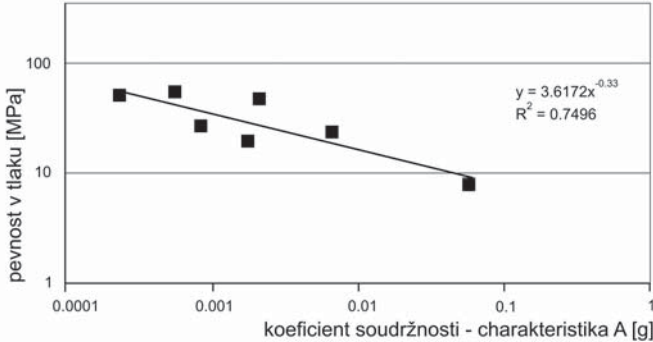
**OBRÁZEK 34:** Hmotnosti odloučeného materiálu při jednotlivých krocích měření na vápenných maltách připravených ze směsí s různými poměry mísení vápna k písku (1:3, 1:4, 1:6 a 1:9)



**OBRÁZEK 35:** Nelineární aproximační model pro sekvenci měření

Pro vyhodnocení měření hmotností byl přijat nelineární aproximační model (**obr. 35**). Je potřebný zejména v případech, kdy měřená data konvergují k jisté pozitivní tedy nenulové hodnotě. Aproximační funkce vyjadřuje vztah mezi množstvím odloučeného materiálu [ $m(n)$ ] v jednom kroku testovací sekvence k počtu sekvencí ( $n$ ). Určená asymptota aproximační funkce je právě charakteristikou podpovrchové soudržnosti. Tato hodnota  $A$  [g] poměrně dobře koreluje s mechanickými charakteristikami materiálu (**obr. 36**).

Jiným měřitelným parametrem může být síla potřebná k odtržení pásku od povrchu. Dříve byl pro měření této hodnoty vyvinut i speciální přístroj italskou firmou SINT. Tento přístup je dosti nepraktický, ale síla, potřebná k odtržení pásky, rovněž dobře koreluje s mechanickými vlastnostmi podkladu.



**OBRAZEK 36:** Korelace charakteristik soudržnosti A s tlakovou pevností různých typů pískovce

Aplikace metody je závislá na zručnosti operátora a jeho osobním přístupu, nicméně, rozptyl výsledků měření prováděných jedním operátorem je zanedbatelný. Kromě vlivu operátora jsou výsledky zatíženy dalšími vlivy. Je třeba si však uvědomit, že tyto vlivy sice mají dopad na vyšší absolutní hodnoty konstanty A, ale v případech srovnávacích měření nemusí být kritické.

Významný vliv na aplikovatelnost metody má homogenita podpovrchové vrstvy. V případech vrstevnaté omítky tvořené pevnou krustou a částečně rozpadlou podpovrchovou vrstvou nelze provést objektivní měření soudržnosti a tudíž ani nelze použít diskutovanou metodu pro posouzení úspěšnosti konsolidačního zásahu, pokud není použito velmi silného zpevnění.

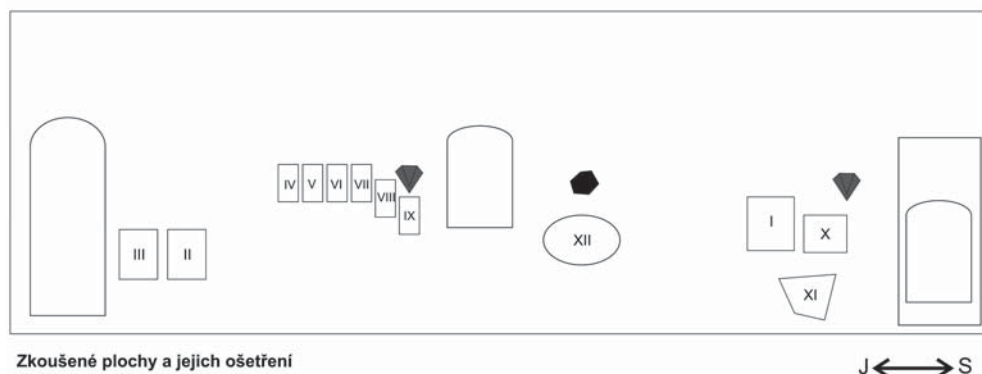
Drsnost povrchu ovlivňuje měření dvěma protichůdnými způsoby a navíc vždy v interakci s kvalitou lepicí vrstvy pásky. Pásky s tenkou lepicí vrstvou lépe přilnou k hladkým rovným plochám než k povrchům s ostrými výčnělky jednotlivých zrn. To může způsobit, že v prvních krocích dojde k odloučení menšího množství materiálu a „otevření“ povrchu pro vyšší odběr v následujících krocích. V takovém případě aproximace rovnicí  $m(n) = A + B \times e^{-Cn}$  není vhodným modelem pro vyhodnocení dat. Nicméně, většina materiálů vykazuje rozumné chování a po dostatečném počtu opakování odlučovací zkoušky mohou být měření vyhodnocena standardním modelem po odstranění rušivých dat. Pásky s tlustší vrstvou lepidla dobře přilnou k vystupujícím zrnům a naopak. Zde je více materiálu uvolněno v prvních krocích sledu měření a opakované testy vyhlazují povrch a uvolňují méně materiálu.

Pro odlučovací testy se obvykle nepředepisují žádné speciální typy pásky z hlediska jejich tuhosti a lepicí vrstvy. Je to dáno tím, že se obvykle provádí pouze relační měření soudržnosti bez snahy nalézt korelační vztahy k pevnostním charakteristikám. Výsledkem zkoušek je odpověď typu zpevněno – nezpevněno, případně kolikrát se zvýšila kohezí konstanta A. Tuhost pásky má také vliv na výsledek, jak je patrné i z **obrázku 37**.

Z výsledků měření bylo zjištěno, že dlouhá páska byla díky své vyšší ohybové tuhosti méně citlivá a ulpívalo na ní méně materiálu než na dvojstranné pásce nalepené na papírové podložce. Výběr pásky je obvykle založen na provedení zkušebního testu a na zkušenosti operátora. Samozřejmě pro relační zkoušky je třeba používat jeden typ pásky nejlépe ze stejné výrobní šarže. Pro dosažení lepších výsledků na hrubých površích jsou vhodnější měkkější pásky s tlustší vrstvou lepidla. Takové pásky byly např. použity při měření konsolidačních účinků na omítkách zříceniny kláštera *Rosa Coeli* v Dolních Kounicích u Brna.



**OBRÁZEK 37:** Dva typy pásek aplikované pro měření na historických omítkách hradu Pernštejna



**OBRÁZEK 38:** Zkoušené plochy západní strany ambitu s těmito konsolidačními zásahy: I – CaLoSiL E25, II – CaLoSiL E25 (s předvlhčením), III – CaLoSiL E25 (jednoduchá aplikace), IV – CaLoSiL E50, V – CaLoSiL IP25, VI – Funcosil 300, VII – Funcosil 500, VIII – Porosil RZ, IX – Porosil ZTS, X – neošetřováno, I – původní románsko/gotická omítka, XII – neošetřovaná plocha (Machačko et al. 2011)

Uvedme praktický příklad použití odlučovacího testu na výše uvedeném klášteře pro posouzení účinků konsolidace středověkých omítek různými nanosuspencemi hydroxidu vápenatého a jejich srovnání s účinky etylsilikátové impregnace (Brysczejn et al. 2010, Machačko et al. 2011). Celkový pohled na zkoušené plochy je vidět na **obr. 38**. Kromě zpevňovaných zkušebních ploch byla měření provedena i na dalších referenčních omítkách, které nebyly při experimentech nijak ošetřovány. Nelze však vyloučit, že byly v minulosti kontaktovány, což může ovlivnit výsledky měření.

Pro zkoušky byly vybrány pásy s relativně tlustou vrstvou lepidla a vysokou adhezní kapacitou, danou v tomto případě výrobcem deklarovanou nominální smykovou únosností úsekem pásy o délce 150 cm a hodnotě zátěže o hmotě 50 kg. Použité vzorkovače měly rozměr 50 × 19 mm<sup>2</sup>. Měření proběhlo typicky desetkrát na stejném místě (výjimečně

6–7× s jiným typem pásky – označené grey). Charakteristické hodnoty A, B, C, které popisují kvalitu podpovrchové soudržnosti, byly vypočteny z těchto měření a jsou uvedeny v následující tabulce.

**TABULKA 1:** Odhadované parametry funkcí nejlépe vystihujících kvalitu soudržnosti

Odlučovací test	Plocha	Odh. parametr A	Odh. parametr B	Odh. parametr C
A red	Ia	0,000	0,160	0,044
C red	II	0,072	0,285	1,684
D red	III	0,136	0,607	0,891
G red	IV	0,042	0,469	9,207
H red	V	0,053	0,038	0,516
F grey	VI	0,070	0,000	3,198
E grey	VII	0,056	0,000	2,524
B red	XII	0,160	0,148	0,400
E2 + F2 grey	XII	0,131	5,097	3,350

Hodnota A je základní charakteristikou mělce podpovrchové soudržnosti – čím je A menší, tím soudržnější je materiál. Význam dalších parametrů je menší a ne tak jednoznačný. B může být chápáno jako míra degradace povrchu a C se vztahuje k hloubce degradace. Pro oba parametry vyšší hodnoty znamenají vyšší stupeň degradace.

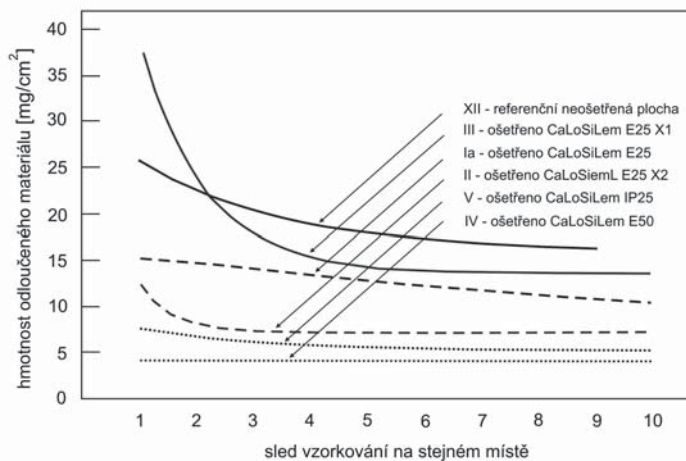
Měřené hodnoty jsou uváděny v množstvích odloučeného materiálu na jednotku plochy. Výsledky jsou ukázány i na ilustrativních **obrázcích 39 a 40**.

Kvalita soudržnosti získaná při odlučovacím testu dává spolehlivé odhady povrchového a mělce podpovrchového zpevnění po aplikaci různých konsolidačních postupů a zobrazuje zde jasné rozdíly mezi různými druhy ošetření povrchu<sup>1</sup>. Výsledky ilustrují citlivost odlučovací metody, pokud je správně aplikována. Samozřejmě vždy je nutné očekávat jistý rozptyl výsledných charakteristik soudržnosti s uvážením toho, že referenční body nejsou v totožných místech, některé plochy mohly být dotýkány před experimenty a uvolněná zrna písku mohla být odstraněna bez ohledu na zpevňovací proceduru<sup>2</sup>.

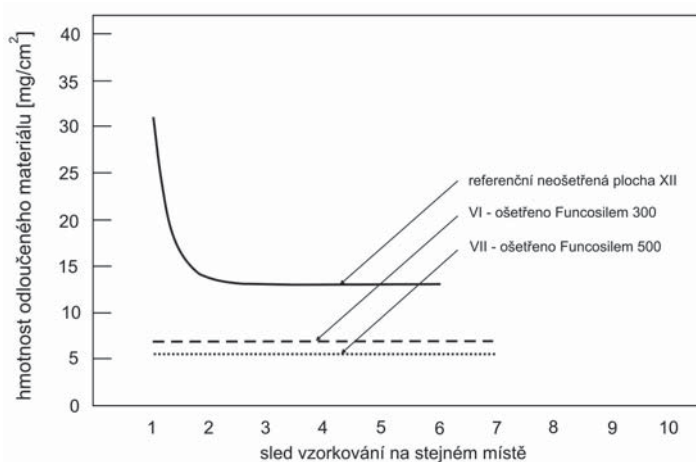
Množství odloučeného materiálu jsou pouze přibližná a nemohou být jednoduše převedena na odhad jiných mechanických charakteristik zkoušených malt. Je však užitečné mít pro srovnání další údaje pro porozumění odhadovaným parametrům naměřeným na jiných omítkách stejnými vzorkovači. Jako příklad uvádíme **obrázek 41**, kde jsou uvedena měření na současné 20 let staré omítce z vápeno-cementové malty. Korelace charakteristiky

<sup>1</sup> Výsledek ukazuje, že vápenná nanosuspenze CaLoSiL E50 [obsahující 50 g/l of Ca(OH)<sub>2</sub> v etylalkoholu] dává podle očekávání nejlepší výsledky, lepší než CaLoSiL IP25 [25 g/l Ca(OH)<sub>2</sub> v iso-propanolu], což je srovnatelné s účinky Funcosilu 300 a 500. Existuje malý rozdíl mezi těmito zpevňovači a CaLoSiLem E25 [25 g/l Ca(OH)<sub>2</sub> v etylalkoholu], který byl aplikován ve třech cyklech – první dva bez předvlhčení a třetí s předvlhčením ethanolem. CaLoSiL E25 jednoduše aplikovaný ve dvou cyklech a při třetím s předvlhčením ethanolem má malý účinek.

<sup>2</sup> Např. porovnání výsledků na plochách II a III ukazuje značný rozdíl, který je obtížně vysvětlitelný. Ostatní měřená data nicméně velmi dobře korespondují s očekávanými účinky.



OBRÁZEK 39: Výsledky jednotlivých sad měření (páska označená red)

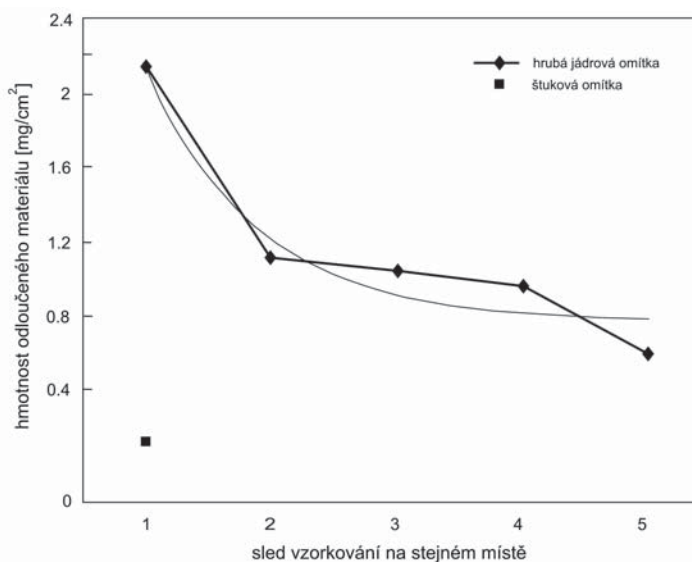


OBRÁZEK 40: Výsledky jednotlivých sad měření (páska označená grey)

soudržnosti A s tlakovou pevností různých typů pískovce byla představena na **obr. 36**, čtenář může nalézt další příklady korelací odlučovacího testu s mechanickými charakteristikami např. v publikacích Drdácý et al. (2012, 2015), Slížková et al. (2013).

Jak již bylo řečeno, kvalita lepicí vrstvy je jedním z nejdůležitějších parametrů, ovlivňujících množství odloučeného materiálu. Problém byl teoreticky diskutován např. v práci Chiche et al. (2005). Tito autoři zdůrazňují, že síla, potřebná k odstranění pásky z homogenního povrchu není konstantní a podporuje standardní požadavek potlačení vlivu fluktuace síly při konvenčním odlučovacím testu povrchových úprav<sup>1</sup> statistickým vyhodnocením výsledků. Tento teoretický závěr vede k požadavku měřit odlučování v několika místech na relativně malé ploše.

<sup>1</sup> ASTM 1999 Standard test method for peel or stripping strength of adhesive bonds, *ASTM Standard 903-98*.



**OBRÁZEK 41:** Odloučený materiál na současné vápeno-cementové omítce po 20 letech účinků povětrnosti

Dále doporučují dodržovat při odtrhávání standardní úhel  $90^\circ$  s působením síly kolmo ke zkoušenému povrchu. Zvýšení úhlu na  $180^\circ$ , což je doporučováno v některé literatuře, může vést k aplikaci větší síly a tudíž k efektivnějšímu odlučování. Je však obtížné dosažitelné v řadě praktických situací.

Rychlost odtrhávání ovlivňuje rovněž dosti významně velikost síly působící odlučování materiálu. Výše zmínění autoři toto zvýšení potvrdili při rychlostech odtrhávání v mezích od  $7 \mu\text{m/s}$  do  $7 \text{mm/s}$  pro různé typy pásky. Je proto třeba zachovávat při testech konstantní rychlost odtrhu.

Všechny tyto poznatky byly využity při návrhu výše uvedené metodiky Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR pro měření podpovrchové soudržnosti historických materiálů.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu 7. RP EK „STONE-CORE“ a projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

Brysczejn, J., M. Drdáký, J. Valach a P. Zíma. *Testing of CaLoSiL treatment effectson historic rendering at Rosa Coeli Monastery in Dolní Kounice*. Research Report –FP7 NMP-STONECORE Project. Praha: ÚTAM AV ČR, 2010, 44.

- Drdácký, M., J. Lesák, K. Niedoba a J. Valach. Peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of mortar and render surfaces. *Materials and Structures*. 2015, 48(6), 1947–1963. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0285-8>.
- Drdácký, M., J. Lesák, S. Rescic, Z. Slížková, P. Tiano a J. Valach. Standardization of peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces. *Materials and Structures*. 2012, 45(4), 505–520. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9778-x>.
- Drdácký, M. a Z. Slížková. In situ peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristic of historic plaster and render surfaces. *Studies in Conservation*. 2014, 60(2), 121–130. <https://doi.org/10.1179/2047058413Y.0000000116>
- Chiche, A., W. Zhang, C. M. Stafford a A. Karim. A new design for high-throughput peel tests: statistical analysis and example. *Measurement Science and Technology*. 2005, 16(1), 183–190. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/16/1/024>
- Machačko, L., B. Kolinkeová, D. Macounová a K. Bayer. A few notes on research and restoration works carried out at the University of Pardubice within the frame of the EU project STONECORE. In: Krüger, M. (ed.). *Cultural heritage preservation. European Workshop on Cultural Heritage Preservation, EWCHP 2011. Proceedings*. Stuttgart: Fraunhofer, 2011, 246-253. ISBN 978-3-8167-8560-6.
- Mora, P. a G. Torraca. Fissativi per dipinti murali. In: *Bollettino Istituto Centrale del Restauro*, Roma: Istituto Superiore per la Conversazione ed il Restauro, 1965, 109–132.
- Slížková, Z., D. Frankeová a M. Drdácký. Strengthening of poor lime mortar with consolidation agents, In: Hughes, J. (ed.). *The 3rd Historic mortars conference*. Glasgow: University of the West of Scotland, 2013. ISBN 978-1-903978-44-3.



# Terénní měření nasákavosti porézních materiálů

Miloš Drdácký, Hana Hasníková, Pavel Zíma

Přírodní kámen, malta nebo omítka jsou typičtí představitelé porézních stavebních materiálů. Kámen byl v minulosti hojně využíván pro svou trvanlivost především ke stavbě významných monumentů nebo důležitých užitných konstrukcí, kterými jsou katedrály či mosty, ale také na drobnějších uměleckých předmětech – sochách či morových sloupech, na nichž se zachoval až do současnosti. Většina těchto objektů je předmětem památkové ochrany a k jejich správné údržbě je potřeba znát kromě mechanického chování také další vlastnosti.

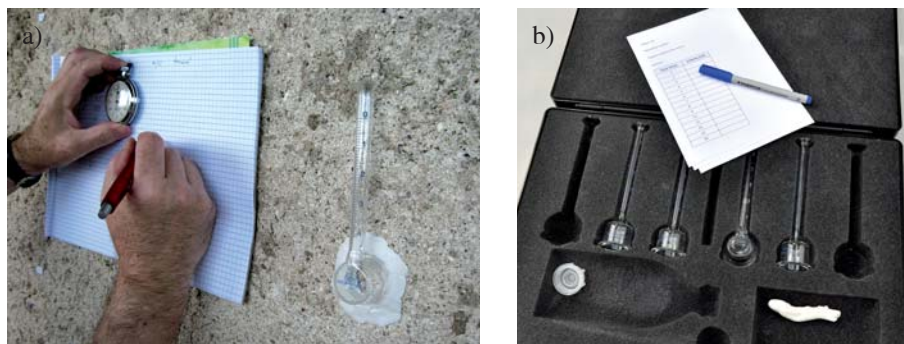
Kvalita povrchu a schopnost materiálů absorbovat tekutiny reprezentují některé z důležitých vlastností porézních materiálů. Zkoušení propustnosti povrchu a nasákavosti materiálů patří mezi základní a nepominutelné techniky v praxi restaurátora. V posledních desetiletích byla k tomuto účelu hojně využívána tzv. Karstenova trubice. Její použití je jednoduché, ovšem nese s sebou řadu komplikací. Proto byl v ÚTAM AV ČR, v. v. i., vyvinut pokročilejší systém, který nevýhody měření Karstenovou trubicí odstraňuje. Zařízení, tzv. mikrotrubice, umožňuje kontinuální měření s digitálním záznamem dat a jejich vyšší dosažitelnou přesnost.

## Přehled starších metod měření nasákavosti

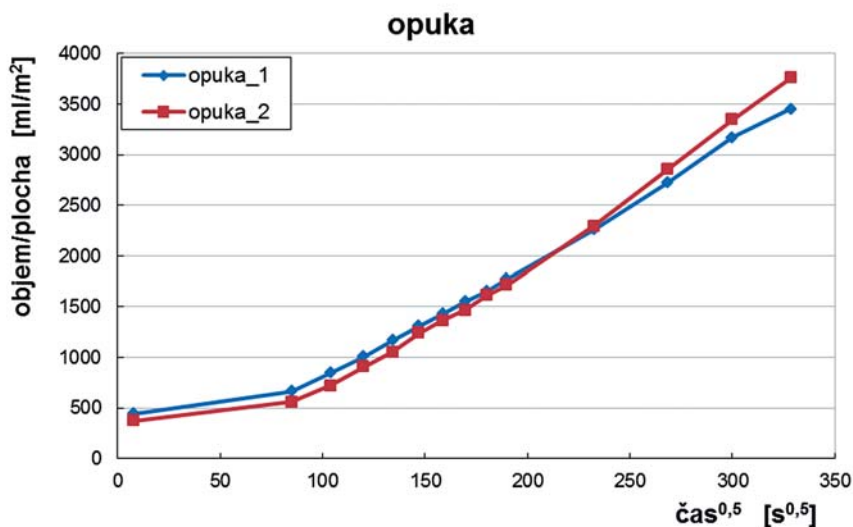
Karstenova trubice byla navržena profesorem Karstenem přibližně před 40 lety pro terénní zkoušení propustnosti fasádních povrchů pro větrem hnaný déšť. Později se stala standardním zařízením pro vyšetřování nasákavosti přírodního kamene. Nyní je užívána i pro odhad změn povrchových charakteristik historických materiálů v důsledku jejich konsolidace nebo hydrofobní úpravy, včetně posuzování efektivnosti či trvalosti těchto úprav.

Klasická Karstenova trubice je skleněná a skládá se z výtokové kruhové části o průměru 25 mm, která zajišťuje kontakt kapaliny s měřeným povrchem pro jeho smáčení a penetraci vody nebo impregnačního prostředku dovnitř hmoty. Na výtokovou část navazuje otevřená skleněná trubice s kalibrovanou stupnicí (4 ml) pro měření objemu kapaliny vsakované do materiálu, viz **obr. 42a**. Trubice je na povrch zkoumaného materiálu připevněna pomocí fixačního tmelu a odečet absorbovaného množství se provádí v periodických časových intervalech. Trubice a její užívání byly standardizovány několika institucemi, např. RILEM, ASTM a řadou národních normalizačních institucí.

Měření probíhá při nízkém tlaku tlačícím kapalinu do materiálu, může být realizováno jak v laboratoři, tak v terénu. Trubice je dostupná ve dvou variantách, viz **obr. 42b**. První je určena pro měření na vodorovném povrchu a měří svislé pronikání kapaliny do materiálu – osy



OBRÁZEK 42: a) Karstenova trubice při terénním měření; b) typy Karstenovy trubice



OBRÁZEK 43: Vsakovací diagram – sediment opuka

výtokové části a měřicí části jsou totožné a svislé. Druhý typ je určen pro měření na svislých površích a sleduje vodorovný průnik kapaliny do materiálu nebo odolnost povrchu proti vnikání dešťové vody hnané větrem. Trubice má tvar L s osou vodorovně situované výtokové části kolmou na svislou osu měřicí části. Zkušební trubice se upevňuje k povrchu proužkem plastického fixačního tmelu vloženého mezi plochý okraj kruhového výtoku a měřený povrch. Adhese se dosahuje prostým přitlačením trubice. Voda se do trubice nalévá otevřenou horní částí tak dlouho, dokud hladina nedosáhne nulové rýsky stupnice. Množství vsáknuté vody se pak přímo odečítá na stupnici trubice. Potřebná doba k provedení zkoušky je závislá na porositě zkoumaného materiálu. Obecně se užitečná data získávají v intervalech po 5, 10, 15, 20, 30 a 60 minutách. Výsledky zkoušky se obvykle zobrazují jako vsakovací diagram s objemy vsáknuté vody plochou určité velikosti vztažené k času, příklad je na obr. 43.

Měření Karstenovou trubicí je jednoduché, obnáší však řadu obtíží. Na nerovném hrubém povrchu jsou problémy s těsněním výtoku trubice, těžkou skleněnou trubicí je obtížné upevnit na svislé a především nakloněné plochy, ve většině případů musí obsluhovat trubicí dva operátoři - jeden sleduje pohyb hladiny v trubicí a čas, druhý zapisuje měřené hodnoty - těsnící tmel je mastný a znečišťuje historický povrch.

Jak prokázal Hendricx (2013), metoda funguje dobře, když je kontakt mezi Karstenovou trubicí a povrchem materiálu bezchybný. V případě nerovného povrchu nebo nesoudržného materiálu je však měření problematické. Přestože zkušební přístroj vypadá jednoduše, geometrické okrajové podmínky jsou složité a v mnoha případech vedou k nepřesným nebo nepoužitelným výsledkům (Pleyers a Sasse 1999). Je to způsobeno rostoucím penetračním objemem kolem kontaktního kruhového výtoku na povrchu. Pro dosažení přesnějších výsledků se přidává k válcovému objemu pod výtokem ještě čtvrtina anuloidu s poloměrem rovným hloubce hypotetického válce penetrované kapaliny (Wendler a Snethlage 1991). Byl vyvinut speciální software pro odpovídající výpočty za předpokladu ideálních geometrických podmínek a homogenního materiálu (Rapp et al. 1997). Problémy nastávají pro nehomogenní porézní systémy s trhlinami, poškozenými oblastmi, vodou nasycenými oblastmi nebo jinými heterogenitami. Předpokládá se, že 50 % terénních měření nemůže být správně vyhodnoceno pomocí ideálního matematického modelu, proto Pleyers (1997) zavedl a patentoval jinou metodiku.

Kapilární vlastnosti porézních materiálů mohou být měřeny i dalšími modifikovanými nástroji a metodami. Jednu z nich představuje tzv. Mirowského trubice ve tvaru uzavřené skleněné zahnuté trubice („lulky“) s objemem 10 ml, která se ukázala vhodnější pro měření *in situ*. Výtok této trubice je opatřen porézní houbou, která zprostředkuje rovnoměrný transport vody do zkoušeného materiálu. Plocha penetrace je menší než u klasické Karstenovy nebo RILEM trubice. Proces záznamu dat je obdobný jako u Karstenovy trubice.

Lehmann (2004) zavedl ve své diplomové práci vedené profesorem Heinzem Leitnerem a Christophem Hermem podstatnou inovaci. Navrhl a vyzkoušel použití stupnicí opatřené skleněné kapiláry s výtokem o průměru 9 mm, který byl vyplněn cigaretovým papírovým filtrem sloužícím jako kontaktní materiál. Inovaci si přímo vyžádali restaurátoři, aby se zamezilo znečištění povrchů fresek zbytky těsnících tmelů nebo lepidel použitých k upevnění skleněných trubíc. Mädebach (2008) ve své diplomové práci vedené restaurátorem Thomasem Schmidtem a profesorem Christophem Hermem metodu dále rozvinul. Použil skleněnou kapiláru o objemu 120  $\mu$ l se stupnicí po 1  $\mu$ l při kontaktní ploše výtoku o velikosti 50 mm<sup>2</sup>. Výtoková hubice byla spojena s kapilárou ohebnou hadičkou, což umožnilo měření na skloněných plochách kleneb, případně na stropech.

Další z metod, které používají pro měření nasákavosti kontaktní médium, je tzv. sponge method („houbičková metoda“). Má mnoho modifikací podle typu použité houbičky, ale základní myšlenkou je vážení vlhké houbičky před a po měření, aby se zjistilo množství absorbované vody za určitý čas, po který je houbička v kontaktu s materiálem. Vandevoorde et al. (2011) zmiňují některé nevýhody, jako je potřeba perfektně uzavíratelné krabičky pro přepravu houbičky z terénu do laboratoře nebo přítomnost dostatečně citlivých vah při měření *in situ*.

## Mikrotrubice ÚTAM AV ČR

V ÚTAM AV ČR, v. v. i., byl vyvinut další přístroj motivovaný snahou zpřesnit, zrychlit a ulehčit měření nasákavosti v terénu. Měřič nasákavosti s mikrotrubicí je zařízení používající malé množství vody, která se vsakuje do vyšetřovaného povrchu přes specifický kontaktní materiál o malé styčné ploše. Proto je zařízení šetrné k historickému objektu, na kterém se měření provádí. Konstrukčním provedením je přístroj určen pro měření *in situ* na těžko přístupných místech a tvarově složitých plochách. Jeho předností je možnost rychlého průzkumu stavu historických povrchů změřením velkého množství bodů.

Klíčovým problémem při vývoji zařízení je měření a záznam množství vsakované vody za časovou jednotku pro širokou škálu materiálů s různou rychlostí vsakování. Nakonec vznikla laboratorní a terénní varianta přístroje.

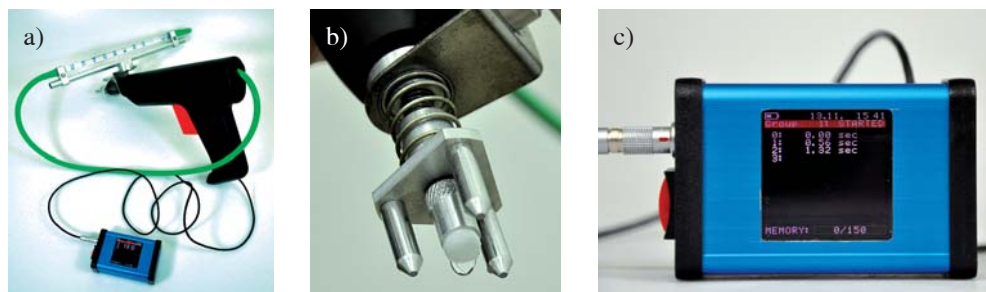
### *Varianta pro terénní měření*

Pro terénní měření byla vyvinuta varianta přenosné mikrotrubice s digitálním záznamem měřených dat, viz **obr. 44a**. Během vývoje byla snaha použít poslední publikované poznatky a vyhnout se nevýhodám, které pozorujeme u Karstenovy trubice, např. znečištění fixačním tmelem v okolí kontaktu po ukončení měření nebo nemožnost umístit těžkou skleněnou trubici na vertikální plochy. K obsluze nového poloautomatického zařízení navíc stačí pouze jeden operátor držící plastové tělo přístroje, které je velmi lehké.

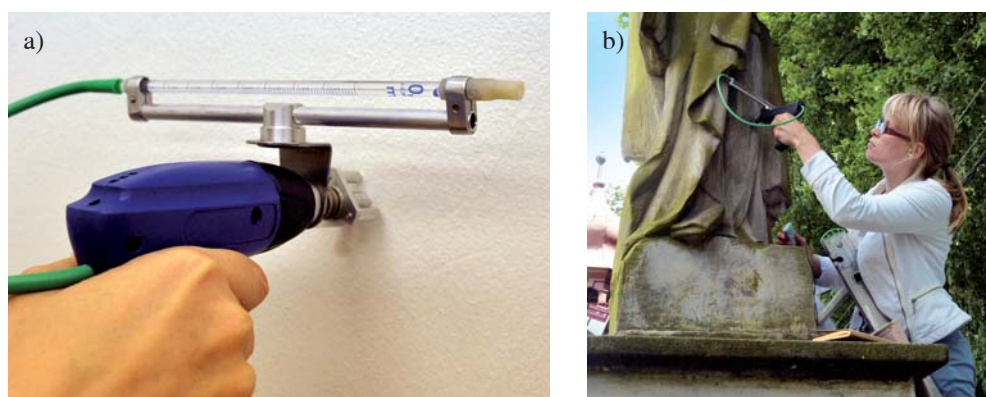
Skleněná mikrotrubice se stupnicí a objemem 0,1 ml (dílký stupnice odpovídají 0,01 ml) je přichycená pomocí magnetu ke kovové otočné desce na těle plastové pistole, jejíž spoušť je změněna v mikrospínač. Tím operátor kontroluje záznam dat do paměti. Kovová destička, na kterou je umístěn magnet s mikrotrubicí, se může otáčet okolo hlavní tak, aby poloha vyhovovala aktuálně měřenému místu, tj. lze s její pomocí měřit i nakloněné plochy a dokonce stropy. Hlaveň pistole s průměrem 8 mm je vyplněna papírovými cigaretovými filtry, které zajišťují rovnoměrnou distribuci vody k povrchu materiálu, a je obklopena třemi kovovými hroty zajišťujícími její stabilitu během měření, detailně na **obr. 44b**. Z mikrotrubice je voda do hlavní vedena ohebnou plastovou hadičkou, jejíž délka umožňuje nastavení požadované polohy mikrotrubice.

Paměť se ukrývá v externí kovové krabičce, která je s tělem pistole spojena dostatečně dlouhým kabelem. Je vybavena baterií, dobíjenou při každém připojení k počítači přes USB rozhraní, a druhým mikrospínačem, který lze použít alternativně místo spouště pistole. Paměť zaznamenává čas a je schopná uložit 150 měřených bodů; data jsou později exportována ve formě např. *.xls* souboru. Na displeji se zobrazují aktuálně měřené hodnoty, obsazená kapacita paměti a stav baterie, viz **obr. 44c**.

Samotné měření nasákavosti začíná v momentě, kdy se cigaretový filtr dostane do kontaktu se zkoumaným materiálem – poprvé se zmáčkne spoušť. Poté pokaždé, když hladina v mikrotrubicí mine dílek stupnice, je spoušť stisknuta znovu. Přístroj zaznamenává pouze čas, tj. rozdíl dvou měření udává, jak rychle byl absorbován objem 0,01 ml. Malý průměr kontaktní plochy umožňuje měřit rozmanitější druhy povrchů než Karstenova trubice. Měření není omezeno výskytem trhlin, kterým se lze jednoduše vyhnout, a v materiálu lze přímo testovat i přítomné heterogenity. Měření je lokální, proto je nutné pro celkové korektní zhodnocení provést dostatečně širokou sadu měření, jež je vhodné podrobně dokumentovat.



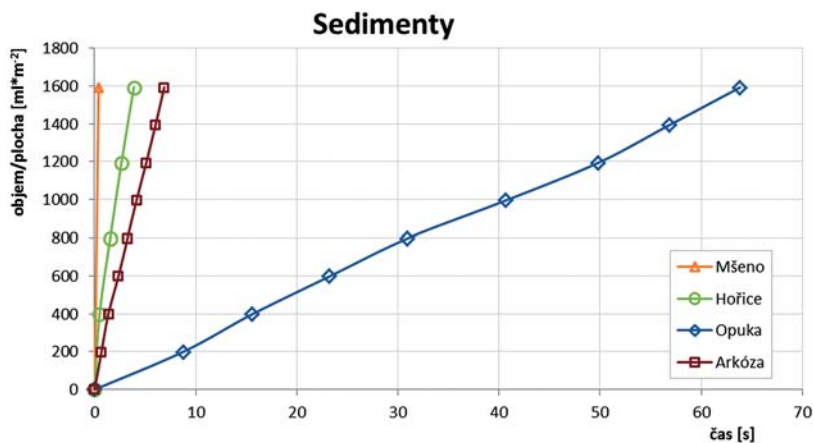
**OBRÁZEK 44:** a) plastová pistole s mikrotrubicí a připojené záznamové zařízení; b) hlaveň s třemi opěrnými hroty naplněná cigaretovým filtrem; c) kovová krabička chránící paměť s uloženými daty



**OBRÁZEK 45:** a) měření na ideálním povrchu; b) socha anděla posledního soudu v Pomezí

Při poměrně standardním měření na ideálně rovném, soudržném, homogenním povrchu bez trhlin (**obr. 45a**) stačí fotografie a údaje o rastru sítě měřicích bodů. Většina zkoušek se však týká netypických povrchů, pro které byla mikrotrubice vyvíjena, jako jsou těžko přístupná místa, tvarově různorodá, místy biologicky znečištěná (**obr. 45b**). V takovém případě je pro správnou interpretaci výsledků důležité podrobné zaznamenání měřených bodů. Vyšší rychlost absorpce u jednoho ze sady měření může být způsobena skrytou trhlinou nebo lokální přítomností větších pórů, zvláště u heterogenních materiálů. Záznam může pomoci odhalit oblasti, na kterých nebyly/byly použity hydrofobizační nebo konsolidační prostředky, přestože dokumentace restaurátorského zásahu uvádí opak.

Každý materiál nasáká různou rychlostí, což samozřejmě ovlivňuje i průběh jednotlivých měření. Někdy je možné zachytit pouze první a poslední bod stupnice na mikrotrubicí, když jí hladina proběhne velmi rychle, a je nutné toto zohlednit při zpracování výsledků. V druhé extrémní situaci, pro téměř nenasákavý materiál, je možné měřit i menší objem absorbované kapaliny. **Obr. 46** ukazuje, jak se mohou lišit výsledky na jednotlivých materiálech. Absorpční vlastnosti velmi dobře korelují s velikostí částic a pórovitostí. Všechny testované přírodní kameny jsou sedimenty vyskytující se v Čechách a velmi často používané v historických konstrukcích; mají různou pórovitost a velikost zrn. Všechny absorbovaly shodné

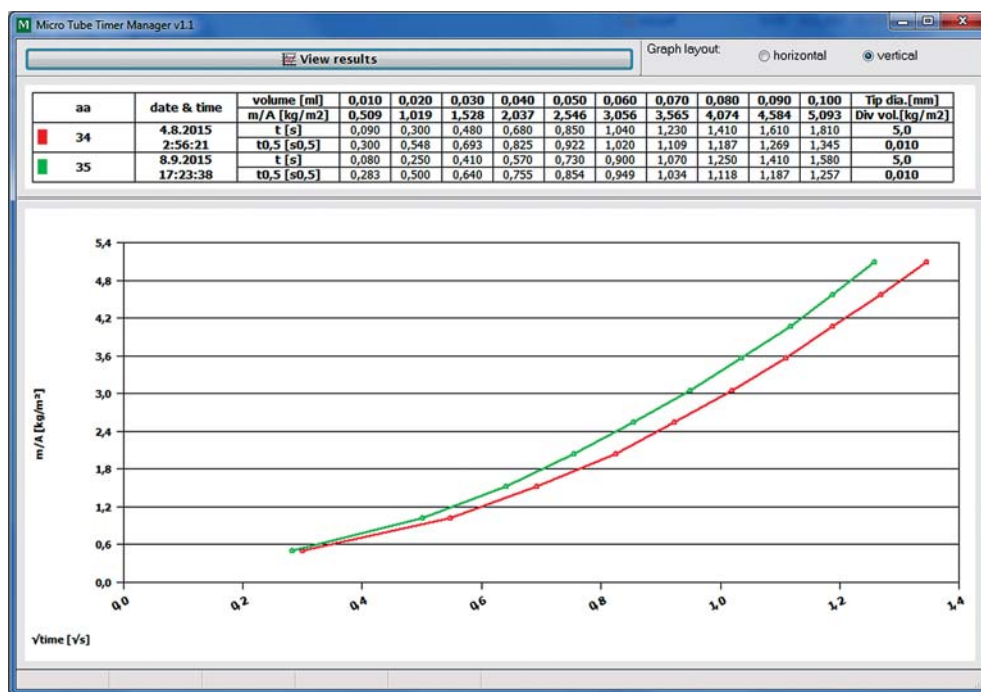


**OBRAZEK 46:** Diagram znázorňující grafické vyhodnocení nasákavosti různých sedimentárních hornin



**OBRAZEK 47:** Pískovce ze Mšena (nahore vlevo) a z Hořic (nahore vpravo), opuka (dole vlevo) a arkóza (dole vpravo)

množství vody, 0,08 ml, rozdíl je však v rychlosti absorpce. Dva běžné pískovce, těžené v Hořicích a Mšeném, nasákají vodu tak rychle, že je nemožné v mikrotrubicích zachytit přechod hladiny vody okolo každého dílku stupnice. Arkóza, sediment s největšími zrny a pórovitostí okolo 21 %, je ideálním materiálem pro tento typ měření – lze zachytit každý krok.



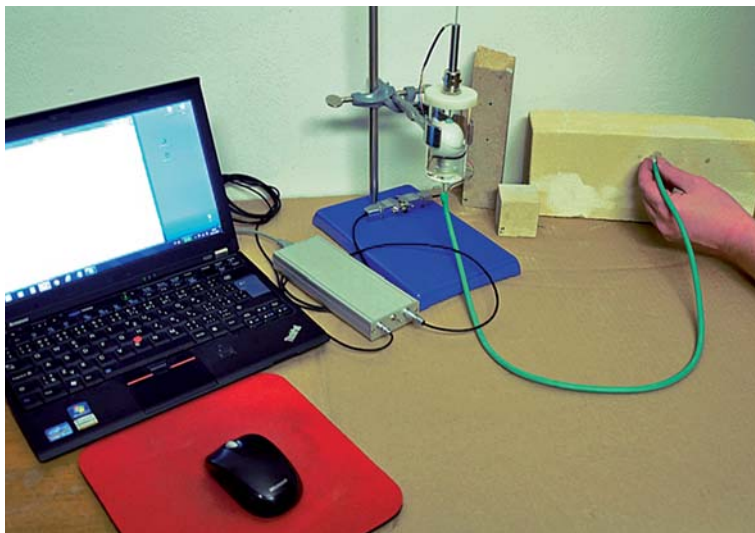
OBRÁZEK 48: Vyhodnocovací software pro měření pomocí mikrotrubice

Naopak opuka je materiál s velikostí zrn na hranici jílu a s průměrnou velikostí póru 0,22  $\mu\text{m}$ , a proto je i absorpce vody pomalá. Makrostruktura všech sedimentů je patrná na **obr. 47**.

Data z měřiče lze přenést do počítače připojením přes USB rozhraní a pomocí aplikačního programu „Micro Tube Timer Manager“ je rychle zpracovat do tabulek a dále do požadovaných grafů (viz **obr. 48**).

### **Varianty pro laboratorní měření**

Zařízení se skládá z kalibrované nádržky na kapalinu, která je vybavena plovákem určujícím výšku hladiny. Zdola je k nádržce napojena pružná hadička, na jejímž konci je výtoková oblast definovaná kovovým kroužkem s průměrem 8 mm. Do něj se opět vkládá jako kontaktní médium pro rovnoměrný přechod kapaliny do materiálu papírový cigaretový filtr (**obr. 49**). Kontaktní plocha je stejná jako v případě přenosné varianty mikrotrubice. Měření objemu absorbované vody je založeno na registraci pohybu plováku v nádržce. Snímač polohy je přes pětižilový kablík spojen s elektronickou jednotkou, která napájí snímač a vyhodnocuje jeho výstupní signál. Převádí jej na digitální hodnotu polohy plováku. Přes USB rozhraní je do počítače přenášán v reálném čase údaj o pohybu plováku a přesném čase v okamžiku měření. Díky uživatelskému programu běžícímu na připojeném počítači je možné sledovat zaznamenaná data - čas od začátku měření a aktuální polohu snímače. Výhodou zařízení je také možnost připojení výtokové hubice o různé velikosti, možnost připojení přídatné nádoby pro větší objemy vsakované tekutiny a případně možnost regulace tlaku podporujícího penetraci.



OBRÁZEK 49: Laboratorní varianta přístroje pro měření nasákavosti materiálu

### *Metodika měření*

Výsledky měření s mikrotrubicí jsou ovlivněny prací operátora zařízení. Správné zacházení s prototypem přenosného měřiče nasákavosti s mikrotrubicí vyžaduje pečlivou práci a trochu zručnosti, kterou však lze získat krátkým tréninkem. Uživatel musí zabezpečit dobrý kontakt cigaretového filtru s měřeným materiálem, což nemusí být na nerovných površích snadné. Dále je potřeba pozorně sledovat pohyb hladiny v mikrotrubicí a rychle reagovat při záznamu. Při přípravě měření je potřeba zajistit, aby se při naplňování mikrotrubice vodou odstranily všechny bubliny vzduchu a cigaretový filtr přesně zapadl do kovové objímky.

Drdáček et al. (2012) určili chybu metody na základě opakovaného měření vzorků homogenních materiálů – keramiky a hořického pískovce. Výsledky statistického vyhodnocení byly úspěšně srovnány se standardizovanými zkouškami měření nasákavosti vzlínavostí (ČSN EN 1925) a publikovanými výsledky jiných badatelů.

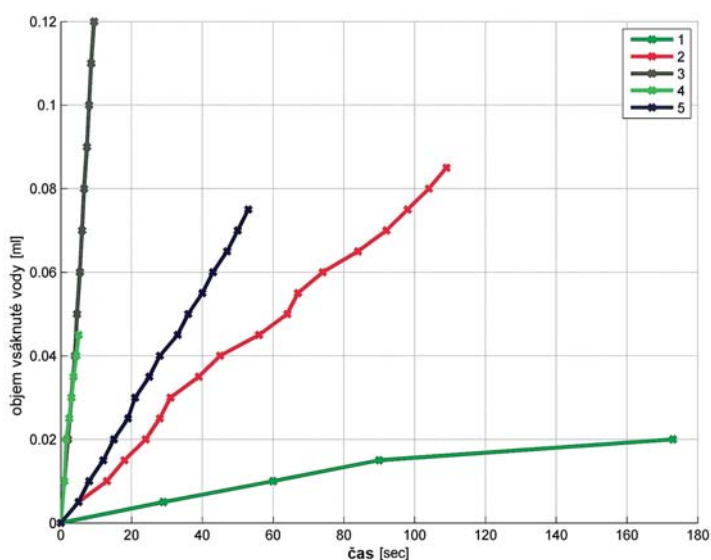
### *Citlivost měření*

Rychlost vsakování kapaliny do materiálu je citlivým indikátorem jeho porosity, pokud měříme na místech bez větších poruch, zejména trhlin. Nicméně i stav degradace lze měřením zachytit, jak ukazuje **obr. 50** z měření na opukové zdi Strahovského kláštera v Praze.

Metoda je i dostatečně citlivá na kontrolu efektivnosti konsolidace porézních materiálů různými typy konsolidačních látek. **Obrázek 51** představuje měření na historických maltách a omítkách zříceniny kláštera Porta Coeli, kde byla testována účinnost aplikace nanovápna - suspenze nanočástic hydroxidu vápenatého v alkoholech. Obrázek je možno porovnat s výsledky odlučovací metody na **obr. 39** a **40**.

Z **obrázku 51** je vidět, že impregnace nanovápnem příliš nemění prostupnost materiálu pro kapalnou vodu. Je však třeba uvážit, že u vlivu etylsilikátu se projevuje i hydrofobní účinek aplikace (Drdáček a Slížková 2013).

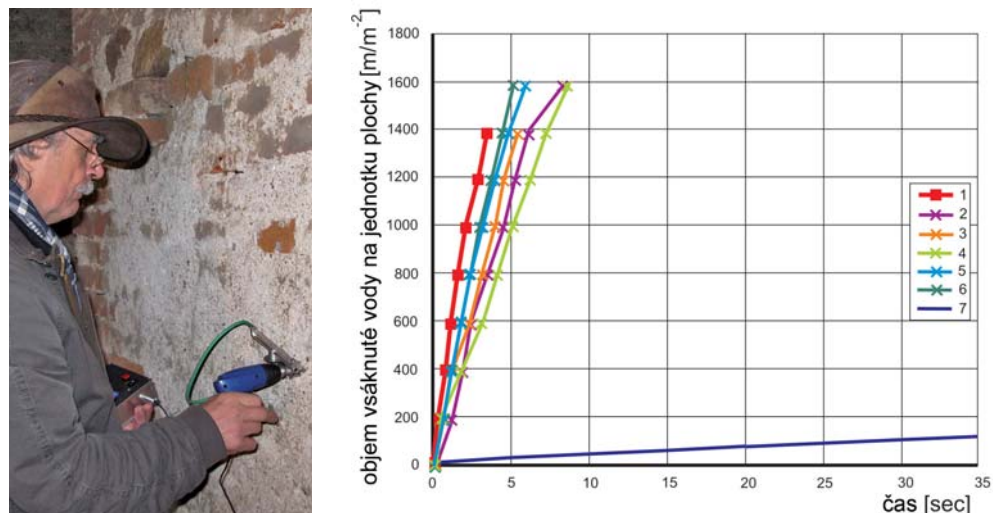




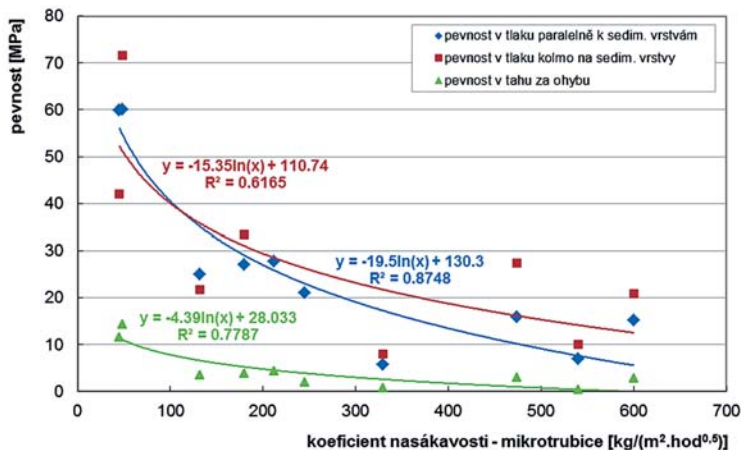
**OBRAZEK 50:** Rychlosti vsakování vody do různě zvětralé opuky. Měřená místa jsou na fotografii označena čísly, která odpovídají číslům grafů: 1 – zdravý kámen; 2 – lehce zvětralý kámen; 3 a 4 – silně zvětralý kámen s prasklinami; 5 – identický kámen jako ad 1, ale s trhlinami

### ***Korelace s dalšími materiálovými charakteristikami***

Měření rychlosti vsakování je ovlivněno porozitou, která velmi dobře koreluje s mechanickými vlastnostmi porézních materiálů. Lze proto očekávat, že i měření rychlosti vsakování bude s mechanickými vlastnostmi, zejména pevnostmi, korelovat. **Obr. 52** ukazuje pozitivní výsledky a podporuje výše uvedenou hypotézu. Pevnosti je tedy možné hrubě odhadovat i na základě měření rychlosti vsakování. Ta je v grafu reprezentována koeficientem nasákavosti – množstvím vody absorbované zkoušeným vzorkem přes smáčenou plochu za určitý časový

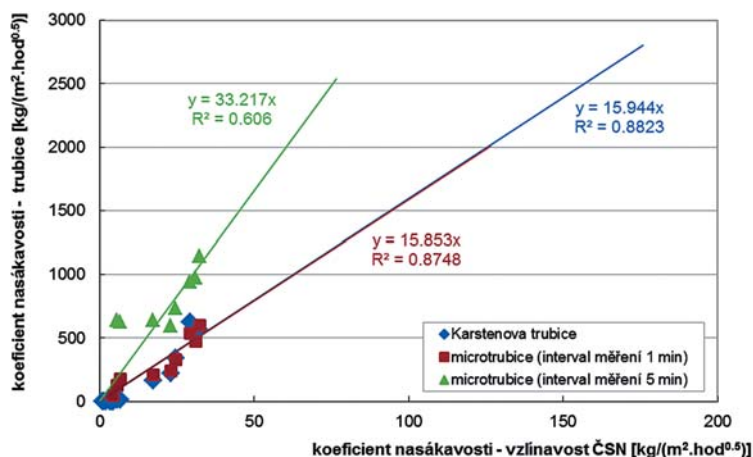


**OBRÁZEK 51:** Rychlosti vsakování vody do omítky po impregnaci různými prostředky: 1 – neošetřovaný materiál; 2, 3 a 4 – omítka ošetřená nanosolem CaLoSiL E25; 5 – omítka ošetřená nanosolem CaLoSiL E50; 6 – omítka ošetřená nanosolem CaLoSiL Ip25; 7 – omítka ošetřená etylsilikátem Funcosil 500



**OBRÁZEK 52:** Korelace koeficientu nasákavosti změřeného mikrotrubicí s pevností v tahu za ohybu a tlakovými pevnostmi různých hornin (převážně sedimentů – pískovců a vápenců)

interval  $[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{hod}^{0.5}]$  – který je definován normou ISO 15148:2002. Jeho pomocí je možné srovnávat různé metody měření nasákavosti (viz **obr. 53**). Zkoušenými vzorky byly opět sedimentární horniny vyskytující se v historických konstrukcích v našem regionu, několik druhů pískovců a vápenců. Srovnávanými metodami bylo měření nasákavosti vztlínavostí, které je standardizováno národní normou (ČSN EN 1925), měření pomocí Karstenovy trubice a mikrotrubice (v obou variantách). Výpočet koeficientu nasákavosti je vztažen k časovému úseku měření, pro mikrotrubici byly určeny dva – interval 1 a 5 minut (Hasníková a Zíma 2012).



OBRÁZEK 53: Korelace koeficientu nasákavosti několika metod měření nasákavosti (měřeny byly převážně sedimenty – pískovce a vápence)

### Další vývoj

Obě výše uvedené varianty přístroje již byly Úřadem průmyslového vlastnictví zapsány jako užité vzory – Laboratorní přístroj pro měření nasákavosti materiálu a Přenosný měřič nasákavosti (pracovní název Měřič nasákavosti s mikrotrubicí). V současné době (listopad 2015) probíhá konečná fáze patentového řízení na vývojově poslední technické řešení přenosného měřiče nasákavosti s elektronickým automatickým odečtem množství vsákané vody. Tato varianta umožňuje oproti dosud používanému typu automatický záznam dat, který eliminuje chybu operátora, a dále zpřesňuje výsledky měření. Finální prototyp přístroje je v současné době používán k vytvoření databáze referenčních vzorků materiálů používaných na historických objektech a v budoucnu bude následovat publikace certifikované metodiky měření prezentovanými přístroji.

Mikrotrubice pomáhá restaurátorům zhodnotit kvalitu porézních materiálů a je výhodná také ke srovnávacím měřením před a po aplikaci hydrofobizačních nebo konsolidačních prostředků. Lze měřit velké množství bodů, a nasákavost tak může být detailně zmapována v rámci celého objektu. Přínos přenosného zařízení je v jeho všestrannosti a jednoduchosti, jejichž výsledkem jsou nízké provozní náklady.

Na webových stránkách [www.arcchip.cz/meab](http://www.arcchip.cz/meab) je zveřejněn a uživatelům přístroje poskytnut ke stažení aplikační software na automatické zpracování naměřených dat „MTT Manager“.

### Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu DF11P01OVV001 programu NAKI MKČR „Diagnostika poškození a životnosti objektů kulturního dědictví“ a projektu 7. RP EK „STONECORE“.

## Použitá literatura

- Drdácký, M., H. Hasníková, J. Lesák a P. Zíma. Innovated water uptake measurements on historic stone surfaces. In: *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. New York: Columbia University, 2012.
- Drdácký, M. a Z. Slížková. Enhanced affordable methods for assessing material characteristics and consolidation effects on stone and mortar. *Journal of Geophysics and Engineering*. 2013, 10(6), 1–6. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/10/6/064005>
- Hasníková, H. a P. Zíma. Comparative testing of natural stones used as a building material. In: Jiroušek, O. a D. Kytýř (eds.). *Experimental Methods and Numerical Simulation in Engineering Sciences*. Praha: Czech Technical University, Faculty of Transportation Sciences, 2012, 11–14. ISBN 978-80-01-05062-0.
- Hendrickx, R. Using the Karsten tube to estimate water transport parameters of porous building materials. *Material and Structures*. 2013, 46(8), 1309–1320. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9975-2>
- Lehmann, M. *Die Gewölbemalereien in der Krypta der Stiftskirche St. Servatius in Quedlinburg*. Thesis. Dresden: Hochschule für Bildende Künste, 2004, 33–34.
- Mädebach, J. Privátní komunikace s prof. Hermem, 2008. Pleyers, G. *Verfahren und Vorrichtung zur Prüfung der Flüssigkeitsaufnahme poröser Baustoffe*. German Patent: 197 48 777.7, 1997.
- Pleyers, G. a H. R. Sasse. Non-destructive determination of the penetration depth of impregnation materials. In: Lauren B. Sickles-Taves (ed.). *The use of and need for preservation standards in architectural conservation*. West Cornshohocken (PA): ASTM, 1999, 90–100. ISBN 0-8031-2606-9.
- Rapp, K., E. Wendler a R. Snethlage. Zerstörungsfreie Messung der Wasseraufnahme– Verbessertes Auswerteverfahren für die Messmethode nach Karsten. *Berichte der Deutschen Mineralogischen Gesellschaft. Beihefte zum European Journal of Mineralogy*. 1997, 9(1), 288.
- Vandevoorde, D., V. Cnudde, J. Dewanckele, M. N. Boone a E. Verhaeven. Contact-Sponge Method: Performance compared with capillary rise, Karsten tube and Mirowski pipe. In: Krüger, M. (ed.). *Cultural heritage preservation. European Workshop on Cultural Heritage Preservation, EWCHP 2011. Proceedings*. Stuttgart: Fraunhofer, 2011. ISBN 978-3-8167-8560-6.
- Wendler, E. a R. Snethlage. *Der Wassereindringprüfer nach Karsten – Anwendung und Interpretation der Messwerte*. München: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Forschungsbericht Nr. 3, 1991, 23–24.

# Poruchy a ochrana historických konstrukcí

## Glosář degradace architektonických povrchových vrstev

Miloš Drdácký

Architektonickou povrchovou vrstvou se rozumí vrstva nebo souvrství materiálů pevně spojené s podkladem, který má zpravidla odlišnou materiálovou kvalitu a vlastnosti, na stavbách nebo uměleckých objektech z anorganických materiálů užívaných ve stavebnictví. Vzhledem k povaze památkových objektů jsou mezi vrstvy zahrnuty i části původního materiálu, který na povrchu prošel chemickými či fyzikálními změnami.

V praxi však není pro povrchové vrstvy používáno jednotné názvosloví a dosud nebyly kodifikovány jejich definice ani definice pozorovaných poruch. Tato kapitola předkládá stručný návrh systematického třídění poruch omítek, obkladů a maleb na omítkách (včetně nátěrů), doplněný přehledem metod vhodných pro jejich vyšetřování a s doporučeními pro odhady příčin jejich vzniku.

Pro popis stavu kamenných objektů vypracoval ICOMOS ISCS úspěšný glosář defektů, poškození a poruch kamenných povrchů, který však není beze zbytku použitelný pro popis poruch omítkových vrstev (Illustrated glossary... 2011). Nicméně tento glosář je použitelný pro popis poruch malt, které se vyskytují na stavbách v dostatečně velkých objemech, analogických typickým kamenným prvkům. Je také velmi dobrým vzorem a v základním dělení poruch i vhodným nástrojem pro systematický popis a třídění poruch omítkových vrstev a malby. Detailní dělení ICOMOS ISCS glosáře je pro praktické každodenní užívání někdy zbytečně podrobné. Navíc glosář neobsahuje žádnou diskusi o příčinách poruch, což je v případě omítkových vrstev velmi podstatný jev pro jejich klasifikaci.

Vzhledem k tomu, že jsou studované poruchy povrchových vrstev svázány především s jejich konstrukčním uspořádáním, je systém rozdělen na případy poruch:

- tenkých povrchových vrstev,
- jednovrstvých omítek,
- vícevrstvých omítek,
- obkladů a mozaiky,
- (sádrových) omítek s plastickými dekorativními prvky.

Obecně se poruchy těchto konstrukcí mohou dělit stejně jako u kamenných povrchů na sedm základních skupin:

- trhliny,
- deformace,
- odloučení vrstev od podkladu,
- poruchy následkem degradace materiálu,
- poruchy následkem ztráty materiálu,
- ztráta nebo změna barvy a usazeniny na povrchu,
- biologické napadení.

Poslední dvě kategorie poruch mohou být beze zbytku převzaty z glosáře poruch kamenných povrchů, neboť se jedná o shodné projevy a není třeba vytvářet zvláštní přístupy k jejich hodnocení nebo opravě, kromě problémů nástěnných maleb.

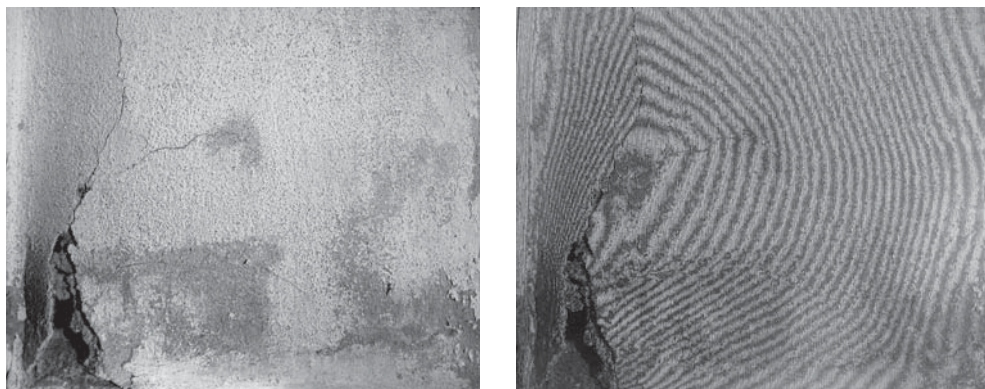
Zvláštní skupinu by mohly tvořit poruchy povrchových vrstev indukované poruchami podkladu, zejména poruchami podporující konstrukce, ale v této studii jsou uvažovány jako poruchy povrchových vrstev.

Typické jsou dále kombinace jednotlivých typů poruch, např. trhliny a odloučení, které potom mohou vést k řadě variant v morfologii poruchy. Zejména můžeme např. rozlišovat defekty charakterizované ztrátou soudržnosti nebo puchýře na uzavřené a otevřené, hladké a zlomené.

Pro informaci v této úvodní části uvedme velmi stručný výčet metod dokumentace a studia poruch omítek, které mohou být využity pro analýzy potřebné pro odhad příčiny poruchy.

Polohu a rozsah podpovrchových defektů je výhodné zkoumat pomocí nedestruktivních nebo šetrně destruktivních metod. Je možno využívat pasivní i aktivní termovizi (Maierhofer et al. 2002, Wedler et al. 2003), případně přirozeně buzenou aktivní termovizi (Drdáček a Lesák 2007). Dále měření diferenciálního kmitání uvolněných částí omítek od podkladu pomocí Dopplerova jevu při buzení periodickým akustickým tlakem (Castellini et al. 1999), piezobudiči (Vignola et al. 2005) nebo elektrodynamickými budiči (Michoinová et al. 2000). Slibnou metodou je také metoda akustického trasování – přímá nebo v poloautomatické verzi (Drdáček a Lesák 2006, Sklodowski et al. 2013). Přehled těchto metod je uveden detailně v jiné kapitole. Rovněž K. J. Beasley (2012) uvádí přehled metod a nástrojů užitečných pro průzkum poruch fasádních povrchů. Detailní měření je možno provádět dalšími metodami experimentální mechaniky, např. geometrii povrchu lze měřit metodou stínového moiré (**obr. 54**) nebo laserovou profilometrií, hloubku defektu mikrovtááním nebo boroskopii, která je vhodná pro vyšetřování větších a hlubších dutin. Poruchami moderních omítek, zejména vápeno-cementových, se zabývá také průvodce opravami vnitřních omítek firmy Mineral Products Association (Guide... 2012) a zároveň prezentuje typickou příčinu poruchy i návrh na její opravu.

Předpokládané příčiny poruchy jsou uvažovány i při podrobnějším popisu poruchy, zejména v souvislosti s materiálem povrchové vrstvy. V odborné literatuře lze nalézt řadu článků zabývajících se poruchami omítek nebo jiných povrchových vrstev. Většinou se jedná o moderní stavební systémy, často se sádrokartonovými deskami, které jednou budou trápit restaurátory a pracovníky památkové péče, proto je i k nim přihlédnuto.



**OBRAZEK 54:** Příklad moiré topografie deformované odtržené vápenné dvouvrstvé omítky. Porucha je kombinací boulení s desintegrací jádrové vrstvy a ztrátou materiálu ve zlomech. Boule se vyvíjela 35 let v interiéru na patním zdivu. Odlehlost vrstevnic je 1 mm (Foto M. Drdácý)

## Přehled povrchových vrstev

### *Tenká povrchová vrstva*

Tenká povrchová vrstva je tvořena souvislou vrstvou malby, nátěru, případně i papírové či textilní tapety, která je spojena s podkladem přirozenou soudržností vlivem chemických či fyzikálních sil nebo prostřednictvím další tenké vrstvy (např. lepidla), zajišťující adhezi. Může být tvořena jednou vrstvou z jednoho materiálu nebo souvrstvím z různých materiálů. Obvyklá tloušťka nepřesahuje 2 mm.

### *Jednovrstvá omítka*

Povrchová homogenní vrstva vyzrálé malty, která vznikla nanesením maltové směsi na podklad při jedné sekvenci omítacích operací. Obvyklá tloušťka nepřesahuje 20 mm.

### *Vícevrstvá omítka*

Povrchová heterogenní vrstva vyzrálé malty, která vznikla buď přirozeně vytvořením povrchové krusty na jedno- nebo vícevrstvé omítce, nebo jako souvrství nanesením vrstev – obvykle rozdílných maltových směsí na podklad při dvou či více sekvencích omítacích operací. Obvyklá tloušťka nepřesahuje 25 mm, ale jsou známy i případy tloušťky mnohem větší, až okolo 100 mm.

### *Obklad a mozaika*

Povrchové heterogenní souvrství tvořené pohledovou vrstvou keramických, bělinových, skleněných, kamenných prvků nebo přírodnin – dlaždic, kostek, oblázků či mušlí, zasazených obvykle do vícevrstvého maltového podkladu. Obvyklá tloušťka nepřesahuje 40 mm.

### *Omítka s plastickými dekorativními prvky*

Povrchová homogenní vrstva obvykle sádrové omítky, která vznikla buď nanesením sádrové maltové směsi na podklad, nebo jako finální vrstva na jádrové omítce. Často vytváří podklad pro upevnění dekorativních plastických prvků, které mohou být přilepeny jako odlitky nebo vytvářené na místě. Obvyklá tloušťka nepřesahuje 20 mm.



**OBRÁZEK 55:** Jemné trhliny jako výsledek dilatačních pohybů bloků zdiva teplotní roztažností. V takovém případě nelze vzniku trhlin zabránit a poruchy mohou být pouze zakryty vrstvou malty vyztuženou pletivem nebo jejich viditelnost snížena pravidelnými nátěry (Foto M. Drdácý)

## Vady a poruchy povrchových vrstev

### Trhliny

Trhlinu definujeme jako přerušení spojitosti nebo celistvosti povrchové vrstvy liniovou mezerou. Trhliny mohou být jednotlivé, dále násobné – vycházející paprskovitě z jednoho bodu (hvězdčovitě) nebo mohou vytvářet rodinu rovnoběžných trhlin či vytvářet pravidelnou nebo nepravidelnou síť trhlin, například typické rozpraskání (krakelování, **obr. 56**). Trhliny mohou být plně rozvinuté (procházet celou vrstvou a vzájemně oddělovat neporušené souvislé části) nebo povrchové (začínají na povrchu a postupně slábnou). Podle dalších znaků nebo příčin vzniku rozlišujeme další typy.

Vlasová trhlinka představuje přerušení spojitosti nebo celistvosti povrchové vrstvy liniovou mezerou o tloušťce menší než 0,1 mm.

Jemná trhlinka způsobuje přerušení spojitosti nebo celistvosti povrchové vrstvy liniovou mezerou o tloušťce menší než 1 mm. Může vzniknout z řady příčin a obvykle u stavebních objektů nevyžaduje žádný speciální zásah, protože neohrožuje jejich stabilitu (**obr. 55**). Může signalizovat trhlinku v podkladu, a pokud se takové trhliny náhle objeví v konstrukci či na artefaktu bez zjevné příčiny, doporučuje se jejich periodické sledování např. jednou za rok i s registrací jejich rozvoje nákresem nebo fotografií.

Technologické trhliny se objevují typicky v místech tzv. pracovních spár nebo jako důsledek objemové změny či napětí, vznikajících při chemických procesech vytváření nebo přeměny povrchové vrstvy a zahrnují i smršťovací trhliny. Po vyzrání (vytvrnutí) vrstev jsou obvykle stabilní a mohou být opraveny tmelením nebo lokálním přilepením. Tato porucha je často způsobena příliš „mastnou“ směsí, tj. směsí s nadměrným množstvím pojiva





**OBRAZEK 56:** Rozpraskání (krakelování) je typické pro smršťovací trhliny. Na pravé straně jsou kombinovány s deformacemi, odtržením od podkladu a ztrátou materiálu (Foto M. Drdáčký)

nebo velmi jemným plnivem v maltové vrstvě. V nátěrech mohou být způsobeny membránovými napětími, která jsou vyvolána smršťením po chemické reakci nebo vysycháním těkavých látek.

Dilatační trhliny jsou typické pro povrchové vrstvy z materiálů, u nichž dochází k výrazným rozdílným objemovým změnám v důsledku teplotní či vlhkostní roztažnosti nebo k rozdílnému chování povrchové vrstvy a podkladu. Na rozdíl od technologických trhlin dilatační trhliny nejsou stabilní. Trhliny a praskliny jsou obvykle letité a zanesené prachem („špinavé“), což zvyrazňuje jejich vzhled (**obr. 57**). Jsou přirozenou reakcí na zabránění volnému pohybu, a proto se nedoporučuje jejich pevné „sešívání“, přemostování či zaplňování tuhým materiálem.

Konstrukční trhliny jsou obvykle větší trhliny, procházející vždy celou povrchovou vrstvou a pokračují i v podkladu – pokračování však nemusí navazovat přesně, pokud došlo k předchozímu oddělení povrchové vrstvy od podkladu (**obr. 58**). Tyto trhliny se někdy nazývají statické, i když mohou vznikat z řady důvodů mechanického namáhání jako trhliny dynamické nebo únavové. Mohou být stabilní i nestabilní v závislosti na chování podkladové konstrukce. Zjištění skutečných příčin vzniku trhliny nezdědka vyžaduje dlouhodobé sledování (monitorování) pohybu oddělených částí kolem trhliny.

### **Deformace**

Místní bobtnání (puchnutí) nebo smršťování je povrchový defekt ve tvaru bulek či hrudek nebo naopak kráterů přítomných v povrchové vrstvě bez oddělení od podkladu (**obr. 59**).

Boulení je deformace větší celistvé části povrchové vrstvy ve tvaru hladké boule nebo zlomeného střečovitého útvaru, vždy doprovázená lokální ztrátou soudržnosti s podkladem. Vzniká působením tlakových sil v rovině vrstvy (např. **obr. 54, 60**).

Prohnutí je deformace větší celistvé části povrchové vrstvy ve tvaru hladké boule, často doprovázená i lokální ztrátou soudržnosti s podkladem, způsobená snížením tuhosti nebo pevnosti materiálu vrstvy.



**OBRÁZEK 57:** Kombinace dilatačních a konstrukčních trhlin v důsledku rozdílné roztažnosti bednění a konstrukce dřevěného stropu a omítkové vrstvy a dále průhybu dřevěné stropní konstrukce (Foto M. Drdácěk)



**OBRÁZEK 58:** Konstrukční trhlinka procházející do omítkové vrstvy (Foto J. Adámek)



**OBRÁZEK 59:** Příklad kráterů v povrchové vrstvě (Foto M. Drdácěk)

### **Ztráta soudržnosti s podkladem**

Puchýře jsou lokální povrchové defekty ve tvaru malých hladkých či zlomených (střechovitých) vrchlíků (uzavřené) nebo vyvýšenin s otevřeným vrcholem (otevřené), doprovázené lokální ztrátou soudržnosti s podkladem pod puchýřem, často i se ztrátou soudržnosti podkladu (**obr. 61**).



**OBRÁZEK 60:** Příklady boulení i s částečnou ztrátou materiálu (vpravo nahoře) (Foto M. Drdácký)



**OBRÁZEK 61:** Uzavřené a otevřené puchýře v povrchových vrstvách lokálně oddělených od podkladu (jádrové omítky) (Foto M. Drdácký)

Rozkvětání je zvláštní případ puchýřování či odlupování povrchové vrstvy (**obr. 62**). Defekty jsou lokálními deformacemi povrchových vrstev rozdělených trhlinami ve tvaru okvětních lístků oddělených od podkladu na okrajích a později v celé ploše lístku. Oprava závisí na příčině poškození, kterými jsou obvykle v tenkých vrstvách reziduální napětí, v omítkách spíše objemové změny v oddělené vnitřní přechodové vrstvě (granulární rozpad, krystalizace solí).

Miskovitostí nazýváme lokální deformace trhlinami nebo ztrátou materiálu oddělené povrchové vrstvy ve tvaru misky, obvykle je na okrajích doprovázená ztrátou soudržnosti povrchové vrstvy s podkladem, což je typické u šupinatění. Má stejné příčiny jako rozkvětání.

Lístkovatění (laminace, exfoliace) představuje poruchu rozdělávání kompaktní vrstvy na tenčí vrstvičky nebo rozdělání souvrství do vícevrstvého systému – spíše se objevuje



**OBRÁZEK 62:** Deformace rozpraskaných a oddělených částí povrchové vrstvy ve tvary konvexního ohybu odtržených lístků je klasifikována jako rozkvětání (Foto M. Drdácký)



**OBRÁZEK 63:** Kombinované poškození lístkovatěním souvrství nátěrů (maleb) a štukových vrstev se ztrátou materiálu (vlevo) a lístkovatění vyvolané mrazem (vpravo) (Foto M. Drdácký)

u souvrství nebo u vrstev nanášených s technologickým přerušením, též jako výsledek chátření působením mrazových cyklů (**obr. 63**).

Ztráta soudržnosti s podkladem (oddělení od podkladu) se projevuje jako přerušení spojitosti a souvislosti v okolí rozhraní mezi vrstvou a podkladem (**obr. 64**), povrchová vrstva při poklepu má typickou odezvu – zní „dutě“. Může mít i formu odprýskávání souvislé tenké kry, což je typické u velmi tvrdých pevných nátěrů nebo souvrství (**obr. 65**).

Odlupování souvislé vrstvy je zvláštní projev ztráty soudržnosti s podkladem, většinou typický pro tenké vrstvy na stropích a klenbách (**obr. 66**).

Vrásnění souvislé vrstvy vzniká při uvolnění soudržnosti vrstvy s podkladem a jejím „shrnutím“ do soustavy vrás, je typické např. pro některé nátěry po nasycení vodou (povodňové situace).

Šupinatěním nazýváme kombinaci husté sítě trhlin, puchnutí a ztráty soudržnosti s podkladem, často vedoucí ke značné ztrátě hmoty odpadáváním šupin. Na omítkách je pozorováno v souvislosti s velmi lokální (bodovou) krystalizací solí, způsobující lokalizované lístkování.



**OBRÁZEK 64:** Oddělení velkých ker omítky v důsledku degradace jádrové omítky na rozhraní s podkladem nebo jejím rozpadem (Foto M. Drdácý)



**OBRÁZEK 65:** Oddělení a odpadnutí opravné vrstvy umělého kamene (Foto M. Drdácý)

### ***Poruchy způsobené degradací materiálu***

Typickým jevem je práškovatění – ztráta soudržnosti uvnitř materiálu, projevující se rozpojením souvislé vrstvy na velmi drobná zrna materiálu.

Nebezpečnějším typem degradace je snížení nebo ztráta soudržnosti materiálu, která vede k dezintegraci kompozitu a jeho rozpadu na jednotlivá zrna agregátu – pískovatění, cukrovatění, granulární rozpad. Porucha je typická pro omítkové vrstvy, v souvrstvích často dochází k rozpadu v jádrové omítce, která je obvykle méně pevná než tvrdší a odolnější povrchová vrstva nebo dokonce křusta (**obr. 67**). Dochází pak k selektivní degradaci podél hloubkového profilu.



**OBRÁZEK 66:** Příklad odlupování tenkých vrstev (Foto M. Drdácý)



**OBRÁZEK 67:** Ztráta soudržnosti (koheze) jádrové omítky pod tvrdou vrstvou krusty (vlevo), příklad rozpadu omítky šupinatěním (vpravo) (Foto M. Drdácý)

### **Poruchy se ztrátou materiálu**

Ztráta materiálu (eroze, opotřebení) může mít řadu forem, např. vymývání, oděr nebo poškrábání tenké povrchové vrstvy (**obr. 68**), selektivní zvětvování a eroze (Randazzo et al. 2015) (**obr. 69, 70**), důlkovatění, perforace přirozenými procesy chátrání nebo záměrným mechanickým poškozením omítek.



**OBRÁZEK 68:** Ztráta materiálu seškrábáním stěny, o kterou jsou opírána kola (vlevo), krátery způsobené projektily ze vzduchovky (vpravo) (Foto M. Drdácý)



**OBRÁZEK 69:** Selektivní eroze (vlevo), alveolizace (vpravo) (Foto M. Drdácý)



**OBRÁZEK 70:** Selektivní degradace a eroze (Foto M. Drdácý)

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

- Beasley, K. J. Building façade failures. In: *Proceedings of the Institutions of Civil Engineers - Forensic Engineering*. 2012, 165(1), 13–19. <http://dx.doi.org/10.1680/feng.2012.165.1.13>
- Castellini, P., E. Esposito, N. Paone a E. P. Tomasini. Non-invasive measurements of damage of frescoes paintings and icon by Laser Scanning Vibrometer: experimental results on artificial samples using different types of structural exciters. In: *6th World conference on NDT and Microanalysis in Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage*. Roma: AIPnD, 1999, 185–198.
- Drdácký, M. a J. Lesák. Non-destructive diagnostics of shallow subsurface defects on masonry. In: Binda, L., M. Drdácký a B. Kasal (eds.). *In-situ evaluation and non-destructive testing of historic wood and masonry structures*. Praha: Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, 2007, 140–147. ISBN 978-80-86246-36-9.
- Drdácký, M. a J. Lesák. Non-invasive survey of detachment of historic rendering. In: Fort, R., M. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras a C. Vazquez-Calvo (eds). *Heritage, Weathering and Conservation*. London: Taylor & Francis Group, 2006, 591–597. ISBN 0-415-41272-2.
- Guide to remedial measures associated with internal plastering, Mineral Products Association. ICOMOS-ISCS. *Illustrated glossary on stone deterioration patterns (English-Czech version)*. Drdácký, M., Z. Slížková a A. Zeman (trans.). Praha: ITAM, 2011. ISBN 978-80-86246-38-3.
- Maierhofer, C., A. Brink, M. Röllig a H. Wiggenger. Transient thermography for structural investigation of concrete and composites in the surface near region. *Infrared Physics and Technology*. 2002, 43(3-5), 271–278. [http://dx.doi.org/10.1016/S13504495\(02\)00151-2](http://dx.doi.org/10.1016/S13504495(02)00151-2)
- Michoinová, D., M. Drdácký, J. Lesák a S. Urushadze. Inspection and efficiency of consolidation of delaminated parts of historic lime plasters. In: *Restoration of Architectural Heritage Firenze*. Florence: University of Florence, 2000, 2097-2103.
- Skłodowski, R., M. Drdácký a M. Skłodowski. Identifying subsurface detachment defects by acoustic tracing. *NDT & E International*. 2013, 56, 56-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.02.002>
- Vignola, J. F., J. A. Bucaro, B. R. Lemon, G. W. Adams, A. J. Kurdila, B. Marchetti, E. Esposito, E. Tomasini, H. J. Simpson a B. H. Houston. Locating faults in wall paintings at the U.S. Capitol by Shaker-Based Laser Vibrometry. *APT Bulletin*. 2005, 36(1), 25–33.
- Wedler, G., A. Brink, M. Röllig, F. Weritz a C. Maierhofer. Active infrared thermography in civil engineering – quantitative analysis by numerical simulation. In: *International Symposium (NDT-CE) Non-Destructive Testing in Civil Engineering Berlin*. Berlin: DGZfP, 2003.



# Degradace mozaik vystavených účinkům povětrnosti

Jaroslav Valach

Mozaiky patří k významným památkám kulturního dědictví a jejich zachování k nejobtížnějším úkolům pro restaurátory. V České republice je mozaika Posledního soudu na jižním vchodu do katedrály sv. Víta na Pražském hradě nejcennějším dílem tohoto druhu na území Česka, a proto se právem věnuje ochraně této památky zvýšená pozornost. Poznatky, které lze nalézt pro tuto mozaiku, platí do značné míry obecně pro všechny mozaiky vytvořené ze skla s výrazným zastoupením hořecnatých sloučenin. Ačkoli se sklo považuje za stabilní materiál, skutečnost je mnohem složitější, zejména pokud jde o dlouhodobé uchování vlastností skla. Chemická odlišnost historického skla způsobuje, že podléhá vnějším vlivům, a aby tyto vlivy, tedy reakční procesy, byly potlačeny, je třeba povrch skla chránit pečlivě vybraným souvrstvím povlaků. A aby věc nebyla jednoduchá, samy tyto povlaky také podléhají degradaci a je nezbytné včas zasáhnout, než poškození bude viditelné prostým okem. Pro včasné varování slouží optické a jiné fyzikální metody a simulace, jejichž popisu je tato kapitola přednostně věnována.

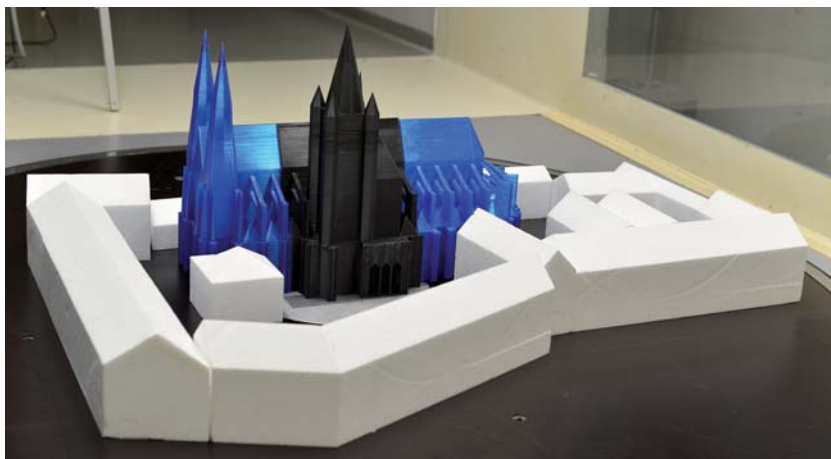
## Historie mozaiky „posledního soudu“ a jejího restaurování

Mozaika Posledního soudu byla pro jižní vstup do katedrály, tzv. Zlatou bránu, vytvořena na popud císaře Karla IV. v roce 1371. Výroba skla probíhala na území Čech v zatím neurčených sklářských hutích. Jak známo, pro snížení teploty tání skla se hlavní surovina – oxid křemičitý, získaný obvykle v podobě sklářského písku, mísí s vápnem (uhličitánem vápenatým) a sodou (v podobě uhličitánu vápenatého) a dalšími alkáliemi (Piqué a Stehlík 2004, Kyzourová 2010). Užitím této směsi se teplota tání sníží téměř o tisíc stupňů Celsia oproti teplotě tání čistého oxidu křemičitého, což zajistí sklu zpracovatelnost i v primitivních podmínkách středověkých hutí. V Itálii, kde sklářství a mozaikářství začalo, byla soda dodávána v podobě natronu (směs  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a  $\text{NaHCO}_3$ ). V důsledku politických změn v Evropě se uzavřely i obchodní cesty dovážející natron a náhradní surovinou byl potaš  $\text{KCO}_3$  získávaný z popelu bukového dřeva. Následkem změny složení skla ve prospěch hořecnatých sloučenin bylo snížení korozní odolnosti proti působení vody a v pozdějším období i kyselého deště. Interakce s prostředím se projevuje degradací povrchové vrstvy, vymýváním draselné složky a dalšími ději zasahujícími chemické složení a podobu povrchu. Rozpraskaný a vyluhovaný povrch se bezprostředně projevuje na optických vlastnostech (= vzhledu) skla. Viditelnost původních barev je potlačena rozptylem světla na povrchu, mnohočetnými odrazy

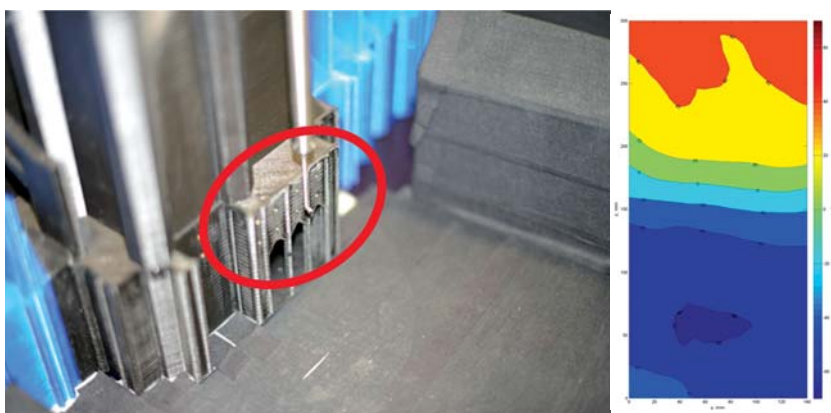
na povrchových útvarech, jakými jsou různé prasklinky, rýhy a hrany. Mozaika po delší část své existence trpěla touto vadou povrchu, pro kterou návštěvníci Hradu nemohli spatřit a náležitě ocenit její ohromující barevnost. Mozaika byla poprvé opravována již v 15. století, znovu pak po požáru Pražského hradu. O následujících zásazích až do 19. století chybí záznamy. V 19. století byla již mozaika ve špatném stavu, vypadlá sklíčka byla nahrazena maltou a malta opatřena malbou doplňující původní vyobrazení mozaiky. V roce 1890 byla mozaika sejmuta a měla být nahrazena kopií, avšak po jejím restaurování v roce 1908 byla v roce 1910 vrácena na své původní místo. Po druhé světové válce byla znovu restaurována několikrát, ale koroze se i po zásazích vždy vrátila. Teprve ochranný systém navržený a realizovaný Getty institutem v letech 1998–2000 přinesl dlouhodobější úspěch. Byl založený na čtyřech vrstvách povlaků – spodní vrstva organo-křemičitanový sol-gel, na ní byly naneseny organopolymery nejprve částečně zesítněné, pak nezesítněné, které byly vnější povrchovou vrstvou. Tam, kde restaurování vyžaduje zlacení, bylo provedeno mezi druhou a třetí vrstvou. Technologie údržby měla spočívat v pětileté výměně poslední ochranné vrstvy a ve dvacetileté výměně celého souvrství. Údržba předpokládala oddělitelnost zesítněné a nezesítněné vrstvy, která se nepotvrdila. Proto v roce 2004, kdy podle plánu údržby mělo být provedeno sejmутí vnějšího povlaku, bylo pro jeho dobrý stav přijato rozhodnutí, že odstraněn nebude a naopak se přidá další, pátý povlak – což nebyla šťastná volba, protože došlo ke „krabacení“ povlaku a dalším vadám včetně delaminace. Mezi další pozorované vady, kterých byl vytvořen celý „katalog“, patří bublinky, puchýřkování, zákal na zelených tesarách (pravděpodobně obnovení koroze) atd. Idea periodické obnovy ochranných vrstev mozaiky byla navíc narušena další nedostupností nátěru z důvodů změny výrobního programu výrobce. Proto bylo cílem projektu podporovaného Ministerstvem kultury vybrat vhodný produkt pro náhradu nevyroběného a také vytvořit soubor postupů, jak zaznamenávat a měřit změny, ke kterým na povrchu skla dochází. Smyslem takového sledování je odhalit dříve, než je to patrné pouhým okem, nastupující poškození povrchu a tímto systémem „včasné výstrahy“ prodloužit čas pro rozhodnutí o dalším postupu. Monitorovací postupy jsou nástroje pro odhalení důsledků, pro hledání příčin poškození mozaiky je třeba se také obrátit k modelování, jak se promítají klimatické a meteorologické děje na zatížení mozaiky (Holubová et al. 2015). Proto jako první sled preventivního přístupu lze chápat provedené studie lokálního proudění a interakce mozaiky s deštěm v klimatickém tunelu.

## Simulace povětrnostního zatížení v klimatickém tunelu

Zmenšený model katedrály a obklopujících hradních budov posloužil k nalezení odpovědí na otázky, jaký má vliv směr proudění na zatížení mozaiky náporů větru a hnaným deštěm. Experimentální ověření zatížení mozaiky vlivy počasí lze potom propojit s dlouhodobými statistikami rozdělení proudění a srážek v průběhu roku. Proto byl vytvořen model katedrály sv. Víta v měřítku 1:200 (**obr. 71**). Toto měřítko bylo voleno ve vazbě na velikost klimatického tunelu „Vincenc Strouhal“ v ÚTAM CET v Telči. Ve zvoleném měřítku jsou k dispozici detaily stavby v potřebném rozlišení a současně bylo možné katedrálu doplnit i okolními stavbami Pražského hradu, které jsou nezbytnou součástí modelu, má-li realisticky reprodukovat proudění v místě. Širší okolí Hradu nebylo nezbytné zahrnout, protože díky vyvýšenému umístění na ostrohu nad řekou je vystaven nenarušenému proudění.



**OBRÁZEK 71:** Pohled na model katedrály s okolními budovami Hradu



**OBRÁZEK 72:** Model portálu s mozaikou (v elipse) vybavený tlakovými snímači. Vertikální profil rychlostí v místě mozaiky

Postupným otáčením modelu vůči směru proudění vzduchu v tunelu mohly být studovány lokální projevy a fluktuace v místě portálu s mozaikou, například byla určena tlaková pole na modelu v místě mozaiky (**obr. 72**). Poznatky dosažitelné experimenty v klimatickém tunelu nebyly ještě vyčerpány, další rozvoj tohoto modelu umožní odhadnout zatížení mozaiky vlivy počasí a klimatu a jejich případnými změnami. Spojením místních projevů daného typu proudění s celoročními statistikami dostupnými na ČHMÚ lze odhadnout zatížení mozaiky. Znalost „přenosové funkce“ dané modelem dokonce umožňuje modelovat vlivy změn typického chodu počasí na dynamiku degradace mozaiky.

Další využití klimatického tunelu představovala experimentální studie interakce makety mozaiky s deštěm. Pomocí rychloběžné kamery a systému pro měření pole rychlostí částic byla studována dynamika interakce kapek s mozaikou. Drsnost povrchu mozaiky se projevuje na pohybu a místech dopadu kapek, což potvrzuje požadavek řádného a trvanlivého vyspárování mozaiky.

## Monitorování stavu povrchu optickými a fyzikálními metodami

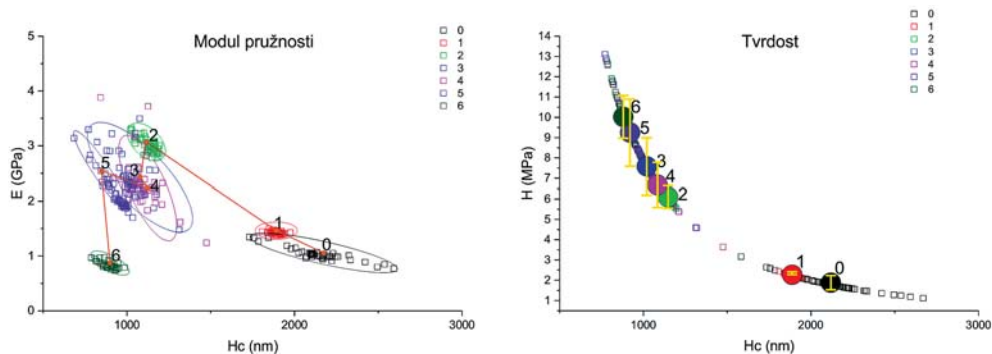
Monitorování stavu povrchu mozaiky po její obnově v roce 2000 přednostně spočívalo v opakované fotodokumentaci vybraných částí mozaiky, které bylo doplněno kolorimetrickým měřením barevnosti. Kolorimetrické měření je citlivé na výběr identického místa na skleněném dílku pro spolehlivé zjištění barevné změny. Současně se přistoupilo i na monitorování vzorků v podobě podložních mikroskopovacích sklíček s povlakem, který je identický s tím na mozaice. Díky umístění kontrolních vzorků na balkonu nad mozaikou je zatížení mozaiky a vzorků vnějším prostředím shodné. Tyto zavedené postupy však neumožňují odhalení poškození dřívě, než je viditelné prostému oku, a proto byl zájem vypracovat další způsoby sledování stavu povlaku.

Pro ověření použitelnosti vyvíjených metod byly připraveny vzorky, které podstoupily různý stupeň umělého stárnutí vedoucího k různému stupni poškození, tedy fyzikální a chemické změny v polymerním povlaku se projevují jeho vizuální změnou. Vzorky pak byly vyhodnocovány navrhovanými metodami. Lze říci, že degradace povlaku, který je v okamžiku nanesení na povrch hladký, se projevuje nárůstem jeho nerovnosti. Je známo, že drsnost povrchu a úhlová odrazivost úzce souvisí s topografií povrchu a mohou posloužit k popisu jeho poškození. Jak ukázala měření, drsnost povrchu roste s dobou umělého stárnutí a s nahromaděním poškození obecně. Jiné použitelné měření vysvětlené později je změna odrazivosti plochy z „lesklé“ na „lambertovskou“, tj. rovnoměrně matnou. Odrazivost umožňuje určit kvantitativně „polohu“ plochy na stupnici lesklosti/matnosti pro danou vlnovou délku (plocha se může jevit jako drsná ve světle o kratší vlnové délce a zároveň jako lesklá ve světle o větší vlnové délce). Tato poloha se dá použít jako indikátor drsnosti povrchu.

Následující odstavce si kladou za cíl ukázat, jak se mění pozorované poškození v závislosti na použité metodě a diskutovat její vhodnost pro dlouhodobé monitorování mozaiky. Tyto metody byly použity k popisu změn objevujících se na povrchu a uvnitř uměle stárnutého vzorku. Změny v povlaku ústí ve vizuální degradaci, ztrátu průhlednosti a lesku. Ke studiu těchto změn povrchu byla využita digitální mikroskopie, skenovací mikroskopie (z anglického „scanning probe microscopy“, SPM), řádkovací elektronová mikroskopie („scanning electron microscopy“, SEM), interferometrie v bílém světle a úhlově závislá reflektometrie.

Pro sledování kumulace poškození povlaku byly provedeny mechanické nanoindentační testy na zařízení Hysitron TI-750. Vyhodnocením série měření na povlacích simulujících různou úroveň uměle navozeného stárnutí bylo zjištěno, že modul pružnosti povlaku se mění způsobem, ve kterém je spíše než závislost na době stárnutí patrná lokální poddajnost daná sklonem povrchu, lokální fluktuací hustoty a podobně. Z tohoto důvodu není vhodný způsob, jak charakterizovat stav povlaku (**obr. 73**). Naproti tomu vývoj tvrdosti výrazně koreluje s postupujícím stárnutím vzorků, a proto by bylo možné tuto metodu i v budoucnosti zahrnout do metodiky sledování kvality povlaku.

Spolu s mechanickými zkouškami byly provedeny i studie topografie povrchu laku v různých stádiích umělého zestárnutí. Pro tento účel byl využit skenovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA II a FEI Quanta 450, 3D digitální mikroskop Hirox 7700, zařízení pro interferenci v bílém světle Zygo a SPM (scanning probe microscope) modul v nanoindentoru. Topografie povrchu, vytváření různých „vrásek“, důlků, podpovrchová delaminace, vznik dutinek a podobně mají totiž rozhodující vliv na vizuální vlastnosti povlaku. Tyto optické vlastnosti se



**OBRAZEK 73:** Mechanické vlastnosti povlaků zjištěné nanoindentací pro vzorky různé doby umělého stárnutí. Zatímco modul pružnosti (vlevo) nenaznačuje žádný trend, u tvrdosti (vpravo) je patrné, jak její hodnota roste s dobou stárnutí

potom promítají do estetického vjemu z mozaiky, protože povlak v dobrém stavu intenzivní vlastní barevnost mozaiky zpřístupňuje pohledu, zatímco povlak s defekty vytváří poloprůsvitnou vrstvu, ve které se rozptyluje okolní světlo a mozaika samotná je tímto efektem překryta.

Ačkoli prostorové rozlišení SEM umožňuje velmi podrobné studium topografických detailů povlaku (**obr. 74**), nezbytnost povlak pokrýt vodivou vrstvou a potom jej exponovat vakuu a v průběhu pozorování v SEM vystavit proudu nabitých částí vede k tomu, že tato metoda pro dlouhodobé monitorování povlaku není vhodná, protože testované vzorky nevratně mění.

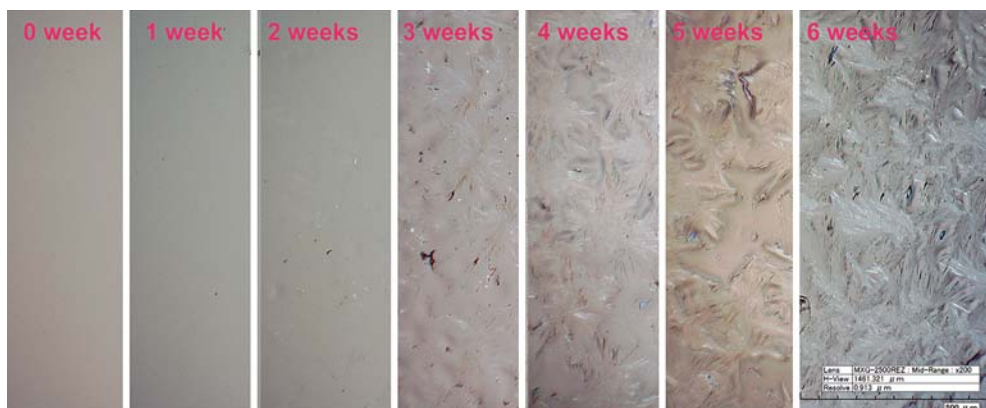
Podobně bylo vyloučeno pro dlouhodobé monitorování vzorků založené na opakovaném pozorování digitálním mikroskopem (**obr. 75**). Hlavním důvodem byla skutečnost, že digitální mikroskop používá spodního nasvícení studovaného vzorku a při vlastní degradaci skla pod povlakem by pozorování povlaku bylo nepříjemně ovlivněno.

Mikroskopie sondou (SPM) a interference v bílém světle tedy vycházejí jako nejvhodnější metody pro detailní studium topografie povlaku (**obr. 76**). S ohledem na skutečnost, že výchozí velikost pozorované plochy je u SPM čtverec o straně 80 mikrometrů, je pro použití této metody nezbytné provést více pozorování, aby narostla pravděpodobnost získání reprezentativního vzorku. Interferometrie v bílém světle studuje v jednom měření plochu cca  $1 \times 1$  mm, která je podstatně reprezentativnější (**obr. 77**). Vliv degradačních procesů se projevuje dramatickým nárůstem „zvlnění povrchu“ a může být charakterizovaný veličinou drsnost.

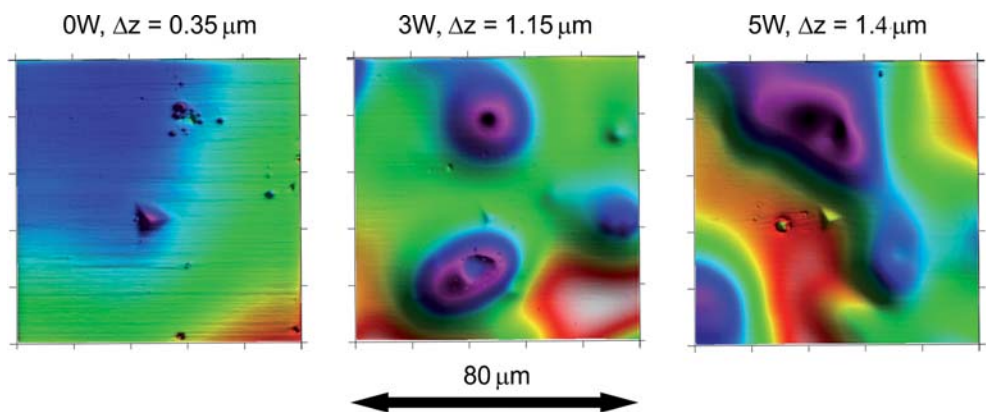
Pro charakterizování integrální změny kvality povrchu je ale důležité měření odvozené z optických metod, které mají svou podstatou nejbližší k hlavní motivaci udržení ochranného povlaku v dokonalém stavu – a totiž v konečném pozorování mozaiky návštěvníkem Hradu. K dosažení tohoto cíle byl vyvinut a do úrovně funkčního vzoru doveden laboratorní reflektometr (Kocour a Valach 2014). Toto zařízení umožňuje provádět automatizované měření odrazivosti povrchu. Data, která jsou v průběhu měření získána, jsou shrnuta do jediné „mapy odrazivosti“, která umožňuje charakterizovat optické vlastnosti povrchu (**obr. 78**). Díky souvislosti mezi povrchovou mikrotopografií a vizuálními vlastnostmi povrchu je tedy možné prostřednictvím nepřímého měření odrazivosti získat dostatečné informace o stavu povrchu – ukazuje se totiž, že zrcadlový lesk a odrazivost souvisí s opticky rovným povrchem a s nárůstem drsnosti povrchu roste matnost, tj. difúzní charakter odražení světla z povrchu.



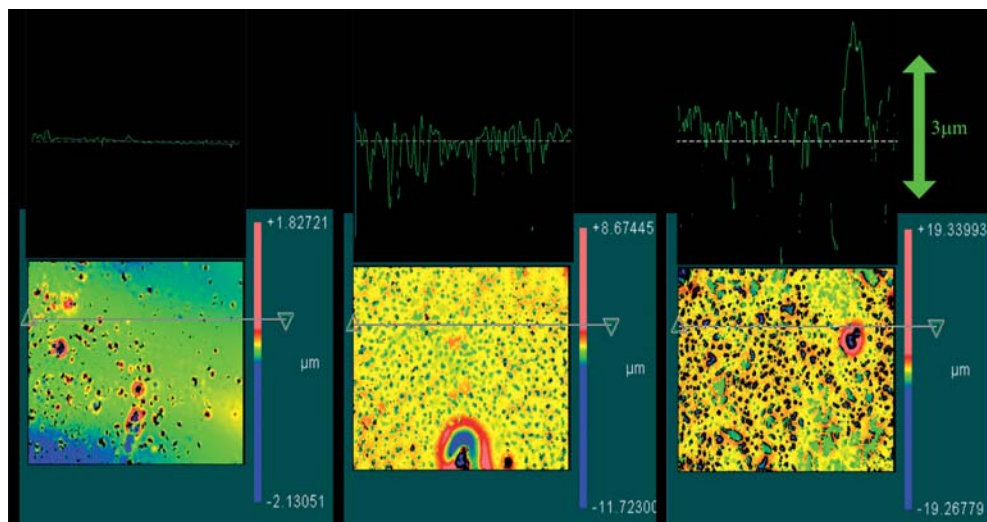
**OBRÁZEK 74:** Vývoj topografie povrchu s pokračováním umělého stárnutí zaznamenaný SEM sondou sekundárních elektronů



**OBRÁZEK 75:** Vzhled povlaku v podání video mikroskopu Hirox KH-7700. V obraze jsou vidět nejen topografické detaily, ale i strukturální změny



**OBRÁZEK 76:** Vývoj topografie povlaku pomocí SPM techniky, která je součástí nanoindentoru. Výšky útvarů na povrchu jsou vybarveny, ale barevné měřítko není společné pro všechny obrázky. Rozhodující je údaj o celkovém převýšení nad každým obrázkem.



**OBRÁZEK 77:** Topografie a řezy povrchu analyzované pomocí interferometrie v bílém světle. Řezy povrchem, které jsou ve stejném měřítku, dobře ilustrují nárůst dramatickosti povrchu

Vytvořený laboratorní reflektometr umožňuje tuto souvislost zaznamenat, a proto může sloužit k charakterizování povrchu a jeho poškození. Toto poškození lze korelovat s nárůstem difúzní komponenty reflektance.

Po vzájemném porovnání výsledků z použití jednotlivých postupů, lze dospět k těmto závěrům: potvrdilo se, že optické metody se dají použít ke kvantifikaci změn způsobených degradací polymerního nátěru vyvolané zrychleným stárnutím. Bylo zjištěno, že nutnost pokrýt povrch vzorku přílnavou vrstvou vylučuje SEM z dalších úvah, protože vodivá vrstva, kterou je nutné povrch vzorku pokrýt, aby SEM fungovala, mění vlastnosti povrchu. Aplikovaná technika musí být neinvazivní, pokud má být dlouhodobý monitoring skutečně možný. Metoda SPM sice správně zobrazuje topografii povrchu, ale zobrazená část povrchu je příliš malá na to, aby jí bylo možné považovat za reprezentativní. Metoda digitální mikroskopie může dokumentovat změny stavu nátěru v průběhu stárnutí. Ale v dlouhodobém monitoringu založeném na pozorování mikroskopových podložních sklíček je možné, že výsledky budou ovlivněny degradací skla pod nátěrem, protože metoda digitální mikroskopie je jediná, která spoléhá na průhlednost soustavy: mikroskopové podložní sklíčko – nátěr. Proto metody kvantifikující drsnost povrchu nátěru jako měřítko jeho degradace jsou nejlepšími kandidáty pro spolehlivý monitoring. Vhodná metoda je přímé měření drsnosti například metodou interferometrie v bílém světle nebo nepřímé vyjádření drsnosti v odrazivosti povrchu měřené reflektometrem.

## Metodika budoucí ochrany

Metody studia a charakterizování povrchu, které byly diskutovány v předchozí části, vycházely z použití podložních sklíček pro mikroskopy jako substrátu pro pozorování degradačních procesů, které se odehrávají na povlacích. Tento způsob sledování změn doporučujeme i pro plné nasazení pro kontrolu stavu finálně vybraného ochranného povlaku po jeho nanesení na mozaiku.

Zkušenosti z předchozího studia vlastností povrchu mozaiky totiž dokazují, že vlastní variabilita barev, členitosti povrchu, orientací skleněných dílků apod. přináší i v kontrolovaných laboratorních podmínkách značný problém reprodukovatelnosti výsledků. Na dřívějším použití spektrofotometru i digitálního mikroskopu se ukázalo, jak obtížné je vracet se v měření na stejné místo, což též znamená, jak různorodost povrchu způsobuje citlivost výsledků na umístění sondy, výběr místa. Prostorová variabilita vlastností překonává příspěvek od časové změny, tedy signál, který je z hlediska cílů měření šumem, zcela zastiňuje užitečnou informaci. V polních podmínkách, v exponované výšce na mozaice by validita výsledků byla ještě obtížněji dosažitelná. Proto použití podložních sklíček se jeví jako řešení, jak dosáhnout nejvyšší opakovatelnosti měření, protože homogenní povrch vzorků zaručuje reprezentativnost měření při volbě jakéhokoli místa na vzorku. Tímto způsobem bude pro studium změn dostupná i celá paleta analytických metod, které nelze aplikovat na místě.

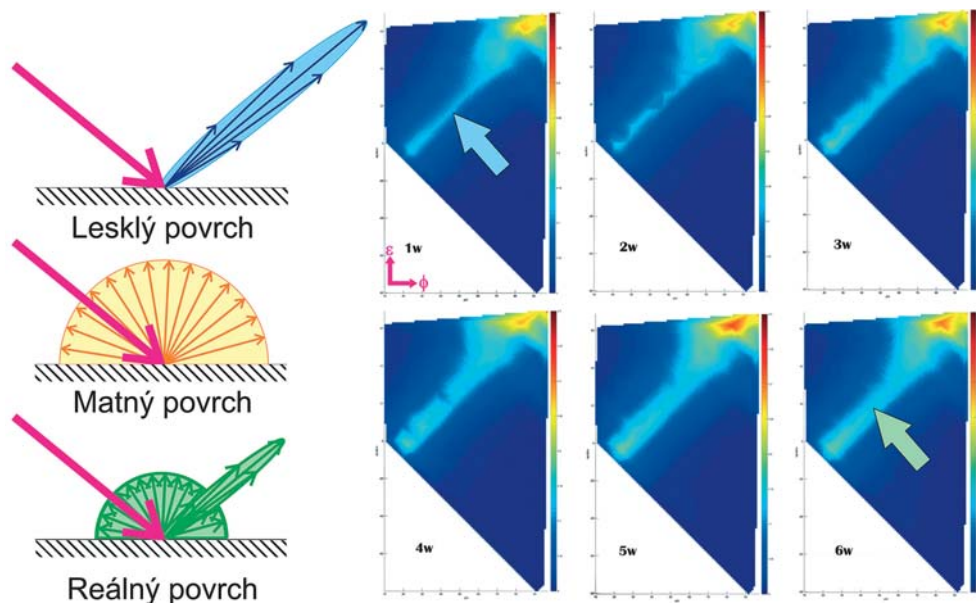
Metodika pro monitorování stavu ochranného povlaku na mozaice by proto měla vycházet z totožných degradačních dějů, které probíhají na kontrolních vzorcích a na mozaice samotné. Tuto podmínku lze splnit jedině umístěním vzorků na stejné místo, kde je i mozaika. Takovým místem je balkon nad portálem s mozaikou. Zde budou kontrolní vzorky vystaveny stejnému působení počasí jako mozaika samotná a navíc půjde i o řešení citlivé z hlediska potřeb návštěvníků Hradu, protože kontroly se budou moci odehrávat, aniž by rušily pohled na mozaiku.

Vzorky je pro kontrolní měření nezbytně opakovatelně vkládat na stojan, který bude umístěn mimo pohledy návštěvníků. Materiál stojanu, nerezová ocel, zaručuje trvanlivost monitorovací základny a současně i potřebnou inertnost vůči dějům na kontrolních vzorcích. Na stojanu budou na skleněný panel umístěny držáky vzorků (**obr. 79**). V rychlostní části klimatického tunelu byly provedeny zkoušky, které dokázaly bezpečnost uchycení sklíček pro všechny předpokládatelné směry větru až do rychlostí vichřice, tedy pro rychlosti větru přesahující 100 km/h. Takové měření a test pod zatížením výrazně překračujícím nejhorší místní podmínky poskytnou jistotu bezpečného dlouhodobého provozu, který nepovede ani ke ztrátám vzorků ani k eventualitě, že by sklíčka mohla být z držáku odnesena větrem. Pro splnění tohoto požadavku je držák navržen tak, aby sklíčko svíral ve třech bodech nezbytných pro definované uchopení rovinného objektu. Tyto body jsou realizovány jako zářezy, aby kontakt mezi podložním sklíčkem a držákem byl jednoznačný, současně zářezem bude odváděna dešťová voda a vzorek tak nebude v trvalém kontaktu se zadržovanou vodou. Přítlak vzorku je vyvozen přes pružinu. Pružina samotná je vyrobena z korozi-vzdorné oceli, aby nepodléhala koroznímu poškození a současně nepoškozovala vzorek deponováním korozních produktů na jeho povrch. Držák je navíc navržen tak, aby pákový princip zesiloval účinky pružiny na vzorku.

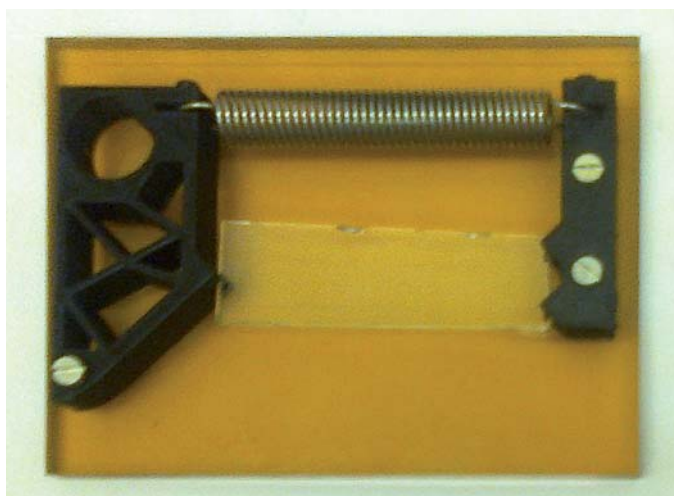
Funkční prototyp držáku vzorku byl vyroben na 3D tiskárně. Ačkoliv toto řešení umožňuje rychlý vývoj konstrukce a ověření platnosti konceptu, konečnou volbou použitého materiálu bude asi hliníková slitina s povlakem, který ještě zvýší její odolnost proti povětrnostním vlivům. Polymerní materiál 3D tiskárny totiž podléhá radiacnímu poškození na denním světle, a proto by hrozilo, že po několika rocích provozu se začnou držáky lámat. Nicméně pro zkoušky v tunelu prototyp vyhovoval.

Výše popsáním umístěním vzorků na stojan bude zajištěna stejná expozice povětrnostním vlivům u vzorků i u mozaiky. Periodickou inspekci vzorků potom lze zajistit podrobnou znalostí změny povlaku v čase a předpovědět čas pro vhodnou intervenci. Současně se vzorky s povlaky realizované receptury lze uvažovat o umístění vzorků konkurenčních receptur pro pomoc při budoucí volbě dalšího povlaku.





**OBRÁZEK 78:** Levá část obrázku ilustruje rozdílné typy povrchů co do jejich odrazivosti. Pravá část ukazuje naměřené „mapy odrazivosti“ pro povlaky různé doby umělého stárnutí. Ostrý hřbet v oblasti shody úhlu dopadu a odrazu pro nestárnutý povlak se rozplývá u vzorku povlaku se šesti týdny umělého stárnutí.



**OBRÁZEK 79:** Prototyp držáku vzorků určený pro zátěžové testy ve větrném tunelu

Monitorovací inspekce bude spočívat v měření reflektance, zjištění drsnosti povrchu, nanoindentačním vyhodnocení mechanických vlastností povrchu a FTIR mikroskopii. Po provedení měření se vzorek umístí zpět na stojan. Optimální situace pro provedení testů je suché

podmračené počasí, kdy je venkovní teplota shodná s obvyklou teplotou v místnosti, aby se „synchronizace“ expozice mozaiky a vzorků co nejméně odlišila. Tento přístup založený na nepřímém sledování povlaku na vzorcích mimo mozaiku přináší mnoho předností a bude v dalším monitorování a přípravě nového systému ochranných povlaků dále rozvíjen.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI „Technologie údržby a konzervace mozaiky Posledního soudu a metody restaurování-konzervování středověkého a archeologického skla“ DF12 P01 OVV 017. Bez spolupráce s V. Kocourem, V. Petráňovou, P. Šaškem, S. Kuznetsovem a dalšími spolupracovníky by nemohla být dokončena.

## Použitá literatura

- Holubová, B., Z. Zlámalová Cílová, I. Kučerová a M. Zlámal. Weatherability of hybrid organic-inorganic silica protective coatings on glass. *Progress in Organic Coatings*, 2015, 88, 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.07.001>
- Kocour, V. a J. Valach. Semiautomatic surface reflectance measurement for monitoring of material weathering. In: Kytýř, D., P. Zlámal a M. Růžička (eds.). *Proceedings of XII-Ith youth symposium on experimental solid mechanics*. Praha: Czech Technical University in Prague, Faculty of Transportation Sciences, 2014, 56-60. ISBN 978-80-01-05556-4.
- Kyzourová, I. Historie oprav a současná údržba mozaiky s Posledním soudem na Zlaté bráně katedrály sv. Víta. *Zprávy památkové péče*, 2010, 70(5), 326-330.
- Piqué, F. a D. Stulík (eds.). *Conservation of the Last Judgment Mosaic, St. Vitus Cathedral, Prague*. Los Angeles: Getty Conservation Institute, 2004. ISBN 978-0-89236-782-5.

# Ontologie a kulturní dědictví

**Jaroslav Valach, Riccardo Cacciotti, Martin Čerňanský, Zdeněk Kouba**

Systém MONDIS (zkratka vytvořená ze slov „MONument Damage Information System“, neboli Informační systém poškození památek) byl vytvořen pro uchování a předávání znalostí o stavu, příčinách jejich poškození i o průběhu a výsledcích oprav nemovitých památek. Systém tedy umožňuje zaznamenat vazby mezi poruchou, vnějším zatížením, materiály a technologiemi stavební památky, ale také provádění metodicky korektních analýz procesů předcházejících vzniku poruch.

Ačkoliv si informační systémy v oblasti ochrany a dokumentace kulturního dědictví vydobyly své místo, jejich primární účel vždy ale leží mimo oblast záznamu poškození. Chybí nástroj pro systematickou klasifikaci poškození, poruch, jejich projevů a příznaků, souvislostí a způsobů intervence u historických nemovitých objektů. Omezená dostupnost znalostí je současně v přímém rozporu s celospolečenským zájmem na udržení hmotných hodnot tvořících oporu historické paměti a zakládajících národní identitu.

MONDIS s Ontologií poškození památek jde nad rámec jejich běžné dokumentace. Jeho cílem je doplnit stávající ontologie možností popsat památkové škody, jejich příčiny a důsledky. Cílem je tedy poskytnout reprezentaci dostatečně bohatou, aby umožnila analýzu mnohostranného oboru historických budov zejména tam, kde se týká relevance škod a zásahů z pohledu ochrany kulturního dědictví. Ontologický model zaznamenává souhrn možných skutečností, které ovlivňují vznik poruchy. Připravená relační síť tak může zaznamenat příčinnost, procesy, následnosti, důsledky speciálních případů, okrajových či počátečních podmínek atd. Je množinou všech smysluplných výroků, které lze o vzniku a souvislostech poruchy vyslovit. Obecnost modelu byla testována proti vybrané množině případů z reálné praxe, aby se prokázala jeho expresivita i bezrozpornost. Znalostní systém umožňuje zaznamenat poznatky, které se výrazně liší svou strukturou.

Jednou z motivací byl neuspokojivý stav daný rozptýleností informací v této oblasti a hledání cest k jeho překonání. Snahou je, aby se mohli všichni aktéři procesu památkové obnovy – od správců a vlastníků památek, pracovníků státní správy přes památkáře až po projektanty a realizátory – opírat ve své činnosti o znalosti představující současný stav poznání v oboru. Aby vytvořený nástroj současně posloužil expertům v terénním průzkumu památek, ale také pomohl studentům restaurátorských a podobných oborů jako interaktivní učební pomůcka.

Mobilní aplikace umožňuje při průzkumu postupovat podle různých scénářů, které odpovídají potřebám pracovníka či profese. Mobilní aplikace využívá univerzálnosti dostupných zařízení - tabletů a chytrých telefonů. K provádění a dokumentaci průzkumných prací

na historickém objektu lze postupovat podle různých scénářů, které odpovídají výstupu práce, jaký se od pracovníka vyžaduje.

Následující části kapitoly vysvětlí, jak ontologický model poškození historického objektu a soubor inženýrských nástrojů mohou přispět k poznání a zlepšit metodiku péče o kulturní dědictví.

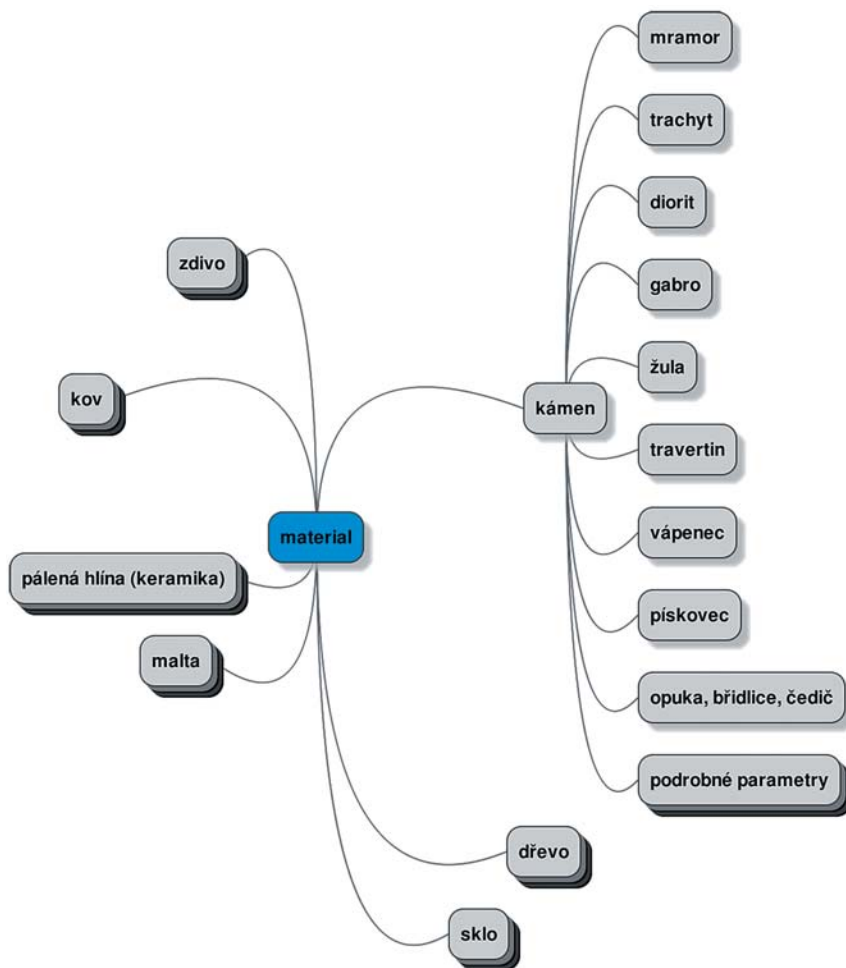
### ***Ontologie vad, poškození a poruch památkových objektů***

Poškození nebo poruchu lze v souladu s jejich definicemi chápat jako pozorovatelný výsledek nepřetržitého nebo dočasného fyzikálního děje, chemického procesu nebo biologického napaření, případně jejich posloupnosti či kombinace. K těmto dochází podle určitého „řádu“ a je možné určit jejich mechanismus (např. deformace vybočením, změna objemu) i původce (např. síla, teplota). Poškození nebo porucha přitom představuje reakci stavebního objektu na různé vnější nebo vnitřní podmínky a vlivy, jímž je po určitou dobu vystaven. Vnitřní podmínky může reprezentovat ztráta pevnosti nebo změna uložení, vnější nárůst zatížení nebo klimatické změny apod. Vady, poškození a poruchy historických staveb zpravidla neznamenají jen nenahraditelné ztráty na kulturním dědictví z hlediska památkové péče, ale jsou rovněž spojené s vysokými náklady na odstranění příčin poruch i samotné opravy. Pro další informace o vytvořené ontologii poškození památek viz Blaško et al. (2012), Cacciotti (2015) a Cacciotti et al. (2015).

Vytvořená ontologie sestává z několika samostatných, avšak vzájemně logicky i programově provázaných částí. Kromě klasifikace vlastních vad, poškození nebo poruch historických objektů včetně údajů ze stavebně technických průzkumů jsou do ontologie zahrnuty rovněž jejich příčiny spočívající v působení prostředí, sil a člověka na konkrétní objekt včetně možných změn v prostoru a čase. Každý objekt je přitom stejně jako ve skutečnosti i v ontologii charakterizován různým řešením z hlediska typologického, architektonického, materiálového, konstrukčního i technologického a doplněn o nezbytné evidenční údaje. V přímé návaznosti na konkrétní vadu, poškození nebo poruchu jsou uváděny i možné preventivní opatření nebo stavební zásahy.

Jednalo se zejména o vztah mezi **prostředím, stavbou** a její existencí v čase. Z hlediska prostředí se jednalo o přímé nebo nepřímé vazby lokality na přírodní podmínky a těmto odpovídající rizika. V případě stavby se jednalo o problematiku stavebních materiálů a z těchto vyrobených prvků, následně různě spojených do konstrukce. Jednalo se přitom zejména o hierarchii konstrukce a jednotlivých konstrukčních prvků plnících primárně nosnou či nenosnou funkci, v případě použitého materiálu o jeho vlastnosti předurčující jeho použití. Analyzován byl rovněž vztah mezi poškozením a jeho původcem, resp. působením procesů a dějů, obdobně mezi poruchou a její příčinou, resp. mechanismem a napětím. V rámci tohoto byla zohledněna rovněž časová posloupnost a možné řetězení poškození nebo poruch, při kterém může být jedna příčinou další.

V úvahu byla vzata rovněž existence objektu ve stále se měnícím prostředí a čase, stejně jako životní cyklus stavby prodlužovaný právě stavebními zásahy. Za tímto účelem byly klasifikovány nejen konstrukční a funkční změny, ale rovněž změny okolního prostředí objektu. Ve vztahu k životnímu cyklu se v první fázi jednalo o výstavbu objektu a okamžité působení prostředí i vnitřních sil, ve druhé o užívání objektu a působení člověka, ve třetí o poškození materiálů a poruchy konstrukčních prvků a ve čtvrté o provizorní opatření a stavební zásahy umožňující další užívání stavby.



**OBRÁZEK 80:** Materiály ve stromovém uspořádání. Zobrazeny jsou pouze hlavní typy, které v případě kamene jsou dále ukázány až na jednotlivé druhy kamenů

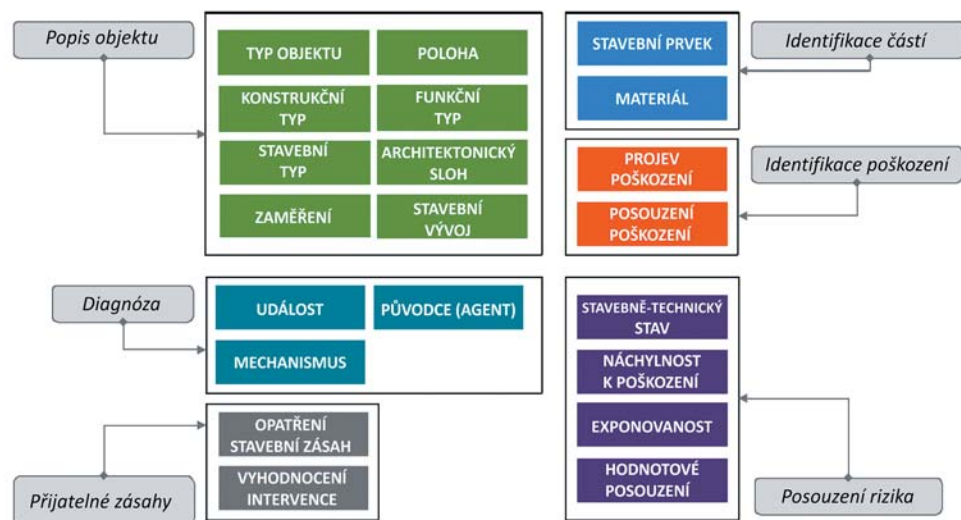
### ***Evidence, lokace a charakteristika objektu vykazujícího poškození nebo poruchu***

Navrhovaná ontologie poškození nebo poruch stavebních objektů je založena na jejich přehledné databázové evidenci včetně jimi dotčených staveb. V rámci jednotně strukturovaného záznamu je každému objektu přiřazen jedinečný **kód** a **název** dovolující jednoznačnou **identifikaci**.

Uvedené identifikační údaje jsou přitom provázány s geografickým informačním systémem (GIS), dovolujícím rovněž jednoznačnou **lokaci** stavebního objektu.

Každému z objektů jsou v ontologii přiřazeny **charakteristiky**, které odpovídají jeho architektonickému a stavebněkonstrukčnímu **řešení**. V souladu s níže uvedeným stromovým uspořádáním se jedná o typ objektu z hlediska typologického (např. věž), funkčního (např. výroba), konstrukčního (např. stěnová) a případně též architektonického slohu (např. baroko).

Každému poškozenému nebo porušenému prvku je možné přiřadit materiál, a to opět výběrem z ontologie (viz **obr. 80**).



OBRÁZEK 81: Blokové schéma hlavních částí ontologie poškození památek

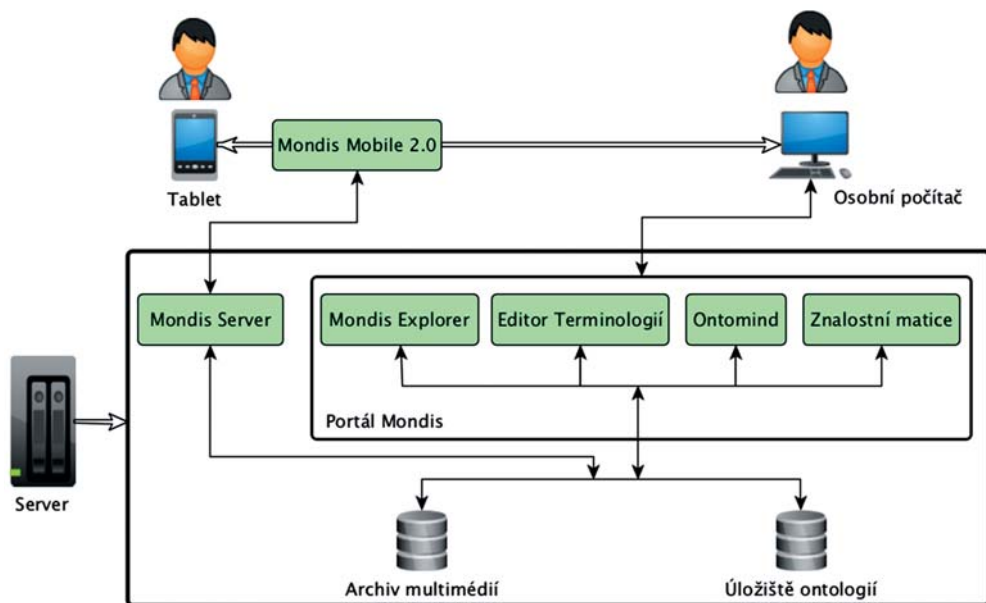
### Datový model a diagram

Pracovní diagram systému MONDIS je založen na ontologické reprezentaci problematiky zaměřené na analýzu vad, poškození a poruch historických objektů shrnuté v Ontologii poškození památek [Monument Damage Ontology (dále MDO)], která je schematicky znázorněna na obr. 81. Současně přitom slouží potřebám exaktního uspořádání znalostí i pokročilého sdílení dat mezi různými skupinami uživatelů. V modelu znázorněném pracovním diagramem jsou uspořádány pojmy reprezentované tzv. třídami, které jsou propojeny pomocí sémantických vztahů a vazeb.

Pojmy užívané v ontologii pro jednotlivé třídy a podtřídy jsou založeny na pevné terminologii umožňující třídění prvků, jevů i vlastností podle vnitřní struktury. Jedná se o tzv. taxonomii, založenou na existující odborné terminologii s možností dalšího rozšiřování nebo zpřesňování uživatele systému. V rámci použité taxonomie jsou odborné termíny uspořádány hierarchicky za účelem jejich kategorizace i pozdějšího výběru podle určujícího kritéria (např. taxonomie stěn na základě jejich konstrukčních vlastností). Taxonomie mohou být získány přímo z odborné literatury, jako jsou například katalogy poškození a poruch (ICOMOS, 2010, Drdácý et al. 2011).

### Systém MONDIS

Projevy poškození stavebních objektů představují pozorovatelné či měřitelné projevy poruch, k nimž dochází v důsledku působení určitého činitele (např. vody), působícího na objekt jistým mechanismem (např. abraze). Formální popis takových poškození vytvářený za účelem pořízení jejich počítačové evidence s možností následného vyhledávání na základě jistých, předem nespécifikovaných kritérií je velmi náročným problémem. Možné typy poškození, poruch, činitelů, které je vyvolávají, a mechanismy, jakými tyto činitele působí na stavební objekt a následně vedou ke vzniku jeho poruchy, jsou velmi různorodé a mají



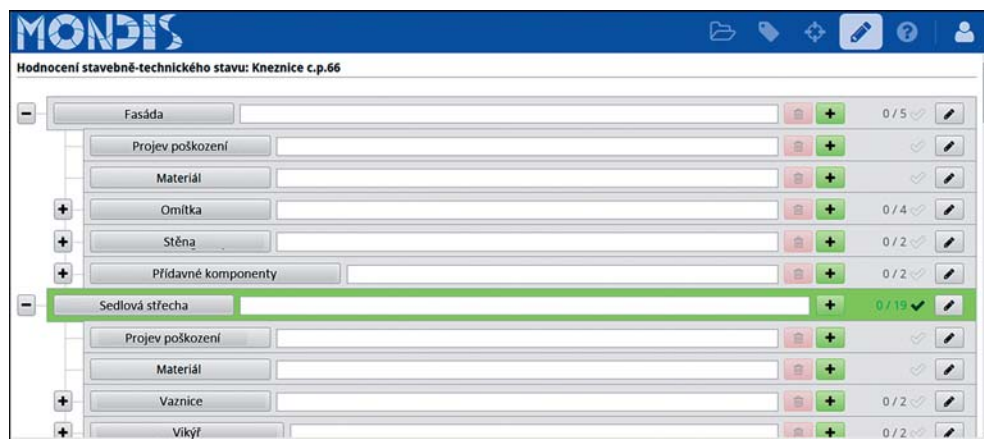
OBRÁZEK 82: Přehledné schéma struktury systému MONDIS

velmi komplikované vzájemné vztahy. Z těchto důvodů nelze použít relační databáze s jejich rigidní strukturou záznamů, ale je nezbytný jiný přístup založený na sémantických technologiích (Chen 1976).

V současnosti dochází k rozvoji třídy technologií souhrnně označovaných pojmem sémantické technologie nebo technologie sémantického webu, jež, jak z názvu vyplývá, kladou důraz na co možná nejexpresivnější explicitní vyjádření sémantiky uchovávaných dat. Tyto technologie vycházejí z myšlenky tzv. sémantického webu, kterou v roce 2001 publikoval spolu s dalšími kolegy ve svém článku Timothy Berners-Lee, který je považován za jednoho z tvůrců moderního webu. Ačkoli článek přináší řadu vizí, které jsou velmi ambiciózní a v rozumně představitelném časovém horizontu stěží naplnitelné, expresivní jazyky pro popis sémantiky dat jsou již v současné době k dispozici a tvoří základ technik souhrnně označovaných výše zmíněným pojmem *sémantické technologie*. V současnosti se objevují na těchto technikách založené a prakticky používané aplikace, mezi něž patří i nástroje vyvinuté v rámci projektu MONDIS.

### Struktura systému MONDIS

Komponenty systému MONDIS lze rozdělit do dvou skupin: aplikace pro pořizování dat a aplikace pro zobrazování a vyhodnocování dat. Do první skupiny patří mobilní aplikace MONDIS Mobile a webová aplikace Ontomind, do druhé skupiny pak patří nástroje MONDIS Explorer, Znalostní matice a Editor terminologií. Informační toky mezi uživatelem a systémem i mezi jednotlivými komponentami systému MONDIS jsou patrné z **obrázku 82**. Uživatel komunikuje se všemi aplikacemi tvořícími systém MONDIS pomocí svého osobního počítače. Mobilní aplikace MONDIS Mobile 2.0 umožňuje provádět popis



OBRÁZEK 83: MONDIS Mobile – vygenerovaný vyhodnocovací formulář

stavebně-technických poruch památkových objektů přímo v terénu. Současně je aplikace upravena tak, aby ji bylo možné plnohodnotně používat i v prostředí internetového prohlížeče na osobním počítači a uživatel mohl práci dokončit v pohodlí své pracovny.

Ostatní součásti systému MONDIS jsou integrovány do webového portálu a jsou aplikacemi webovými, běží na serveru a uživatel je ovládá pomocí internetového prohlížeče svého osobního počítače. Patří mezi ně:

*MONDIS Explorer*, který poskytuje grafické uživatelské rozhraní pro prohlížení záznamů o poruchách. Umožňuje pro jeden záznam vyhledávat jiné záznamy, jež jsou danému záznamu podobné. Další důležitou funkcí aplikace *MONDIS Explorer* je podpora schvalovacího procesu (angl. *workflow*). Uživatel pořídí v prostředí mobilní aplikace *MONDIS Mobile* záznam o poruše a následně jej nabídne ke zveřejnění na portálu *MONDIS*. Uživatel, který má oprávnění takovou publikaci schválit, pak rozhodne, zda může být záznam zveřejněn, či zda má být autorovi vrácen k dopracování. Z tohoto pohledu má aplikace *MONDIS Explorer* nezastupitelnou úlohu při řízení kvality pořizovaných dat.

Aplikace označená názvem *Editor Terminologií* je určena pro definici pojmů a taxonomií, tj. hierarchií pojmů ve smyslu relací *býti obecnějším*, respektive *býti speciálnějším* pojmem včetně pojmenování takovýchto pojmů v různých jazycích. Tento nástroj je tedy důležitý pro tvorbu vícejazyčných ontologií, kdy je pojem reprezentován nezávisle na jeho pojmenování v konkrétním jazyce.

Aplikace *Ontomind* je určena pro pořízení podrobného ontologického popisu poruchy, který se opírá o rozsáhlou ontologii, vyvinutou v rámci projektu *MONDIS*. Tato ontologie definuje terminologii týkající se poruch, jejich projevů, činitelů majících vliv na vznik a rozvoj poruchy a mechanismů, jakými tyto činitelé vyvolávají vznik poruchy a působí na její další vývoj.

### ***Komponenty pro vkládání informací a znalostí***

Komponenty pro vkládání informací a znalostí do systému *MONDIS* jsou obecně zaměřeny na pořizování dat. Konkrétně jsou určeny pro pořizování dat popisujících poruchy



památkových objektů buď přímo v terénu získaných vizuální inspekci a měřeními základních parametrů poruch, nebo pro zadání specifických znalostí, jež jsou relevantní pro vyšetřovaný památkový objekt, ale jež není možné nebo účelné pořizovat přímo v terénu. Za účelem pořizování popisu poruch v terénu byla vyvinuta multiplatformní mobilní aplikace MONDIS Mobile, určená pro tablety a chytré mobilní telefony, ale také pro osobní počítače. S ohledem na tyto požadavky byla aplikace MONDIS Mobile navržena jako platformově nezávislá HTML 5 aplikace.

Při návrhu aplikace si její autoři povšimli skutečnosti, že existuje řada metodik monitoringu stavebního stavu památek počínaje metodikou NPÚ přes metodiku Pamiatkového úradu Slovenskej republiky až po metodiku organizace Monumentenwacht, jež je používána zejména ve Flandrech a v Nizozemsku. Vývojový tým se proto rozhodl navrhnout mobilní aplikaci co nejobecněji, tak aby ji bylo bez nutnosti úprav vlastního programu možné využít pro monitoring stavebního stavu památek dle nejrůznějších metodik. Konkrétní metodika se popíše ontologií, z níž se vygeneruje tzv. formální definice karty, jež se nahraje do mobilního zařízení. Před vytvořením konkrétního záznamu o posouzení stavebního stavu určitého objektu v mobilní aplikaci je třeba, aby uživatel zvolil jeden z dostupných typů karty, čímž vyjádří, podle které z implementovaných metodik chce stav objektu posuzovat. Z definice karty zadaného typu pak mobilní aplikace vygeneruje formulář odpovídající příslušné metodice.

Mobilní aplikace poskytuje prostředky pro určení lokace objektu několika způsoby – od určení zeměpisných souřadnic pomocí GPS modulu zabudovaného v mobilním zařízení přes adresu objektu až po identifikátory systémů PaGIS a Monumnet NPÚ. Aplikace je pak schopna poskytovat celou šíři své funkcionality (až na malé výjimky, jako je přístup ke katastrálním mapám) v off-line režimu.

Záznam o poruše je strukturovaným dokumentem (**obr. 83** ukazuje částečně vyplněný formulář zaznamenávající stav objektu). Na všech úrovních jeho struktury je možné ho doplnit multimediální obsahem – nejčastěji fotografiemi, videocpoty nebo audionahrávkami, jež jsou pro danou úroveň struktury dokumentu relevantní. Lze přitom využít integrovaného fotoaparátu a mikrofону mobilního zařízení, na němž je aplikace provozována, nebo lze připojit multimediální obsah z libovolného elektronického archivu, k němuž má autor přístup.

Pořízené záznamy o poruchách může jejich autor nahrát na server projektu MONDIS. Při návrhu koncepce celého systému se řešitelský tým snažil podpořit scénář, kdy se na monitoring technického stavu kulturních památek podílejí dobrovolníci. Bylo zřejmé, že systém MONDIS je nezbytné vybavit vhodným nástrojem pro řízení kvality shromažďovaných dat. Byl proto navržen a následně vyvinut nástroj pro řízení schvalovacího procesu. Autor záznamu může nově pořízený záznam po jeho nahrání na server přihlásit do schvalovacího procesu. Záznam se tedy zveřejní teprve po jeho úspěšném průchodu schvalovacím procesem.

### **Vizualizační nástroje systému MONDIS**

Vizualizační nástroje systému MONDIS podporují nejen zobrazování záznamů o poruše včetně jejich sémantického obohacení, jež uživatel vytvořil za pomoci výše popsaného systému Ontomind, ale i další zpracování včetně sémantického vyhledávání v záznamech. Jsou jimi nástroje Ontomind, MONDIS Explorer a Knowledge Matrix neboli znalostní matice.

Aplikace *Ontomind* prezentuje ontologii ve formě modifikované myšlenkové mapy a umožňuje doménovým expertům po krátkém zaškolení pořizovat ontologické popisy

Obecní dvůr – MONDIS report v2.0

GPS souřadnice  
50.08502100891905,14.418492007378862

Adresa  
U obecního dvora praha1/11000

Vyhledávání  
Vyhledávaný text  
Typ poruchy  
Konstrukční typ  
Hledat

Metrika  
Metrika podobnosti  
Vzrůstání  
Setřít

PŘEHLED PORUCH

Typ poruchy	Parametry	Možná řešení	Galérie
Prasklina	Délka: 100mm Směr: vodorovný		
Usazenina	Tloušťka: 2mm	K.M.	
Deformace	Zivnost: nízká	O.P.	

MONDIS REPORT

Kritérium	Úroveň	Popis	Galérie
Příhradová střecha	Nízká histor. hodnota		
Souhrn		Posuzován pouze exteriér	
Stěna (do ulice)	Střední histor. hodnota		
Stěna (vstupní)	Střední histor. hodnota		

DALŠÍ ÚDAJE  
Vývoj objektu  
Lokační údaje

Počet nalezených záznamů (4)

Karlův most  
Petr Klěm  
2014-04-13 20:56:20.08

Kostel Sv. Hatala  
Riccardo Cacciotti  
2014-04-11 13:59:50.981

Obecní dvůr  
Riccardo Cacciotti  
2014-04-11 14:00:20.077

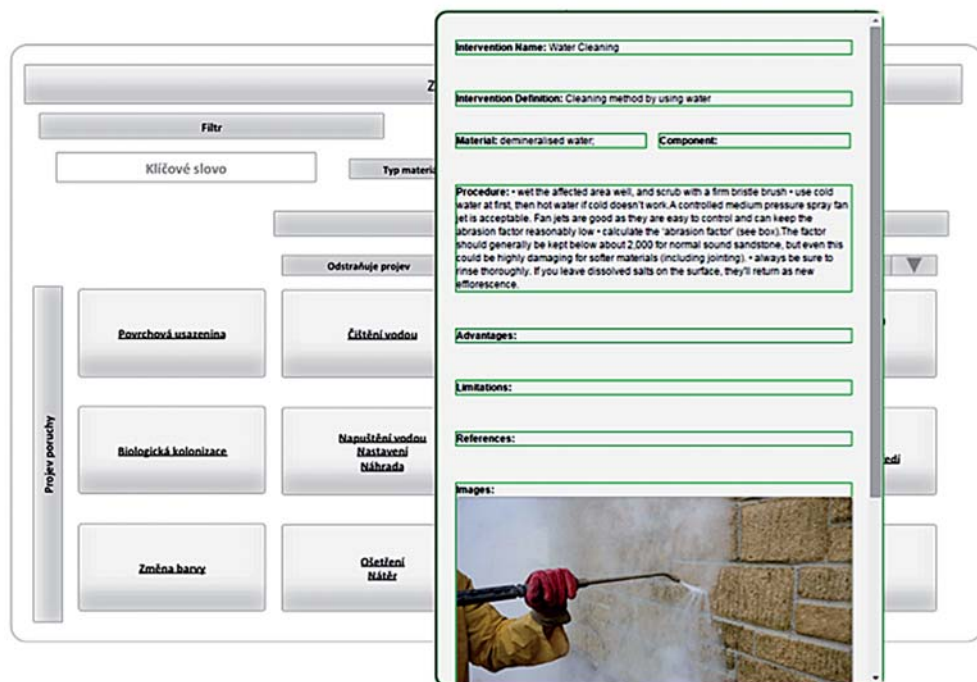
Kostel Sv. Jiljí  
Riccardo Cacciotti  
2014-08-12 13:37:58.633

OBRÁZEK 84: MONDIS explorer

poruch a následných intervencí, které mají vést k odstranění poruchy. Ontomind zobrazuje ontologické mapování záznamů pořízených při inspekci určitého památkového objektu formou jednoduché stromové struktury s uzly dvou typů. Jedním typem uzlu je „pojmem“, druhým typem uzlu je „sémantická vazba“. Pokud procházíme libovolnou cestu tohoto stromu, procházíme střídavě „pojmovými“ a „vazebními“ uzly. Data získaná během inspekce pomocí mobilní aplikace MONDIS Mobile jsou mapována na myšlenkovou mapu zviditelňující řídicí vztahy v popisované skutečnosti.

Hlavní komponentou grafického rozhraní pro uživatele je MONDIS Explorer, který nabízí uživateli prostředky pro zobrazení záznamů, pokročilé vyhledávání, porovnávání záznamů a vyhledávání podobných záznamů (obr. 84). Podobnost záznamů je definována několika metrikami. Uživatel zvolí hledisko, klíč, podle kterého chce vyhledat podobné záznamy, a MONDIS Explorer mu následně nabídne seznam v daném smyslu podobných záznamů seřazených podle podobnosti vyplývající ze zvoleného klíče.

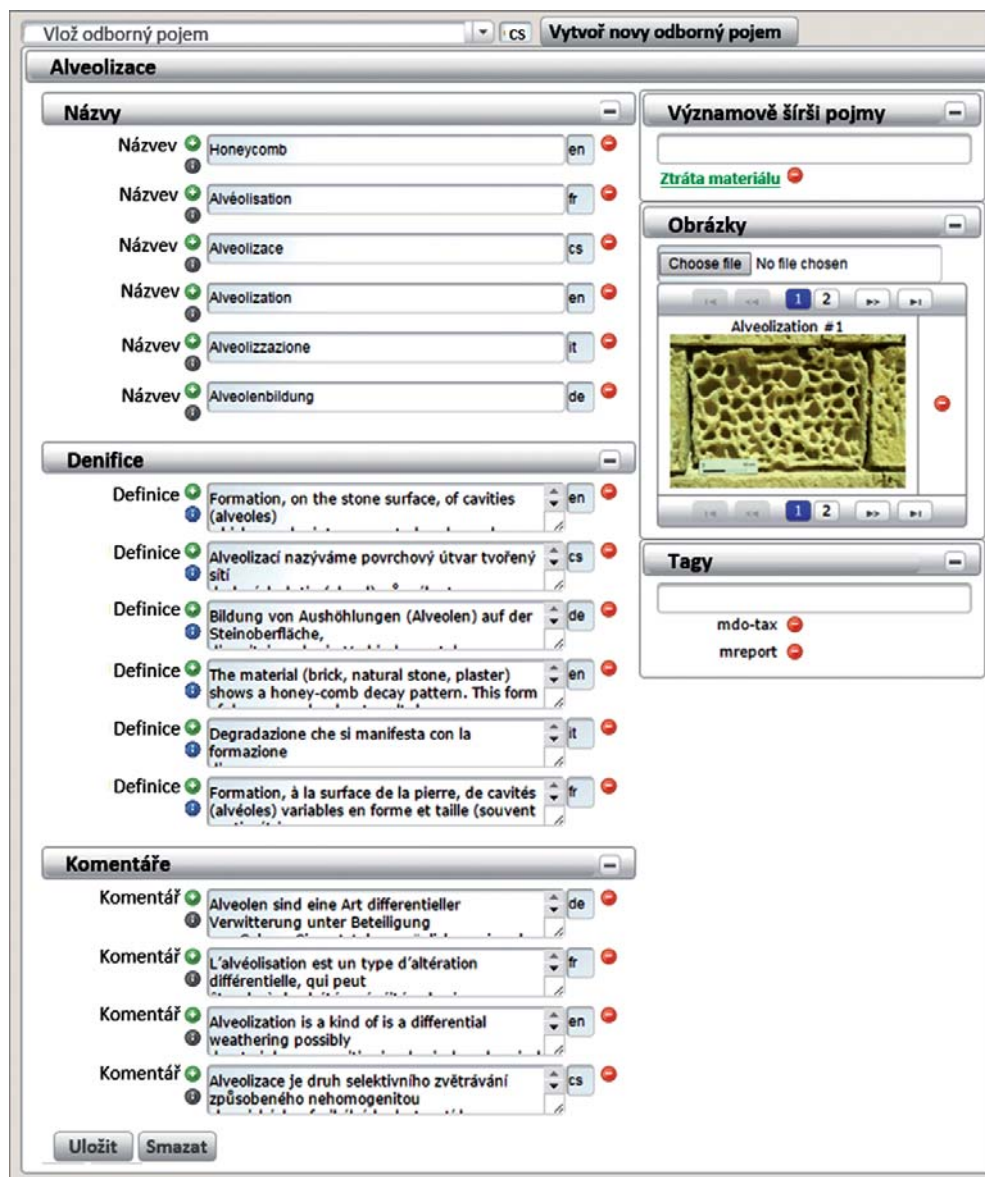
Znalostní matice je webová aplikace, která umožňuje studovat dostupné znalosti týkající se diagnózy evidovaných poruch památkových objektů a jejich možná řešení. Je zaměřena na uživatele, kteří nejsou odborníky v oblasti procesů na podporu rozhodování. Umožňuje sdílet základní informace o technikách a metodách různých typů intervencí včetně zhodnocení jejich výhod a nevýhod. Nástroj je postaven na diagnostické části ontologie MDO, v níž je modelován pozorovatelný a detekovatelný symptom památkového objektu (nazývaný projev poruchy – např. prasklina, úbytek materiálu) ve vazbě na jeden nebo kombinaci několika jej způsobujících poruchových procesů (nazývaných mechanismy – např. ohýbání, kapilární elevace) vyvolávaných jedním nebo více faktory (nazývanými činitelé – voda, teplota).



OBRÁZEK 85: Znalostní matice

Takové chápání celého procesu poškozujícího památkový objekt dovoluje identifikovat různé typologie nápravných opatření jako intervence odstraňující pouze projev poruchy, případně intervence, které zastavují nebo zeslabují vliv poruchového procesu, a konečně intervence odstraňující činitele, který poruchový proces vyvolává. Na těchto principech je založeno grafické uživatelské rozhraní Znalostní matice, jehož hlavním prvkem je interaktivní matice, podél jejíž svislé osy jsou vypsány možné projevy poruch, zatímco její jednotlivé buňky zobrazují možné intervence hierarchicky organizované podle jejich typologie. Pro každou řádku matice (řádka reprezentuje projev poruchy) jsou ve třech sloupcích uvedeny tři různé množiny intervencí. První sloupec zobrazuje intervence, které vedou k pouhému odstranění projevu poruchy (tj. symptomu), druhý sloupec uvádí intervence, jež zastavují mechanismus poruchového procesu, a konečně třetí sloupec uvádí intervence, jež odstraňují působení činitele vyvolávajícího poruchový proces. Kliknutí na některou z intervencí uvedených v některé z buněk matice vyvolá zobrazení vysvětlující, jež uživateli poskytne informaci o technologickém postupu provedení dané intervence, seznam materiálu a nástrojů potřebných k provedení zásahu, stručný přehled výhod, nevýhod a omezení dané intervence a konečně galerii relevantních obrázků nebo fotografií (**obr. 85**).

Editor terminologie je webová aplikace navržena pro definování a úpravy terminologie používané všemi komponentami systému MONDIS. V módu dovolujícím pouze čtení umožňuje uživatelské rozhraní Editoru terminologií zobrazovat definice pojmů, jejich synonym, překlady jejich názvů do různých jazyků, ilustrační obrázky a umístění daného pojmu v odpovídající taxonomii pojmů. Zaregistrovaní uživatelé mohou aplikaci používat plnohodnotně



OBRÁZEK 86: Editor terminologie

– mají k dispozici tyto další funkcionalita: (i) vytvoření nového pojmu, (ii) vkládání cizojazyčných překladů a synonym, (iii) vkládání vícenásobných definic, (iv) vkládání komentářů k definici či překladu pojmu, (v) definování bezprostředního obecnějšího pojmu (např. pojem *dřevo* je tak přiřazen obecnějšímu pojmu *přírodní organický materiál*), čímž je určena pozice daného pojmu v taxonomickém uspořádání, (vi) nahrání a přiřazení ilustračních obrázků (typicky fotografií) a konečně (vii) přiřazení značek (angl. *tag*) jako dodatečných referencí na pojem, jež umožňují jeho začlenění do uživatelsky definovaných skupin pojmů představujících jakýsi

terminologický profil vhodný pro určitou aplikaci (**obr. 86**). Údaje vložené do terminologického editoru jsou opatřeny odkazem na zdroj (např. odborná monografie – např. ICOMOS 2010, časopisecký článek, fotografický archiv), který byl použit při definici daného pojmu.

## Závěr

Systém MONDIS kombinuje techniky ontologického inženýrství s požadavky na správu dat a je unikátní aplikací technologií Sémantického Webu v oblasti ochrany kulturního dědictví. Výsledkem je referenční ontologická platforma, na níž je postavena funkcionalita všech zúčastněných znalostních nástrojů. MONDIS poskytuje jednotné prostředí pro pořizování, sdílení a další zpracování dat o stavebně-technickém stavu památkových objektů. Ve srovnání s množstvím existujících různorodých informačních systémů je MONDIS určen nikoliv k jedinému účelu, nýbrž k provádění řady vzájemně svázaných dokumentačních úkolů v oblasti péče o stavební památky od dokumentace objektu samotného, inspekce jeho poruch a poškození, monitorování, měření a provádění testů až po návrh vhodného typu intervence.

Samostatným výsledkem je nové pojetí popisu poškození, které lépe vyhovuje různorodé povaze poruch, jež se vyskytují v památkových objektech, než jiné inforatické nástroje v památkové péči. Toto pojetí vychází z ontologického modelu poškození, jako ohniska, do kterého se průzkum zaciluje a ve kterém se protínají rozhodující elementy modelu. Pouhý model poškození by však byl bez užítku, kdyby nebyl k dispozici nástroj na jeho používání a praktické provádění v podobě aplikací vytvořených pro zadávání i zobrazování dat. Aplikace MONDIS Mobile tedy umožňuje uživatelům přímo v terénu provádět stavební průzkum podle uživatelem zažitého postupu, který lze přeměnit na interaktivní zadávací formuláře. Autoři věří, že vytvořili užitečný nástroj pro popis a analýzu poškození, ale skutečný život systému vdechne až aktivní komunita uživatelů a zájemců. Záleží na zainteresovaných stranách – ať už to jsou správci a majitelé historických objektů, nebo vykonavatelé péče o památky, restaurátoři a konzervátoři, studenti – zda se znalostní systém naplní znalostí, pro jejíž přijetí a vyjádření byl vytvořen. Bez sdílených informací, ukazujících památkovou péči jako živý a moderní obor, není možné systém dovršit. Proto jsou potencionální uživatelé zváni k vyzkoušení systému a k vytvoření a sdílení informací o historickém dědictví, jehož zachování by mělo být prioritou vyspělé kulturní společnosti.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu DF11P01OVV002 „Poruchy nemovitých památek: znalostní systém pro analýzu, návrh intervencí a prevenci“ podporovaného MK ČR. Bez spolupráce s M. Blaškem, P. Křemenem, J. Kufnerem, M. Šmídem a dalšími spolupracovníky by nemohla být dokončena.

## Použitá literatura

Berners-Lee T., J. Hendler a O. Lassila. The Semantic Web: A new form of Web content that is meaningful to computers will unleash a revolution of new possibilities. *Scientific American* [on-line]. 2001, 284(5) [cit. 15.12.2015].  
Dostupné z: <http://www.scientificamerican.com/article/the-semantic-web/>

- Blaško, M., R. Cacciotti, P. Křemen a Z. Kouba. Monument damage ontology. In: Ioannides, M. et al. (eds.), *Progress in Cultural Heritage Preservation*. Heidelberg: Springer, 2012, 221-230. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-642-34234-9_22)
- Cacciotti, R. Integrated knowledge-based tools for documenting and monitoring damages to built heritage. In: Yen, Y.-N., K.-H. Weng a H.-M. Cheng (eds.). *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XL-5/W7. Göttingen: Copernicus Publications, 2015, 57-63. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-5-W7-57-2015>
- Cacciotti, R., M. Blaško a J. Valach. A diagnostic ontological model for damages to historical constructions. *Journal of Cultural Heritage*. 2015, 16(1), 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.02.002>
- Cacciotti, R., J. Valach, P. Kuncš, M. Čerňanský, M. Blaško a P. Křemen. MONument Damage Information System (MONDIS). An ontological approach to cultural heritage documentation. In: Grussenmeyer, P. (ed.). *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. II-5/W1. Göttingen: Copernicus Publications, 2013, 55-60. <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-5-W1-55-2013>
- Chen, P. P. The entity-relationship model - toward a unified view of data. *ACM Transactions on Database Systems*, 1976, 1(1), 9-36.
- Snethlage, R. et al. ICOMOS, ISCS: *Illustrated glossary on stone deterioration patterns*. Monuments and sites XV. Paris: ICOMOS-International Documentation Centre, 2010. ISBN 978-2-918086-00-0.

# Teplotní vlivy na degradaci památek

**Pavel Beran**

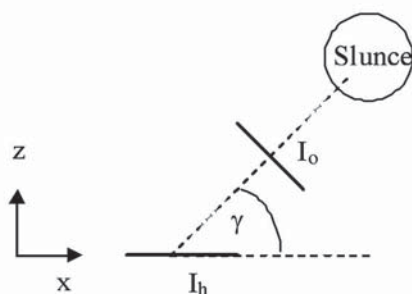
Řada historických objektů jak z období starověku (Egypt, Mezopotámie, starověké Řecko a Řím), tak z období středověku se dochovala až do dnešní doby. V podstatě všechny tyto stavby jsou vytvořeny z kamene nebo z cihel, které nepodléhají biologickým škůdcům a jen pomalu podléhají účinkům zvětrávání. Stavby postavené z nekvalitních materiálů nebo nevhodně navržené na účinky zatížení se do dnešní doby nedochovaly. U některých staveb se nevhodný návrh nosné konstrukce z hlediska teplotního namáhání projevil opakovanými opravami v přibližně stejných časových intervalech (např. chrám sv. Barbory v Kutné Hoře) (Fajman a Kott 2006, Fajman et al. 2007). Snaha společnosti o zachování historických staveb se projevuje především jejich ochranou před nevhodnými stavebními úpravami, případně jejich vhodnou renovací. U mnohých památek dochází ke sledování změn na konstrukcích nebo povrchích, a například i monitoringu posunů jednotlivých nosných konstrukcí. Teoretické modelování historických konstrukcí a reálných vlivů teploty na ně může pomoci k lepšímu porozumění dějů, které porušují historické objekty. Porovnáváním výsledků teoretických modelů s výsledky monitorování konstrukcí získáváme lepší informace o původu trvalých nebo dočasných změn. V praxi se často setkáváme s problémem porušení historického zdiva vlivem působení povětrnosti, především opakujících se změn teploty. Analýza vlivu dlouhodobého působení změny teploty na historické zdivo může pomoci nalézt nejvhodnější způsob opravy konkrétního historického zdiva například výběrem správné malty nebo termínu opravy.

## Zatížení OD teploty

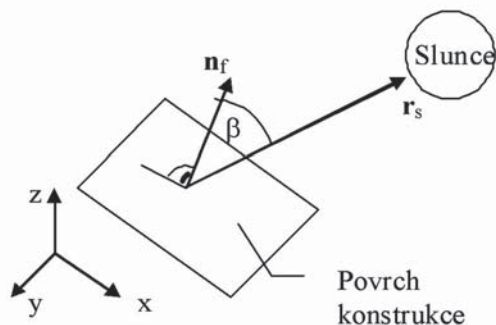
Pro získání co nejpravdivějších výsledků je nutno zatížit teoretický model tak, aby byly teplotní vlivy na konstrukci simulované vhodným způsobem. Teplotu povrchu konstrukce ovlivňuje několik faktorů, jsou to například: teplota a rychlost proudění vzduchu v jejím okolí, intenzita dopadajícího slunečního záření, odpařování vody z jejího povrchu a z jejích pórů, kondenzace vodní páry na jejím povrchu a v jejích pórech, adsorpce vodní páry, desorpce vody. Z těchto vlivů byly v numerických simulacích použity nejvýznamnější vlivy, a to teplota vzduchu v okolí konstrukce a intenzita globálního slunečního záření.

Pro sledování degradačních procesů způsobených teplotou byl vytvořen teoretický model formulace okrajových podmínek, který spolu s numerickými modely konstrukce nebo

Svislý řez



Prostorové schéma



OBRÁZEK 87: Schémata pro výpočet absorbovaného výkonu

její části dokáže simulovat reálné rozložení teplot. K tomuto účelu bylo použito numerické řešení parciální diferenciální rovnice vedení tepla (8) (Mills 1999):

$$\rho_c (\partial T / \partial t) = \lambda \nabla^2 T + Q_v''' \quad (8)$$

Přestup tepla ze vzduchu do konstrukce a opačně byl simulován dle následující rovnice (9):

$$q = h (T_v - T_p) \quad (9)$$

$h$  součinitel přestupu tepla – ( $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ ), [4, 5]

$q$  hustota tepelného toku – ( $\text{W m}^{-2}$ ), má-li kladné znaménko, směřuje tok dovnitř konstrukce (ohřívá ji)

$T_v$  teplota vzduchu v okolí konstrukce – ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_p$  teplota povrchu konstrukce – ( $^{\circ}\text{C}$ )

V Praze je měřena pouze intenzita globálního slunečního záření. Největší složkou globálního záření je zpravidla přímé krátkovlnné záření, což platí zejména za jasných dnů. Proto bylo uvažováno, že veškeré záření dopadající na povrch konstrukce je záření přímé. Výpočet této okrajové podmínky je popsán následujícími rovnicemi. Princip je schematicky znázorněn na obr. 87.

$$i_0 = i_h / \sin \gamma \quad (10)$$

$i_0$  intenzita (tepelný tok) slunečního záření dopadajícího na povrch kolmý ke směru slunečního záření – ( $\text{W/m}^2$ )

$i_h$  intenzita (tepelný tok) slunečního záření dopadajícího na vodorovný povrch – ( $\text{W/m}^2$ )

$\gamma$  výška Slunce nad obzorem

$$\cos \beta = \mathbf{n}_f \mathbf{r}_s \quad (11)$$

$\mathbf{n}_f$  jednotkový vektor normály příslušného povrchu

$\mathbf{r}_s$  jednotkový vektor polohy Slunce na obloze

$\cos \beta$  hodnota skalárního součinu mezi vektorem normály povrchu a vektorem polohy Slunce na obloze



$$q_a = \alpha_p i_0 \cos \beta \quad (12)$$

$\alpha_p$  součinitel pohltivosti povrchu konstrukce – (-)

$q_a$  tepelný tok absorbovaný povrchem konstrukce – (W/m<sup>2</sup>)

Přímé sluneční záření nedopadá na povrch konstrukce, je-li povrch zastíněn. V tomto případě byla ve výpočtu intenzita tepelného toku absorbovaného povrchem konstrukce nahrazena nulovou hodnotou. Radiační bilance na povrchu konstrukce může být kladná, nulová nebo záporná (Bednář a Kopáček 2005). Okrajová podmínka předepsaná rovnicí (12) může nabývat nulové nebo kladné hodnoty a popisuje radiační bilanci na povrchu konstrukce pouze během dne.

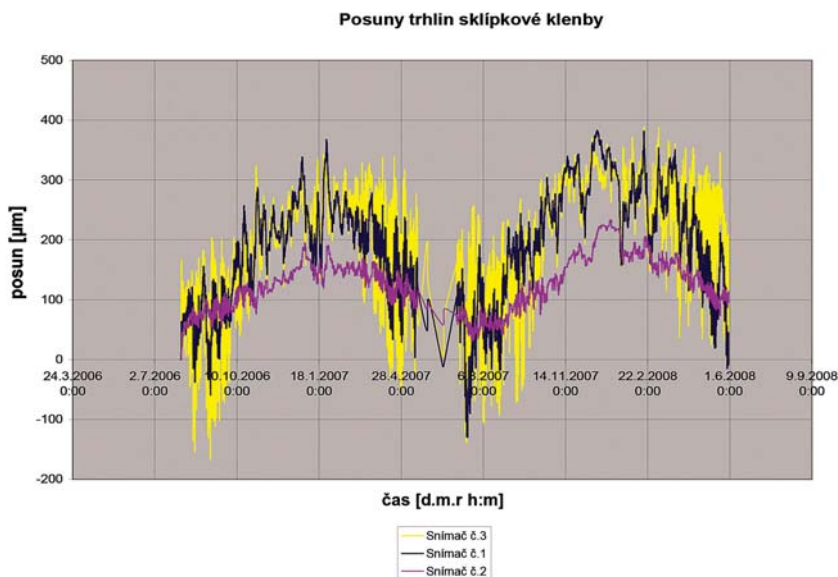
## Monitorování a numerické modelování vlivu teploty

Historické objekty mívají řadu poruch a trhlin. Pro zjištění, zda nedochází ke zvětšování šířky trhlin a zhoršení poruch se může provádět monitoring historických konstrukcí. U významných památek se někdy provádí monitoring i pro včasné zjištění případného degradačního procesu. Během monitoringu se měří například změna šířky trhlin, změna vzdálenosti mezi monitorovacími body v čase. Monitoring se provádí většinou po dlouhou dobu, během níž dochází ke změnám teploty konstrukce. Změna teploty konstrukce způsobí změnu rozměrů konstrukce a tím dochází také ke změně šířky trhlin. Pokud je opomenut vliv teploty na možnou změnu šířky trhlin nebo vzdálenost mezi monitorovacími body, může dojít k falešnému poplachu a neadekvátním zásahům do památky. Během dlouholetých monitoringů trhlin bylo častokrát zjištěno, že šířka trhlin koresponduje se změnou teploty v interiéru a exteriéru. Zároveň však může docházet k postupnému zvětšování šířky trhlin, které lze vyvodit až z několikaletého sledování. Jako příklad je uveden záznam ze snímačů umístěných na sklípkové klenbě v klášteře v Kadani – **obr. 88 a 89** (Drdácký a Zíma 2008).

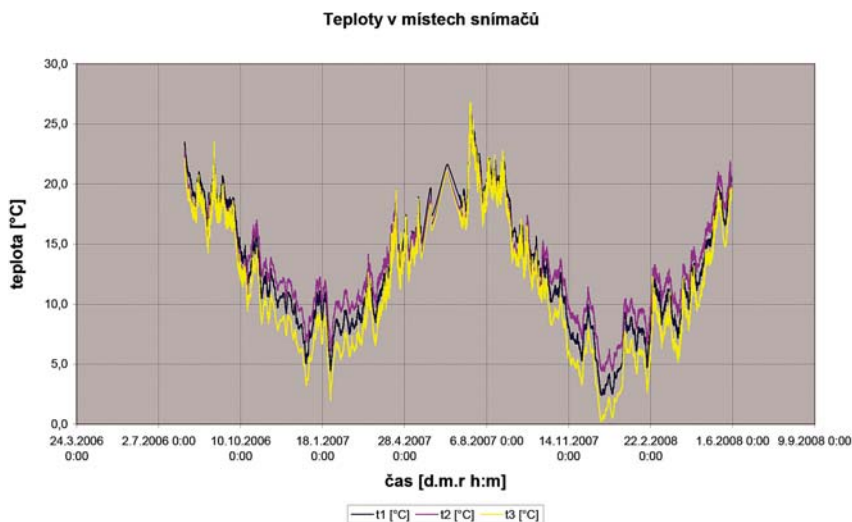
U významných památek může probíhat sledování nosné konstrukce z důvodu včasné detekce možného degradačního procesu. Příkladem takové konstrukce je katedrála sv. Víta, na které probíhal monitoring nosné konstrukce po řadu let. Sledování nosné konstrukce probíhalo pomocí měření vzdáleností geodetickými metodami mezi monitorovacími body. Během dlouhodobého sledování konstrukce bylo zjištěno, že se vzdálenosti mezi body mění. Z tohoto důvodu byl vytvořen numerický model jednoho pole katedrály sv. Víta, pomocí něž byly vypočteny teoretické deformace konstrukce od teploty mezi jednotlivými geodetickými měřeními vzdáleností. Tyto výsledky pomohly lépe porozumět chování katedrály se změnou teploty konstrukce a pomohly odlišit vratné deformace od teploty od nevratných deformací způsobených jinými vlivy.

Postup výpočtu deformací konstrukce od teploty byl následující:

1. Byly získány údaje o teplotě vzduchu v exteriéru a interiéru katedrály sv. Víta v období dvou týdnů před jednotlivými geodetickými měřeními vzdáleností. Zároveň byly získány údaje o intenzitě globálního slunečního záření v Praze. Období dvou týdnů vychází z teplotní setrvačnosti konstrukce katedrály sv. Víta. Teplotní setrvačnost jednotlivých konstrukčních prvků katedrály je max. 14 dnů. To znamená, že teplota konstrukce je ovlivněna počasím v exteriéru a teplotou vzduchu v interiéru po dobu maximálně dvou týdnů.

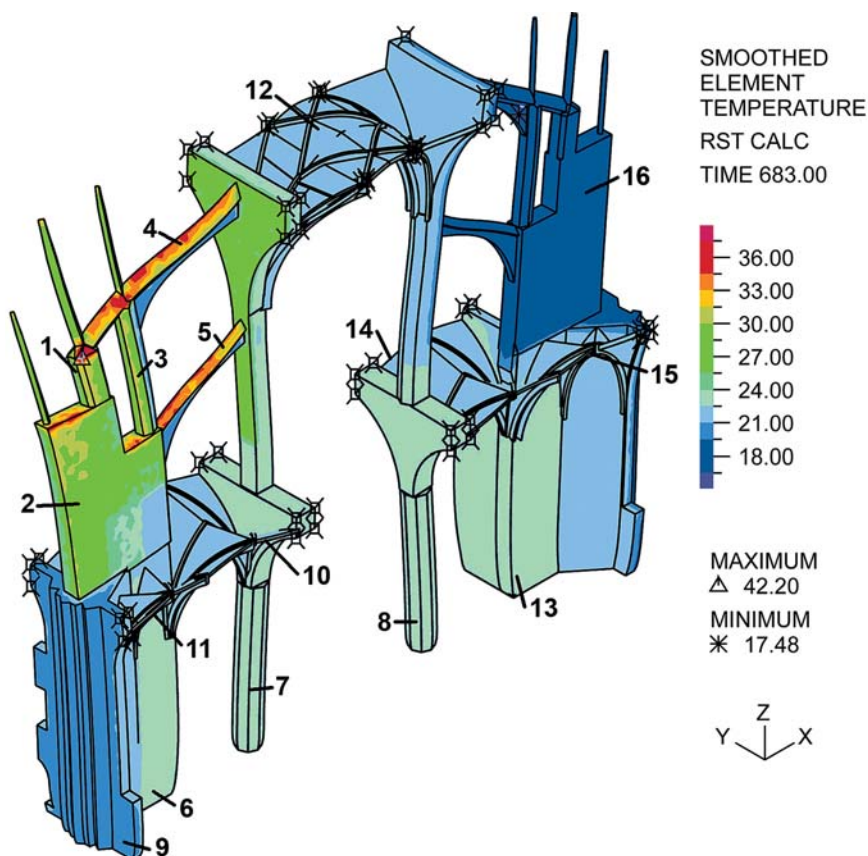


**OBRAZEK 88:** Posun trhliny sklípkové klenby kláštera v Kadani



**OBRAZEK 89:** Teploty v místech snímačů – klášter v Kadani

2. Byl vytvořen numerický model jednoho pole katedrály sv. Víta (**obr. 90**). Byly vypočteny hodnoty intenzity pohlceného slunečního záření jednotlivými povrchy v čase. Zároveň byla k jednotlivým povrchům konstrukce přiřazena teplota vzduchu v exteriéru, respektive v interiéru v čase. Byl proveden výpočet rozložení teplot v konstrukci metodou konečných prvků. Vypočtené teploty byly v několika případech porovnány s naměřenými hodnotami teplot. Výsledky z výpočtu teplot byly v dobré shodě s výsledky měření teplot.

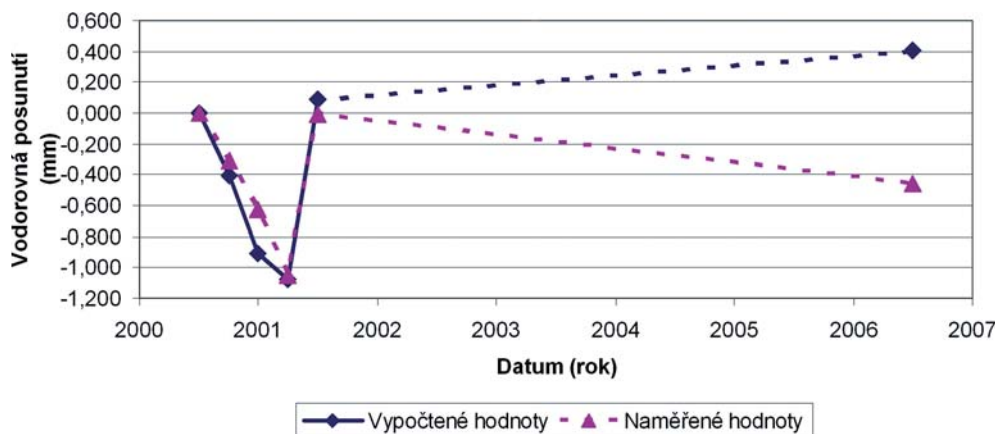


**OBRÁZEK 90:** 3D numerický model jednoho pole katedrály sv. Víta, rozložení teplot a charakter deformace dne 2. července 2006 v 11:00.

Legenda: 1 – krátký sloup jižního opěrného systému, 2 – hlavní pilíř jižního opěrného systému, 3 – dlouhý sloup opěrného systému, 4 – horní opěrný oblouk jižního opěrného systému, 5 – spodní opěrný oblouk jižního opěrného systému, 6 – jižní stěna mezi kaplemi, 7 – jižní sloup hlavní lodi, 8 – severní sloup hlavní lodi, 9 – jižní obvodová stěna v úrovni „přízemí“, 10 – klenba ochozu na jižní straně katedrály, 11 – klenba kaple na jižní straně katedrály, 12 – klenba hlavní lodi, 13 – stěna mezi kaplí a starou zákristíí, 14 – klenba ochozu na severní straně katedrály, 15 – klenba kaple, 16 – hlavní pilíř severního opěrného systému (severní opěrný systém).

3. Rozložení teplot vstupovalo do výpočtu deformací konstrukce jako zatížení. Pro výpočet deformací konstrukce byla použita metoda konečných prvků a lineární pružný materiálový model konstrukce. Tímto postupem byly vypočteny vratné deformace konstrukce od teploty.

Z výsledků porovnání vypočtených a naměřených deformací konstrukce vyplývá, že u severního sloupu ve staré části katedrály sv. Víta došlo k nevratnému náklonu sloupu mezi lety 2001 a 2006 (**obr. 91**). Hodnota deformace však nepředstavuje významné zhoršení technického stavu katedrály, pouze poskytuje informaci, že je sloup potřeba nadále bedlivě sledovat. Tato metoda numerické analýzy pomáhá k lepšímu porozumění chování významných konstrukcí (Beran et al. 2010).



**OBRAZEK 91:** Porovnání vypočtených a naměřených hodnot vodorovných posunů mezi monitorovacími body na severním sloupu

## Interakce subtilních a masivních částí konstrukce

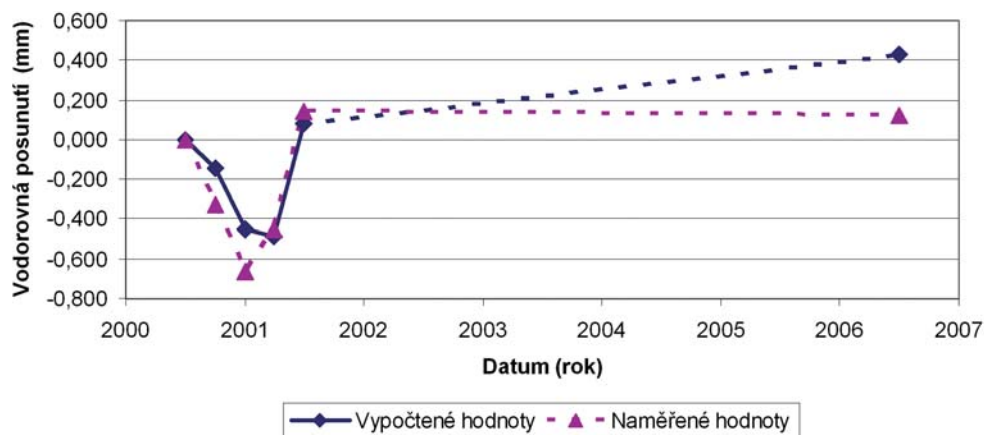
Teoretické modelování konstrukcí s využitím správné simulace vlivu teploty může pomoci k analýze problému i v případě menších částí nebo detailů konstrukcí. Negativní vliv opakující se změny teploty na historické konstrukce je významný, jsou-li tuze spojeny subtilní a masivní části historických konstrukcí. Subtilní prvky reagují rychleji na změnu teploty v okolí konstrukce než masivní prvky. Vlivem rozdílné teploty dochází ke vzniku napětí v konstrukci, které může po mnoha letech vést k jejich porušení. Příkladem takového porušení je chrám sv. Barbory v Kutné Hoře a triforium katedrály sv. Víta.

U chrámu sv. Barbory byly porušeny opěrné oblouky v opěrném systému. Opěrný systém je složen ze dvou různě masivních opěrných oblouků a masivního svíslého pilíře opěrného systému. Vlivem změny teplot v exteriéru dochází i ke změně teploty opěrných oblouků. Kvůli rozdílné setrvačnosti se během dne průměrná teplota opěrných oblouků liší a dochází tak k opakovanému namáhání, které vyústilo až ke vzniku širokých trhlin v opěrných obloucích (Fajman a Kott 2006, Fajman et al. 2007).

U triforia katedrály sv. Víta je situace obdobná. V katedrále sv. Víta došlo v 90. letech 20. století k pádu části kružby, která se nachází ve výšce cca 17 metrů nad podlahou katedrály a je součástí triforia. Při následném průzkumu triforia byly zjištěny poruchy 5–10 % všech kružeb v katedrále. Tyto poruchy byly častější ve staré části katedrály (Drďácký 1992).

Tato porucha mohla nastat z mnoha příčin, v následujícím textu jsou uvedeny pouze nejvýznamnější z nich. První možností je, že v jednom z porušených míst vznikla trhlina a zbylá část kružby potom vibrovala po velmi dlouhou dobu, až nakonec celá kružba spadla. Druhou možností je vliv dlouhodobého cyklického teplotně mechanického namáhání kružby triforia. Vliv teplotních změn může být také zvýšen vlivem vlhkosti. Nutno podotknout, že k poruchám konstrukce mohlo dojít i kvůli kombinacím více efektů.

Objasnění vlivu teploty na napjatost kružby triforia proběhlo pomocí numerické simulace teplotně mechanického chování triforia. Výpočet napjatosti proběhl ve dvou fázích. V první fázi bylo simulováno rozložení teplot v konstrukci triforia. Byly analyzovány dva efekty:



**OBRAZEK 92:** Porovnání vypočtených a naměřených hodnot vodorovných posunů mezi monitorovacími body na jižním sloupu

prudké ochlazení vzduchu v interiéru katedrály a extrémní ohřátí vnějších povrchů triforia od slunečních paprsků. V obou případech bylo použito numerické řešení rovnice nestacionárního vedení tepla metodou konečných prvků včetně formulace okrajových podmínek, která byla popsána výše. Druhou fází simulace byl výpočet napjatosti triforia pomocí numerických modelů, v kterých byl použit lineární pružný materiálový model. Do numerických modelů (2-D, 3-D) vstupovalo rozložení teplot, které bylo získáno v první fázi výpočtu, jako zatížení.

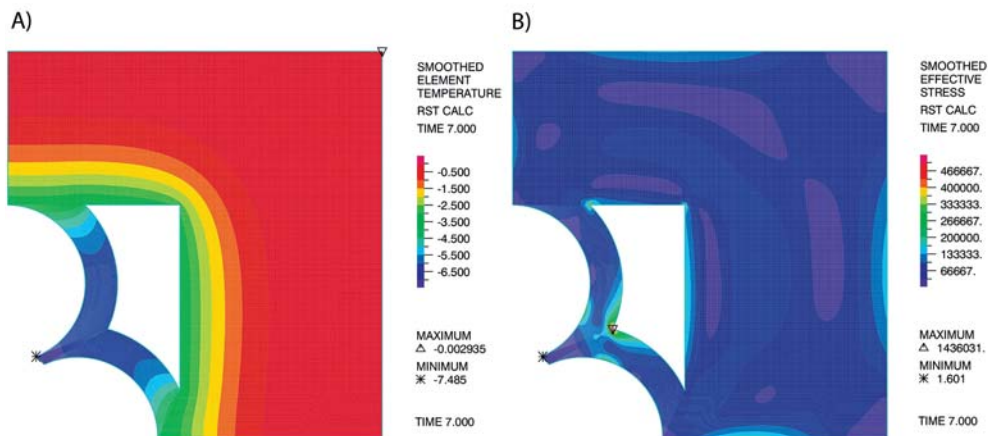
Na **obrázku 93** je zobrazeno rozložení efektivního napětí v části triforia, která se nachází v blízkosti sloupu hlavní lodi. Toto rozložení napětí bylo získáno ochlazením konstrukce v důsledku snížení teploty vzduchu v interiéru katedrály. Poloha extrémů efektivního napětí odpovídá místům, kde byly zjištěny trhliny v kružbách triforia (Beran a Drdácký 2007a).

## Teplotní namáhání historického zdiva

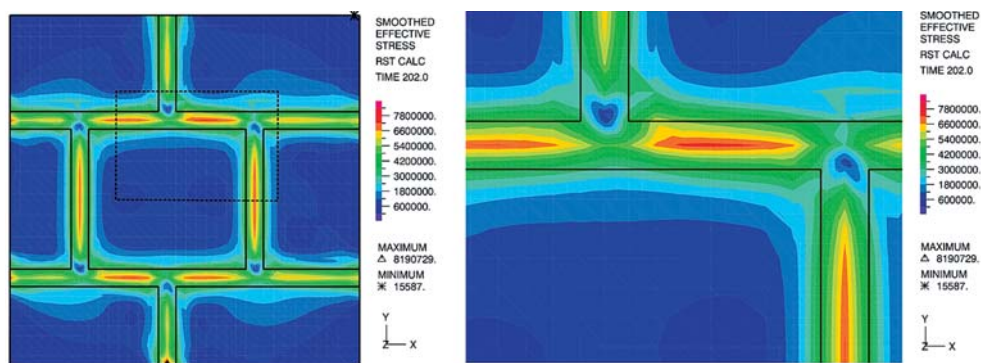
Při popisování vlivu teploty na historické památky nemůže být opomenuta problematika historického zdiva z hlediska teplotního namáhání. Historické zděné konstrukce se skládají z malty a kamenů nebo cihel. Působením počasí dochází k vydrolování malty ze spár zdiva. Vydrolenou maltu je nutno nahradit novou maltou, jejíž materiálové vlastnosti by měly zajišťovat co nejdéle životnost opravy. Zároveň by nová opravná malta měla vyhovovat památkovým požadavkům. V následujícím textu je podrobně analyzován vliv teploty na degradaci zdiva v důsledku změny teploty.

Detailní teplotně mechanická analýza zdiva byla provedena pomocí numerického modelu bloku zdiva obvodové stěny o rozměrech  $1 \times 1$  m, který byl izolován z průběžné zdi šířky 0,6 m. Vlastní model analyzoval zdivo na úrovni kamenných bloků a jednotlivých spár, jež jsou vyplněny maltou. Zdivo bylo vyzděno na vazákovou vazbu, kde ložné a styčné spáry měly tloušťku 5 cm. Rozměry kamenných kvádrů jsou výrazně vyšší a pohybují se okolo 40–50 cm.

Výpočet pole teplot ve zdivu vedl ke zjištění extrémních teplotních gradientů, kterými může být modelovaný blok zdiva namáhán. Byly uvažovány dva efekty – ochlazení a ohřátí vnějšího povrchu konstrukce.



**OBRAZEK 93:** Napojení triforia na sloup hlavní lodi: A) rozložení teplot při ochlazování, B) rozložení efektivního napětí



**OBRAZEK 94:** Rozložení efektivního napětí: vlevo komplexní pohled na vnější povrch elementu zdiva, vpravo detail

Významným údajem pro výpočet teplotně mechanického namáhání zdiva je teplota, při níž došlo k tuhému spojení malty a kamene. Tato teplota bude v dalším textu nazývána rovnovážnou teplotou. Pro případ ochlazení bylo uvažováno s rovnovážnou teplotou 20 °C, která odpovídá zhotovení zdiva v létě. Druhým analyzovaným efektem bylo extrémní ohřátí povrchu slunečním zářením. Rovnovážná teplota byla pro případ extrémního ohřátí stanovena na 10 °C. Tato teplota odpovídá tuhému spojení malty a kamene v jarním nebo podzimním období.

Porovnájí-li se absolutní hodnoty teplotních gradientů, zjistí se, že teplotní gradient na povrchu má přibližně shodnou hodnotu jak při ochlazení, tak i při ohřátí vnějšího povrchu zdiva.

Vstupními daty pro výpočet napjatosti byla teplotní pole, která byla popsána výše. Pro výpočet napjatosti metodou konečných prvků byl použit fyzikálně-lineární materiálový model.

V numerickém modelu byly použity dva materiály. Prvním z nich byl pískovec, který reprezentoval kamenné bloky. Druhým materiálem byla malta, jež nebyla konkrétně specifikována – byly předepsány pouze její materiálové charakteristiky. Příčinou, proč nebylo

konkrétně specifikováno, o jakou maltu se jedná, je snaha najít parametry (materiálové charakteristiky) vhodné malty, které budou zajišťovat dobré spolupůsobení malty a kamene. Modul pružnosti a součinitel délkové teplotní roztažnosti byly z tohoto důvodu pro maltu proměnné. Pomocí numerického modelu byl analyzován vliv rozdílné délkové teplotní roztažnosti malty a kamene na napjatost v blízkosti rozhraní těchto dvou materiálů. Rozhraní mezi kamenem a maltou bylo modelováno jako tuhý kontakt po jeho celé ploše. Vzájemný posun mezi kamenem a maltou tedy nebyl v numerickém modelu dovolen.

Okrajové podmínky byly aplikovány v rozích elementu zdiva tak, aby toto podepření bylo staticky určité. K nárůstu napjatosti kvůli staticky neurčitému podepření elementu zdiva tedy nemohlo dojít.

Na **obrázku 94** je zobrazen stav napjatosti, jenž je způsoben rozdílnou délkovou teplotní roztažností kamene a malty. Tento stav napjatosti je způsoben ochlazením. Součinitel délkové teplotní roztažnosti malty je  $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Pískovec má koeficient délkové teplotní roztažnosti  $18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Modul pružnosti obou materiálů je shodný a má hodnotu 15 GPa.

Výsledkem rozdílné délkové teplotní roztažnosti malty a kamene je výrazný nárůst napjatosti ve zdivu. Nejvyšších hodnot napjatosti je dosaženo v blízkosti kontaktu malty a kamene. V kameni s narůstající vzdáleností od rozhraní hodnoty efektivního napětí silně klesají.

Pomocí této analýzy byla zjištěna závislost jednotlivých napětí na součiniteli délkové teplotní roztažnosti a modulu pružnosti malty. Na **obrázku 95** je uvedena závislost efektivního napětí v maltě na součiniteli délkové teplotní roztažnosti malty. S narůstajícím rozdílem délkové teplotní roztažnosti kamene a malty dochází k nárůstu hodnot napjatosti. Vyšší hodnoty napětí také způsobují vyšší hodnoty modulu pružnosti malty. Při malém rozdílu hodnoty součinitele délkové teplotní roztažnosti kamene a malty se blíží hodnoty napětí stavu, kdy je napjatost ve zdivu způsobená pouze nelineárním rozložením teplot ve směru tloušťky zdi. Hodnoty napětí od teploty se tedy blíží k nejnižší, nikoli však nulové hodnotě (Drďáček a Beran 2010).

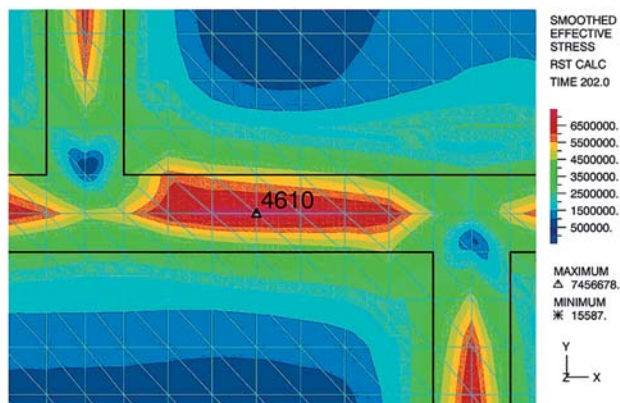
Hodnoty napětí od teploty závisí rovněž na rovnovážné teplotě konstrukce, tj. na teplotě, při které byly malta a kámen tuze spojeny. Pomocí numerické simulace popsané výše byla zjišťována optimální teplota pro tuhé spojení malty a kamene. Byly zjišťovány maximální hodnoty napětí ve zdivu pro rovnovážné teploty o hodnotě 5, 10, 15, 20, 25, 30 °C. Jednalo se o zdivo, v kterém má malta roztažnost  $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  a kámen  $18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , a modul pružnosti malty a kamene je 15 GPa. Výsledky této konkrétní analýzy jsou platné pro jihozápadní stěnu mezi exteriérem a interiérem a jsou stručně shrnuty na **obrázku 96** (Beran 2015).

Z výsledků vyplývá, že optimální teplota pro opravu zdiva je přibližně rovna průměru maximální a minimální teploty zdiva během roku. Pro jihozápadní osluněnou stěnu je tedy optimálním obdobím červen, červenec a srpen. Podobná analýza může být použita pro zjištění vhodného termínu pro opravu zdiva s jakoukoli orientací ke světovým stranám.

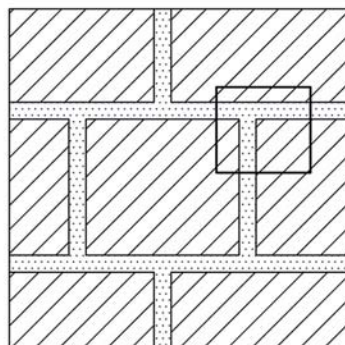
Cílem jedné části analýzy bylo zjistit vliv jednotlivých termodynamických materiálových vlastností a vlastností venkovního prostředí na charakter teplotního gradientu a na maximální teploty historického zdiva. Tyto vlastnosti ovlivňují hodnoty a charakter následného teplotního namáhání – viz výše.

Vedení tepla ve stěně probíhá dominantně ve směru kolmém k povrchu stěny. Proto mohlo být komplexní 3-D vedení tepla zjednodušeno a nahrazeno 1-D vedením tepla. V tomto případě dochází ke změnám teploty pouze ve směru tloušťky zdiva.

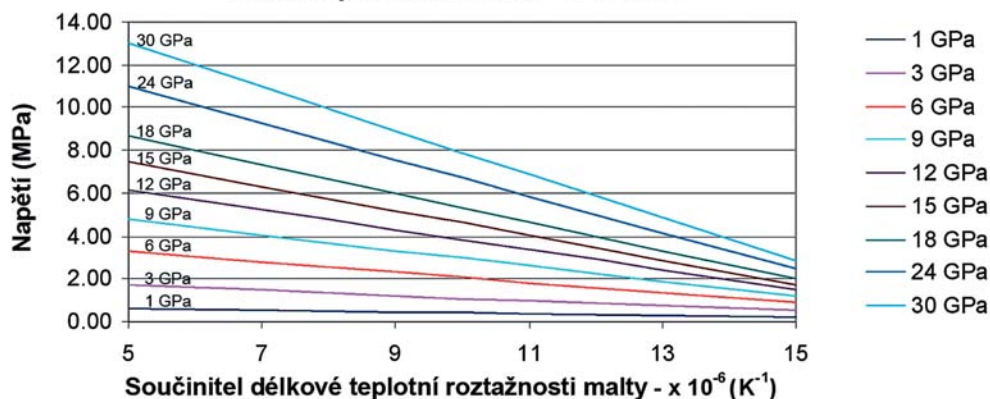
## Detail



## Komplexní pohled



### Efektivní napětí - maximum v maltě - závislost na modulu pružnosti maltě - uzel 4610

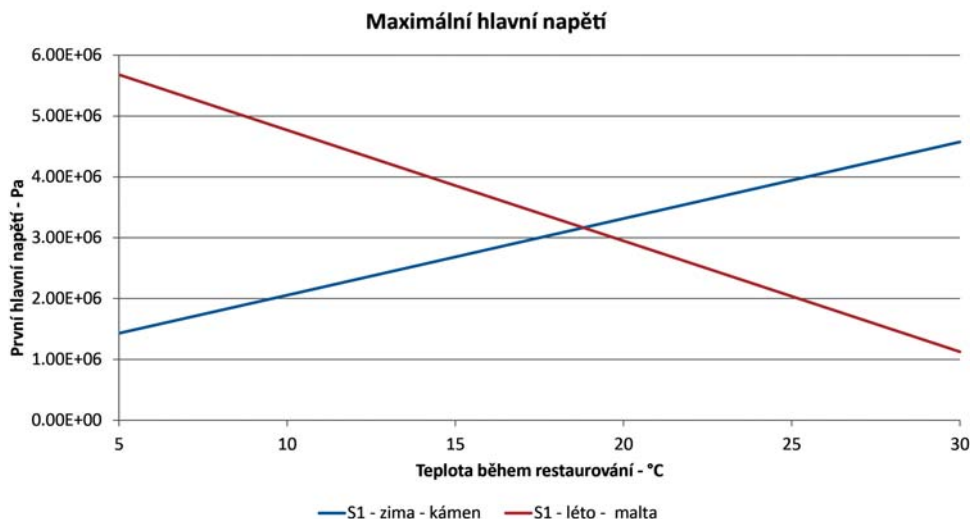


**OBRÁZEK 95:** Pozice uzlu, v němž bylo dosaženo maximálního efektivního napětí v maltě (nahoře). Závislost efektivního napětí na součiniteli délkové teplotní roztažnosti a na modulu pružnosti maltě (dole). Napjatost byla způsobena ochlazením.

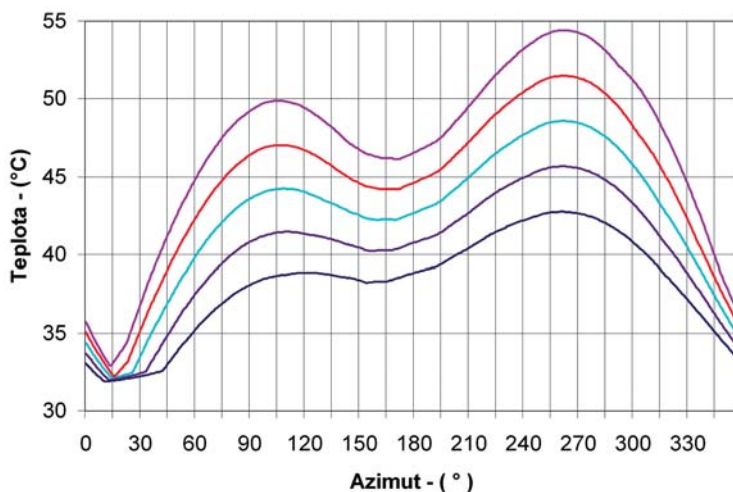
Pro numerické řešení rovnice vedení tepla v 1-D byla použita metoda konečných prvků spolu s okrajovými podmínkami, jež jsou popsány rovnicemi (10) až (12). Byl vytvořen numerický model stěny o tloušťce 0,45 metru, jejíž jeden povrch byl vystaven slunečnímu záření a teplotě vzduchu v exteriéru a druhý povrch byl vystaven pouze teplotě vzduchu v exteriéru.

Pomocí numerického 1-D modelu byl proveden výpočet rozložení teplot v konstrukci během července 2006 v Praze. Ze všech výsledků simulace, při použití konkrétních materiálových charakteristik a parametrů vnějšího prostředí, byla zaznamenána maximální teplota povrchu zdiva. Takto byl analyzován vliv: součinitele tepelné vodivosti, objemové tepelné kapacity, součinitele pohltivosti slunečního záření, součinitele přestupu tepla a orientace ke světovým stranám (Beran 2012) (**obr. 97 až 101**).

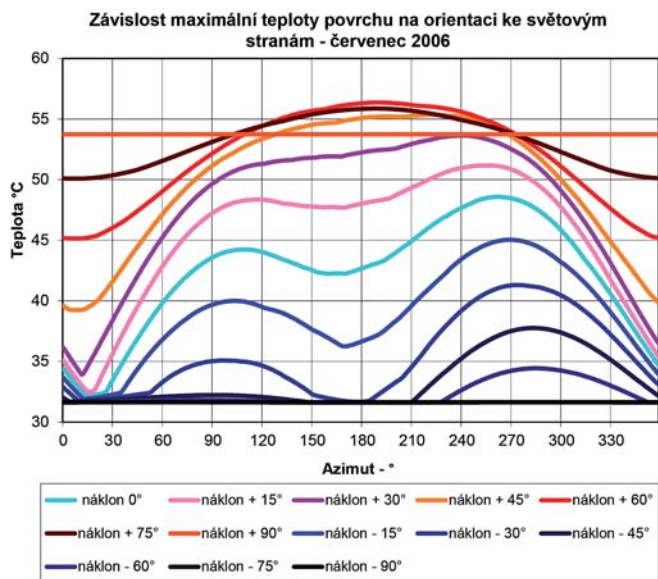




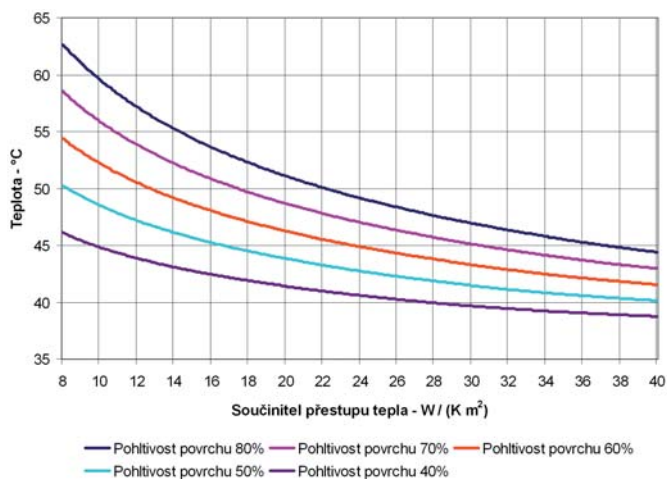
**OBRÁZEK 96:** Závislost maximální hodnoty prvního hlavního napětí ve zdivu na teplotě během restaurování



**OBRÁZEK 97:** Závislost maximální teploty svislého povrchu na orientaci ke světovým stranám. (Poznámka: Azimut je úhel, který svírá normálu daného povrchu s normálou referenčního povrchu, který je otočen k severu. Směr otáčení je následující: sever, východ, jih, západ. Je-li tedy azimut roven 0°, je povrch orientován na sever, 90° – východ, 180° – jih a 270° – západ.) Tento graf byl vypočten s koeficientem tepelné vodivosti  $1,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , měrnou tepelnou kapacitou  $840 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , objemovou hmotností  $2400 \text{ kg m}^{-3}$  a součinitelem přestupu tepla  $15 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^2$ .

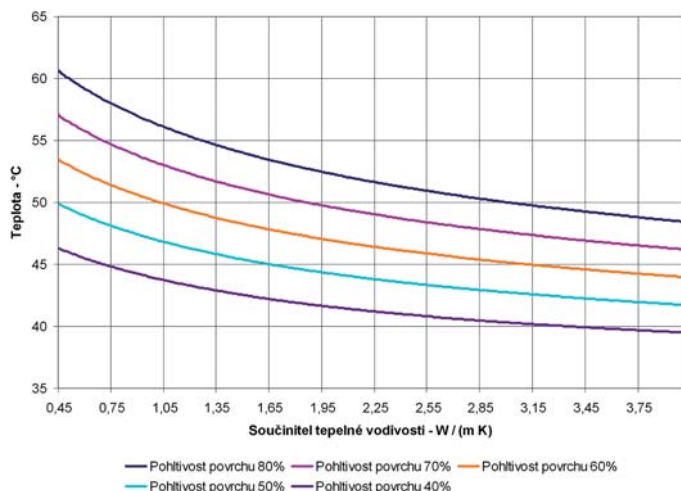


**OBRAZEK 98:** Závislost maximální teploty svislého povrchu na orientaci ke světovým stranám. Tento graf byl vypočten s koeficientem tepelné vodivosti  $1,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , měrnou tepelnou kapacitou  $840 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , objemovou hmotností  $2400 \text{ kg m}^{-3}$  a součinitelem přestupu tepla  $15 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^2$ .

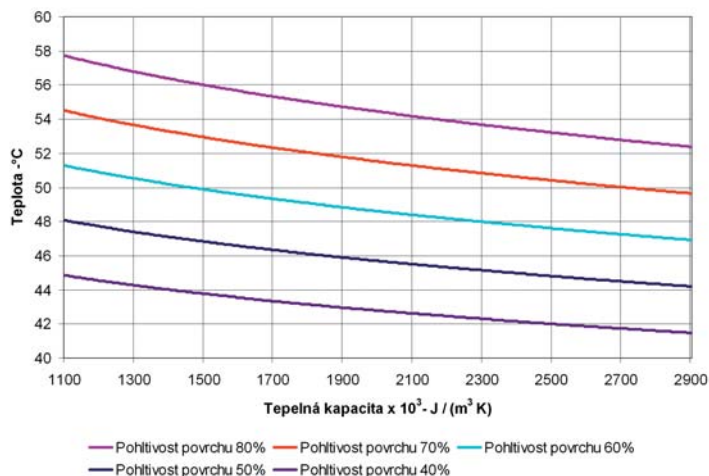


**OBRAZEK 99:** Závislost maximální teploty svislého povrchu na součiniteli přestupu tepla. Zobrazené křivky v grafu byly spočteny s těmito vstupními parametry modelu: součinitel tepelné vodivosti  $1,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , měrná tepelná kapacita  $840 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , objemová hmotnost  $2400 \text{ kg m}^{-3}$ , azimut normály povrchu  $262^\circ$

<sup>1</sup> Azimut je úhel, který svírá normálu daného povrchu s normálou referenčního povrchu, který je otočen k severu. Směr otáčení je následující: sever, východ, jih, západ. Je-li tedy azimut roven  $0^\circ$ , je povrch orientován na sever,  $90^\circ$  – východ,  $180^\circ$  – jih a  $270^\circ$  – západ. Náklon je úhel, který svírá příslušný povrch od svislé roviny, je-li náklon  $0^\circ$ , znamená to, že povrch je svislý, je-li náklon  $+90^\circ$ , je povrch vodorovný a je osluněn, je-li náklon  $-90^\circ$ , je povrch vodorovný a není osluněn.

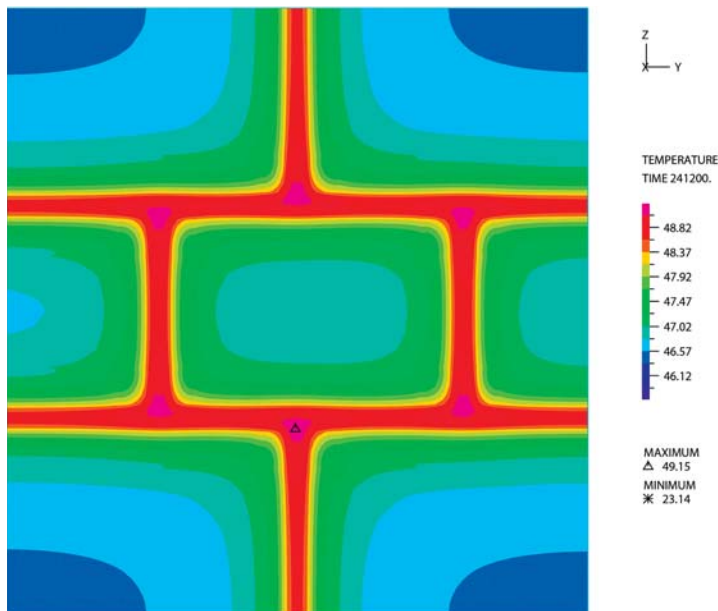


**OBRÁZEK 100:** Závislost maximální teploty na součiniteli tepelné vodivosti zdiva. Zobrazené křivky byly spočteny s těmito vstupy výpočtu: pro azimut  $262^\circ$ , měrnou tepelnou kapacitu  $840 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , objemovou hmotnost  $2400 \text{ kg m}^{-3}$  a součinitel přestupu tepla  $15 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-2}$

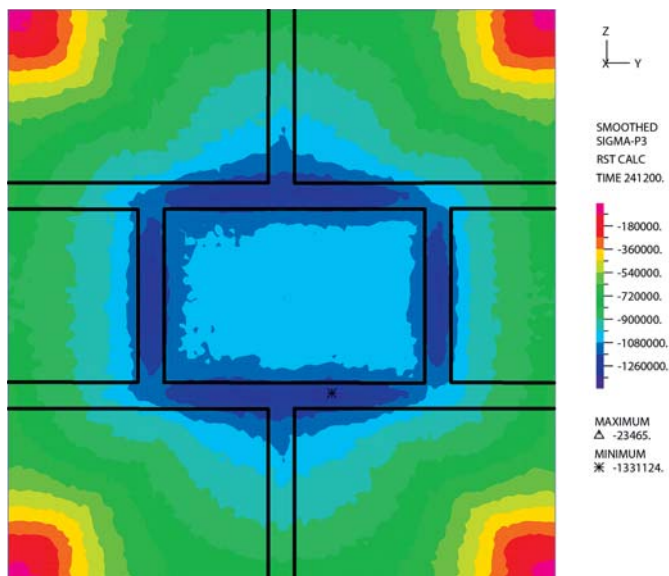


**OBRÁZEK 101:** Závislost maximální teploty povrchu na objemové tepelné kapacitě zdiva. Křivky grafu byly spočteny s těmito vstupy výpočtu: azimut  $262^\circ$ , součinitel tepelné vodivosti  $1,4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a součinitel přestupu tepla  $15 \text{ W K}^{-1} \text{ m}^{-2}$

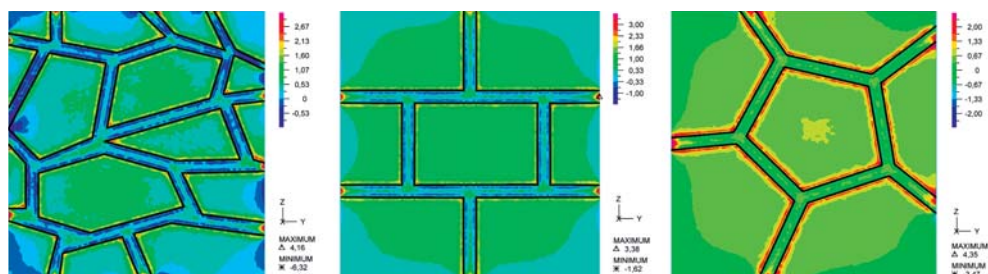
Napětí ve zdivu od teploty jsou způsobeny i rozdílným rozložením teplot v konstrukci, které je způsobeno například rozdílnou pohltivostí povrchu konstrukce, rozdílnou tepelnou vodivostí atp. Z tohoto důvodu proběhla obdobná teplotně mechanická analýza zdiva, jako je již uvedeno výše. Rozdíllem je, že nyní má zdivo kromě součinitele pohltivosti slunečního záření všechny materiálové vlastnosti totožné, tj. modul pružnosti a součinitel délkové teplotní roztažnosti malty a kamene je shodný, naopak součinitel pohltivosti malty a kamene je odlišný.



**OBRÁZEK 102:** Rozložení teplot na povrchu zdiva, malta má pohltivost slunečního záření 80 %, kameny mají pohltivost slunečního záření 60 %



**OBRÁZEK 103:** Rozložení třetího hlavního napětí, napětí je způsobeno teplotním polem z obr. 105, malta má součinitel pohltivosti slunečního záření 80 %, kámen má součinitel pohltivosti slunečního záření 60 %



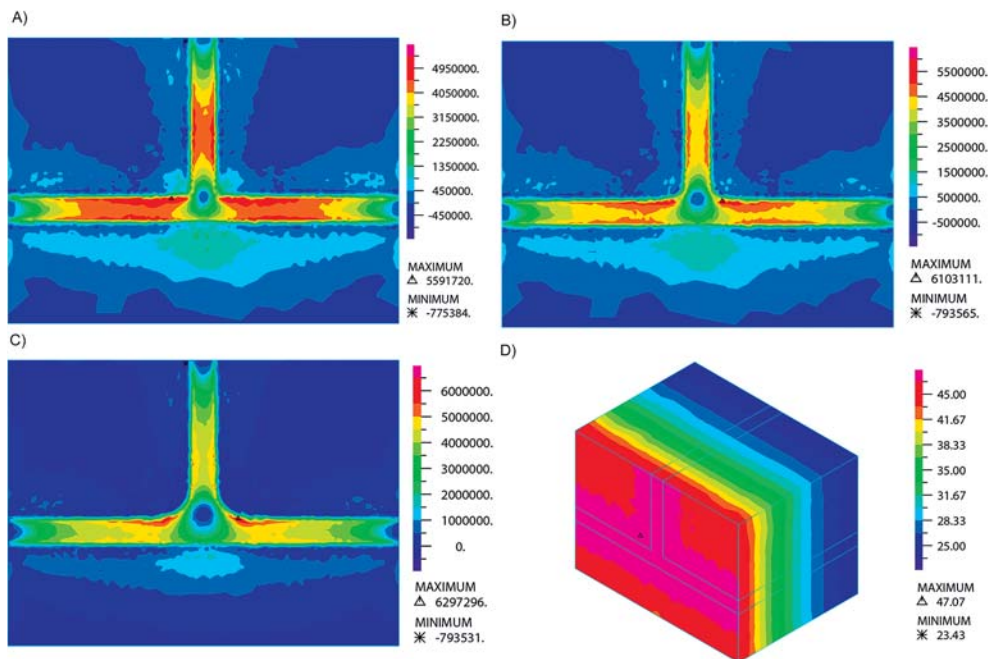
**OBRÁZEK 104:** Rozložení průměrného napětí ve zdivu, levý obrázek – zdivo z lomového kamene, prostřední obrázek – řádkové zdivo, pravý obrázek – kyklopské zdivo

Z výsledků analýzy vyplývá, že vlivem rozdílné pohltivosti slunečního záření dochází ke zvýšení napětí od teploty jen o několik málo procent vůči teplotnímu namáhání pro zdivo se shodnou pohltivostí. Například zdivo s pohltivostí 80 % má hodnotu třetího hlavního napětí v maltě 1,30 MPa, zatímco zdivo s pohltivostí malty 80 % a pohltivostí kamene 60 % má hodnotu třetího hlavního napětí ve stejném uzlu 1,33 MPa. Porovná-li se tato skutečnost s vlivem rozdílné délkové teplotní roztažnosti, je vliv rozdílné pohltivosti slunečního záření zanedbatelný. Podíváme-li se na výsledky vlivu termodynamických vlastností zdiva a vnějšího prostředí na rozložení teplot ve zdivu, je zřejmé, že rozdílné hodnoty tepelné vodivosti a tepelné kapacity mezi maltou a kamenem budou mít na napjatost zdiva od teploty ještě menší vliv než pohltivost slunečního záření (Beran 2013a).

Dalším aspektem, který může ovlivňovat napjatost zdiva, je typ jeho vazby. Byla porovnána napjatost zdiva z lomového kamene, řádkového zdiva a kyklopského zdiva. Z výsledků analýzy vyplynulo, že u všech typů vazby zdiva dochází ke vzniku dvou zón vyšších napětí podél rozhraní materiálu. Navíc dochází v místě rohů kamenů ke koncentraci napětí. Bylo zjištěno, že zpravidla k vyšším hodnotám napětí dochází v rozích kamenů, které mají nižší vnitřní úhel, než u kamenů, které mají vyšší vnitřní úhel. Napjatost na **obrázku 104** je způsobena rozdílnou roztažností malty a kamene, malta má součinitel délkové teplotní roztažnosti  $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , součinitel délkové teplotní roztažnosti kamene má hodnotu  $18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , modul pružnosti malty a kamene je 15 GPa, součinitel příčného přetvoření malty a kamene je 0,2. Numerická analýza metodou konečných prvků proběhla obdobným způsobem, jako je uvedeno v předchozím textu (Beran 2013b).

Pro podrobnější analyzování vlivu koncentrace napětí v rozích kamenů byly vytvořeny tři detailní numerické modely části zdiva. Jednotlivé modely se od sebe liší poloměrem zakřivení kamenů v rozích. Poloměry nabývaly tří hodnot  $R = 0 \text{ mm}$  - ostrý roh, poloměry  $R = 15 \text{ mm}$ , respektive  $R = 30 \text{ mm}$  pro zaoblené rohy. Výsledky jsou spolu s tvarem modelů zobrazeny na **obrázku 105**.

Napjatost zobrazena na **obrázku 105** je způsobena rozdílnou roztažností malty a kamene, malta má součinitel délkové teplotní roztažnosti  $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , součinitel délkové teplotní roztažnosti kamene má hodnotu  $18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , modul pružnosti malty a kamene je 15 GPa, součinitel příčného přetvoření malty a kamene je 0,2. Numerická analýza metodou konečných prvků proběhla obdobným způsobem jako v předchozích kapitolách.



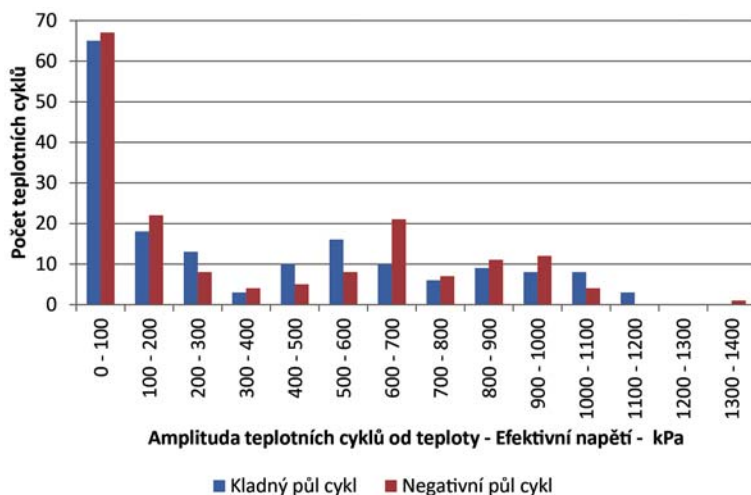
**OBRÁZEK 105:** Výsledky získané z numerických modelů – maximální hodnoty napětí: a) rozložení prvního hlavního napětí (Pa), venkovní povrch - model s poloměrem  $R = 0\text{ mm}$ ; b) rozložení prvního hlavního napětí (Pa), venkovní povrch – model s poloměrem  $R = 15\text{ mm}$ ; c) rozložení prvního hlavního napětí (Pa), venkovní povrch – model s poloměrem  $R = 30\text{ mm}$ ; d) rozložení teplot – 3D pohled. Poznámka: Rozdílné měřítko bylo použito pro jasnější ukázání charakteru napjatosti.

Porovnáme-li maximální hodnoty napětí v maltě na **obrázku 105 a, b, c**, zjistíme, že maximální napětí v maltě se se zvyšujícím se poloměrem mírně roste. Z výsledků numerické analýzy dále vyplynulo, že se zvyšujícím se poloměrem zakřivení dochází ke značnému snížení hodnot napětí ve vnitřním rohu kamenu. Hodnota efektivního napětí pro poloměr  $R = 0\text{ mm}$  je 5,26 MPa; pro poloměr  $R = 15\text{ mm}$  je 3,64 MPa; pro poloměr  $R = 30\text{ mm}$  je 2,43 MPa. Efektivní napětí je invariant napjatosti, který charakterizuje celkovou napjatost v daném bodě jedinou hodnotou a je vypočten ze všech šesti složek napjatosti v daném bodě (Beran 2015a, b).

Napjatost zdiva od teploty závisí na rozložení teploty ve zdivu. Je zřejmé, že se teploty ve zdivu mění v důsledku střídání dne a noci a v důsledku rozdílného počasí v jednotlivých dnech, týdnech a ročních obdobích. Cílem následující části analýzy zdiva bylo ukázat množství a amplitudy jednotlivých teplotních cyklů během meteorologického léta referenčního klimatického roku v Praze.

Vzhledem k charakteru úlohy je výpočet hodnot napětí pomocí 3-D modelu zdiva velice časově náročný na výpočetní čas počítače. Z tohoto důvodu byla vyvinuta metoda, jak aproximovat 3-D napjatost ve zvoleném bodě pomocí tří na sebe navzájem kolmých 2-D modelů zdiva.

Pro analýzu teplotních cyklů byl zvolen bod v maltě, ve kterém jsou maximální hodnoty napětí. Byla analyzována jihozápadní stěna mezi exteriérem a interiérem vystavená slunečnímu záření. Rovnovážná teplota byla uvažována 18,83 °C, což je optimální hodnota pro spojení malty a kamene v jihozápadní stěně, hodnota pohltivosti povrchu byla 60%, součinitel

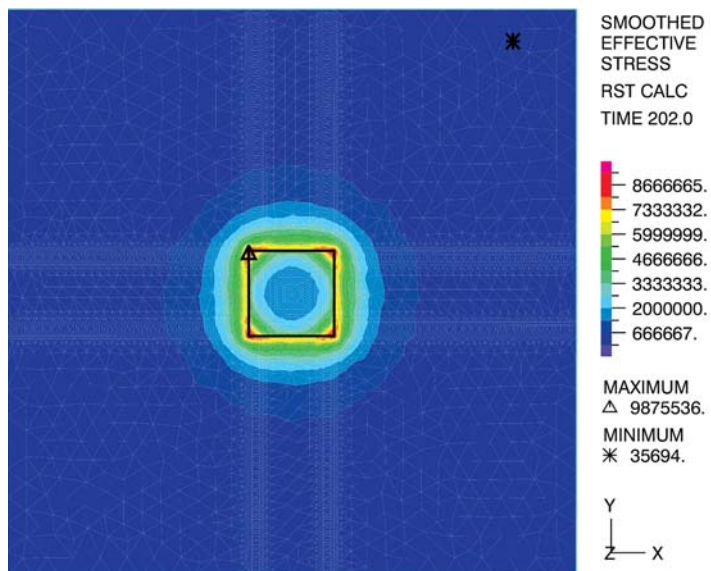


**OBRAZEK 106:** Množství a amplituda teplotních cyklů v maltě – bod v ložné spáře, efektivní napětí během června, července a srpna referenčního klimatického roku na Pražském hradě

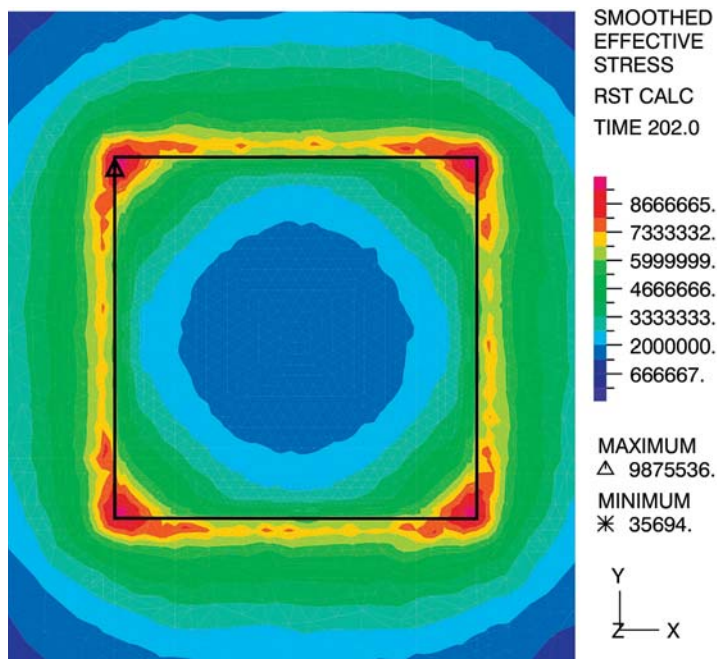
tepelné vodivosti byl  $1,4 \text{ W / (m K)}$ , objemová hmotnost byla  $2600 \text{ kg / m}^3$ , měrná tepelná kapacita byla  $840 \text{ J / (kg K)}$ , součinitel délkové teplotní roztažnosti malty byl zvolen  $11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , součinitel délkové teplotní roztažnosti kamene byl zvolen  $14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , modul pružnosti malty a kamene byl  $15 \text{ GPa}$ , součinitel příčného přetvoření byl  $0,2$ . Rozdíl součinitele délkové teplotní roztažnosti mezi maltou a kamenem byl zvolen nízký. Tyto a mírně vyšší rozdíly mezi roztažností kamene a malty mohou běžně nastat. Výše byl rozdíl roztažnosti kamene a malty zvolen záměrně vysoký, aby bylo více zřejmé, jaký vliv má rozdílná roztažnost mezi maltou a kamenem na jednotlivý analyzovaný efekt teplotního namáhání.

V analyzovaném bodě byly zobrazeny hodnoty napětí od teploty v období červen, červenec, srpen referenčního roku platného pro Pražský hrad. Údaje o teplotě vzduchu v exteriéru a intenzitě globálního slunečního záření poskytují hodnoty měřených veličin každou hodinu. Z tohoto důvodu bylo spočteno celkem  $24 \times (30 + 31 + 31) = 2208$  hodnot jednotlivých složek napětí v analyzovaném bodě. Z šesti nezávislých složek napjatosti byly spočteny hodnoty efektivního napětí. Tyto hodnoty byly podrobeny další analýze pomocí metody padajícího deště. Byly spočteny jednotlivé kladné a záporné půlcykly. Histogram napěťových cyklů je uveden na **obrázku 106**.

Z výsledků je zřejmé, že celkové množství všech cyklů je 169 během 92 dnů. Množství teplotních cyklů s amplitudou vyšší než  $200 \text{ kPa}$  je 73. To znamená, že přibližně  $0,8$  významného cyklu nastává během jednoho dne v analyzovaném období. Během velmi horkých letních dnů obvykle nastávají cykly s nejvyššími amplitudami teplotního namáhání. Velikost amplitudy teplotního namáhání je způsobena dvěma efekty teploty. Prvním je napjatost způsobená rozdílem mezi rovnovážnou teplotou a aktuální teplotou a hodnotou rozdílu roztažnosti mezi maltou a kamenem. Druhou příčinou teplotního namáhání zdiva je nelineární teplotní gradient ve zdivu. Oba tyto efekty způsobují vyšší hodnoty napětí během slunečných dnů. Během dnů s proměnlivým počasím je větší množství teplotních cyklů od teploty s nižší amplitudou.



**OBRÁZEK 107:** Napjatost způsobená rozdílnou teplotní roztažností, je-li do zdi-  
va, kamenného bloku vložena výplň ve tvaru komolého jehlanu z materiálu,  
který má odlišnou hodnotu délkové teplotní roztažnosti než původní materiál.  
Vnější rozměry modelu jsou  $1 \times 1 \times 0,6$  m, rozměry komolého jehlanu jsou  $0,15$   
 $\times 0,15 \times 0,075$  m. Na obrázku je zobrazeno rozložení efektivního napětí – po-  
hled na stěnu – komplexní pohled – Pa



**OBRÁZEK 108:** Komolý jehlan – efektivní napětí – pohled na stěnu – detail – Pa



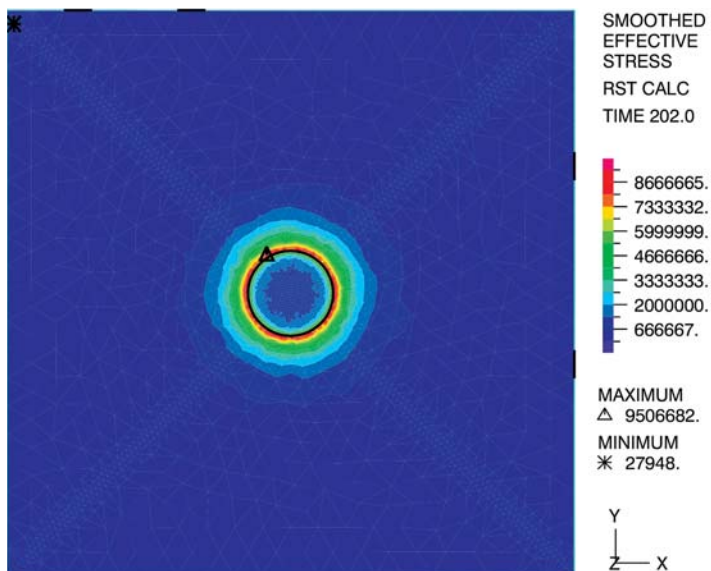
Absolutní hodnoty napětí v analyzovaném případě jsou pod hodnotami pevnosti materiálů typicky užívaných pro zdivo. Materiály používané pro zdivo jsou kvazi křehké materiály. V experimentu (Drdáček et al. 2014) bylo ukázáno, že množství teplotních cyklů potřebných k porušení kvádrů z pískovce bylo přibližně 220 000 pro tahové namáhání rovné 17 % tahové pevnosti materiálu. To znamená, že jestliže je aplikováno logaritmické pravidlo pro závislost mezi množstvím teplotních cyklů a amplitudou teplotního napěťového cyklu, získáme 1650 napěťových cyklů potřebných pro poškození materiálu s amplitudou rovnou 50 % tahové pevnosti materiálu. Proto teplotní cykly s amplitudou okolo 50 % materiálové pevnosti mohou mít významný vliv na poškození materiálu. Když se tyto informace porovnají s výsledky získanými z numerických simulací, zjistíme, že cykly napětí od teploty mohou způsobit poškození některých částí zdiva již po 5–10 letech.

### Teplotní namáhání restaurovaných výplní a výčnělků

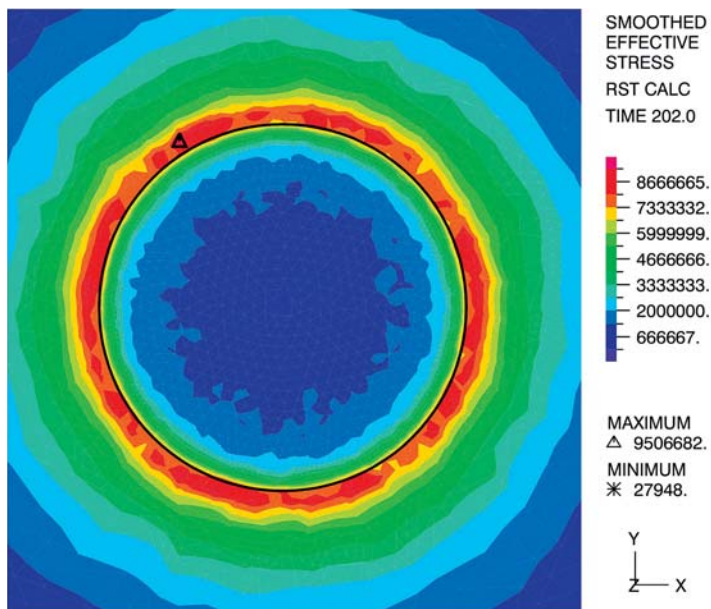
Vlivem degradace povrchových vrstev homogenního zdiva nebo kamenného bloku může dojít k vytvoření prohlubně, kterou je třeba vyplnit novým materiálem. Vyplní-li se prohlubeň materiálem, který má výrazně jinou délkovou teplotní roztažnost než okolní materiál, dochází ke vzniku značných napětí od teploty ve výplni samé a v jejím blízkém okolí. Je-li výplň ve tvaru komolého jehlanu, jsou nejvyšší hodnoty napětí v rozích výplně. Pokud je však výplň ve tvaru komolého kuželu, vytvoří se v blízkosti rozhraní materiálů zóna vysokých napětí ve tvaru prstence. U komolého kuželu jsou hodnoty maximálního efektivního napětí o cca 4 % nižší než u výplně ve tvaru komolého jehlanu. Vlivem rozdílné roztažnosti materiálů tak může dojít k poruše výplně a zvětšení prohlubně. Napětí lze výrazně snížit volbou vhodného materiálu, tj. materiálu, který má totožnou nebo velmi blízkou hodnotu součinitele délkové teplotní roztažnosti jako původní materiál. Jako bezpečný (nízký) rozdíl mezi součiniteli délkové teplotní roztažnosti dvou materiálů lze brát hodnotu  $2 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (Beran a Drdáček 2007a).

Často také dochází ke ztrátám architektonických ozdobných prvků na fasádě nebo nosů kamenných soch, často v důsledku vandalství. Restaurátoři během oprav doplňují nový materiál na místo původního. Má-li nový výstupek (nos) výrazně jinou délkovou teplotní roztažnost než původní materiál, dochází ke značným napětím podél celého rozhraní materiálu, přičemž maxim je dosaženo u kořene nosu. I v tomto případě lze napětí od teploty snížit pomocí vhodné volby materiálu pro opravy (Beran a Drdáček 2011).

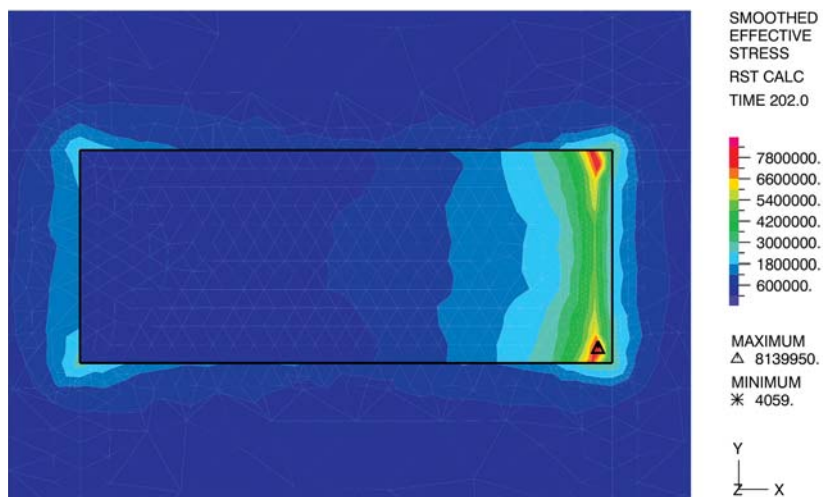
Na následujících obrázcích (**obr. 107–112**) je uvedeno rozložení efektivního napětí na rozhraní mezi výplní a základním materiálem nebo na rozhraní základního materiálu a výstupku, např. nosu, vyvolané extrémním ochlazením v Praze. Byla simulována reálná situace na stanici Praha-Ruzyně mezi 16.–25. lednem 2004, kdy teploty vzduchu klesly až na cca  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Rovnovážná teplota byla zvolena  $+20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Původní materiál a materiál výplně nebo výstupku má modul pružnosti 15 GPa, taktéž součinitel příčného přetvoření je u obou materiálů shodný a nabývá hodnoty 0,2, součinitel délkové teplotní roztažnosti původního materiálu je  $18 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , součinitel délkové teplotní roztažnosti výplně (výstupku – nosu) je  $5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Rozdíl délkové teplotní roztažnosti byl zvolen záměrně vysoký tak, aby byl zřejmý vliv rozdílné délkové teplotní roztažnosti na charakter napjatosti.



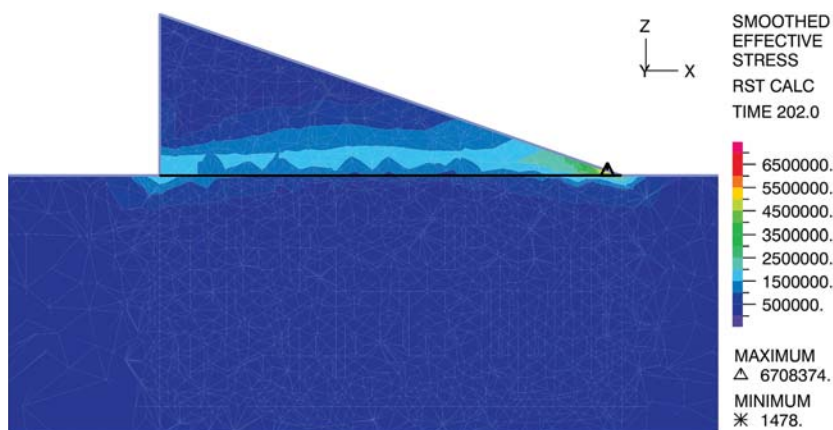
**OBRÁZEK 109:** Napjatost způsobená rozdílnou teplotní roztažností, je-li do zdiva, kamenného bloku vložena výplň ve tvaru komolého kužele z materiálu, který má odlišnou hodnotu délkové teplotní roztažnosti než původní materiál. Vnější rozměry modelu jsou  $1 \times 1 \times 0,6$  m, průměr podstavy komolého kužele je 0,15 m, výška kužele je 0,075 m. Na obrázku je zobrazeno rozložení efektivního napětí – pohled na stěnu – komplexní pohled – Pa



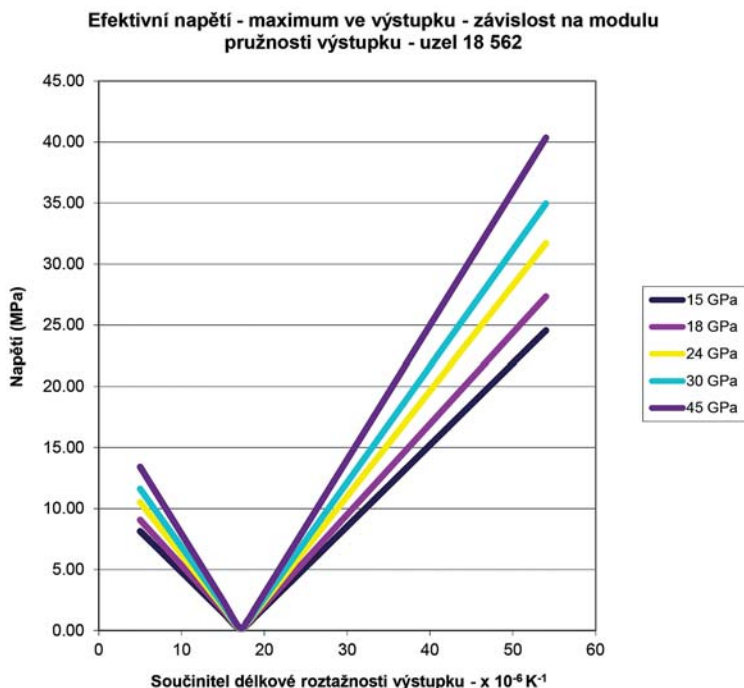
**OBRÁZEK 110:** Komolý kužel – efektivní napětí – pohled na stěnu – detail – Pa



**OBRÁZEK 111:** Napjatost způsobená rozdílnou teplotní roztažností, je-li k povrchu stěny, kamennému bloku přilepen materiál ve tvaru trojbokého hranolu (nos), který má odlišnou hodnotu délkové teplotní roztažnosti než původní materiál – rozložení efektivního napětí – pohled na stěnu – napětí v Pa



**OBRÁZEK 112:** Rozložení efektivního napětí ve vodorovném řezu kolmo k fasádě v místě maximálního napětí – Pa



**OBRAZEK 113:** Průběh efektivního napětí v závislosti na součiniteli délkové teplotní roztlačnosti výstupku (nosu) v bodě, kde je maximální efektivní napětí ve výstupku (nosu), modul pružnosti původního materiálu je 15 GPa, součinitel příčného přetožení původního materiálu a výstupku je shodný a nabývá hodnoty 0,2, součinitel délkové teplotní roztlačnosti původního materiálu je  $18 \times 10^{-6} K^{-1}$

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

- Bednář, J., a J. Kopáček. *Jak vzniká počasí*. Praha: Karolinum, 2005. ISBN 80-246-1002-7.
- Beran P. The impact of stone shape to the thermal stress of ashlar masonry. In: Simos, T. E. a C. Tsitouras (eds.). *AIP Conference Proceedings*, 1648. Melville (NY): AIP Publishing, 2015, 090005. <https://doi.org/10.1063/1.4912393>
- Beran, P. The impact of the coefficient of absorption of solar radiation on the state of stress in heterogeneous masonry. In: Simos, T. (ed.). *AIP Conference Proceedings*, 1558. Melville (NY): AIP Publishing, 2013, 992-995. <https://doi.org/10.1063/1.4825670>
- Beran P. The impact of the masonry temperature during restoration to the thermal stress of historic masonry. In: Kruis, J., Y. Tsompanakis a B. H. V. Topping. *Proceedings of the Fifteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Civil-Comp Proceedings, Vol. 108*. Kippen: Civil-Comp Press, 2015. <https://doi.org/10.4203/ccp.108.68>

- Beran, P. The impact of the type of bond on the thermal stress of historic masonry. In: Topping, B. H. V. a P. Iványi (eds.). *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing. Civil-Comp Proceedings, Vol. 102*. Kippen: Civil-Comp Press, 2013, 74. <https://doi.org/10.4203/ccp.102.74>
- Beran, P. The influence of solar radiation on the distribution of temperatures in the historic masonry. In: Mammoli, A. A. a C. A. Brebbia (eds.). *Advanced Computational Methods and Experiments in Heat Transfer XII*. Southampton: WIT Press, 2012, 181-192. <https://doi.org/10.2495/HT120161>
- Beran P. a M. Drdáčký. Influence of temperature changes on stresses in the triforium tracery of St. Vitus Cathedral in Prague. In: Onate, E, M. Papadrakakis a B. Schrefler. *Computational methods for coupled problems in science and engineering II*. Barcelona: International center for numerical methods in engineering, 2007, 433-436. ISBN 978-84-96736-18-4.
- Beran P. a M. Drdáčký. Compatibility thermal dilatation limits of the repair material for historic masonry. In: *Proceedings of the Thirteenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. Kippen: Civil-Comp Press, 2011, 321-339. ISBN 978-1-905088-47-8.
- Beran P. a M. Drdáčký. Thermal expansion compatibility of repair materials. In: *Proceedings of the Eleventh International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*. Kippen: Civil-Comp Press, 2007, 111-121. ISBN 978-1-905088-16-4.
- Beran P., J. Máca a P. Fajman. Temperature effects on one bay of St. Vitus' Cathedral. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2010, 7(2), 209-217. ISSN 1214-9705
- ČSN EN ISO 6946 - *Stavební prvky a stavební konstrukce – Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla – Výpočtová metoda*. 1998.
- ČSN 73 0540-3 – *Tepelná ochrana budov – část 3: Návrhové hodnoty veličin*. 1994.
- Drdáčký, M. Notes on failures of stone elements. In: Drdáčký, M. (ed.). *Proceedings of the 2. International Conference on Lessons Structural Failures*. Telč: Aristocrat, 1992, 59-66.
- Drdáčký M. a P. Beran. Compatible dilation limits of masonry joint mortars. *International journal of architectural heritage*. 2010, 4(2), 155-176. <https://doi.org/10.1080/15583050902914686>
- Drdáčký, M., M. Šperl a P. Beran. Tests on cumulative tensile damage of stone monuments. In: *International Conference Coastal Landscapes, Mining Activities and Preservation of Cultural Heritage*. Athens: National and Kapodistrian University of Athens, 2014.
- Drdáčký, M. a P. Zíma. *Monitorování poruch sklípkové klenby v klášteře Františkánů v Kadani*. Zpráva ÚTAM AV ČR. Praha: ÚTAM AV ČR, 2008.
- Fajman, P. a J. Kott. Teplotní zatížení opěrného systému chrámu sv. Barbory v Kutné Hoře. In: *Nové trendy ve statice a dynamice budov*. Bratislava: Slovak University of Technology, 2006, 5-9. ISBN 80-227-2479-3.
- Fajman, P., J. Kott a J. Vinař. Opěrný systém chrámu svaté Barbory v Kutné Hoře. *Svorník*. 2007, 5, 127-140. ISBN 978-80-86562-09-4.
- Mills, A. F. *Basic heat and mass transfer*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. ISBN 0-13-096247-3.

# Analýza poruch a ochrana památek před účinky povodní

Miloš Drdáčký

Povodňové škody na nemovitých objektech kulturního dědictví vykazují společné znaky, které mohou být využity při jejich třídění i návrzích na opatření, která těmto škodám předchází nebo je zmírňují. Kapitola je zaměřena na architektonické dědictví, historickou infrastrukturu zahrnující stavby, konstrukce či jiné objekty a na umělecké objekty samostatně stojící nebo tvořící integrální část staveb. Nezahrnuje historická města, archeologická naleziště, zahrady, parky, vodní díla a krajinářské památky. Podobně jsou studovány problémy materiálů a konstrukcí bez uvážení společenských dopadů a úspěchů či selhání krizového řízení, přestože tyto prvky výrazně ovlivňují povodňové škody. Je jim věnována následující kapitola.

Osobní zkušenost autora a jeho spolupracovníků, údaje z literatury a ze speciálních databází vyvinutých v ÚTAM<sup>1</sup> i výsledky výzkumných projektů<sup>2</sup> tvoří podklady k této kapitole a k závěrům, které přináší. Obsah databází se neustále doplňuje, a proto se mění i údaje, které jsou k dispozici pro analýzy a návrhy doporučení ochrany památek před povodněmi. Platnost zde uvedených návrhů to však nemění, jenom rozšiřuje o další poznatky.

Existují historické záznamy o poškození či haváriích zvláštních nebo významných konstrukcí. Historie poruch mostů například ukazuje, že tyto konstrukce krutě trpí během své existence z často opakovaných a nezdělaných i velmi devastujících povodní (Drdáčký a Slížková 2007). Řada článků uvádí historické příklady o několik století zpět (Munzar a Ondráček 2005 nebo Deutsch a Pörtge 2001). Podobně byly publikovány specifické metodiky pro hodnocení povodňových škod objektů kulturního dědictví (Kelley 1994) včetně nebezpečí po povodni, např. biologických infekcí a biodegradace (Mattsson a Oftedal 2004). Nicméně většina poznatků není publikována v široce dostupných médiích a zůstává skryta v případových studiích nebo zprávách o analýze škod, často psaných v jazycích obecně nesrozumitelných.

Můžeme říci, že systematická data o povodňových škodách na památkách i o opatřeních chránících památku proti povodním jsou řídká a téměř výjimečná. Byl to též jeden ze závěrů studie Evropského parlamentu (Drdáčký et al. 2007) souhlasně s výsledkem jiných studií („Flood Policy Inventory“ nebo Colombo a Vetere Arellano 2001). Ve zprávě „Flood Police

<sup>1</sup> Např. systém MONDIS, viz kapitola „Systém dokumentace poruch historických konstrukcí a materiálů“.

<sup>2</sup> Např. evropský projekt CHEF Cultural Heritage Protection Against Flooding, Drdáčký et al. (eds), 2011 M. Drdáčký et al. (eds). *Příspěvek technických věd k záchraně a restaurování památek*. © ÚTAM AV ČR Praha, 2015.



**OBRÁZEK 114:** Svalená zeď zahrady Trojského zámku povodní v roce 2002 (Foto M. Drdáký)

Inventory“, kterou vydává evropská síť „Flood Awareness and Prevention Policy in border areas“ (FLAPP), sdružující 35 partnerů v 16 zemích, byla nalezena pouze jedna zmínka o odpovědnosti při plánování opatření proti povodňovým rizikům v souvislosti s památkami v Irsku. Ve zprávách NEDIES („Natural and Environmental Disaster Information Exchange Service“) není ani slovo o kulturním dědictví nebo o památkách.

Osobní zkušenosti autora a údaje z posuzování poškozených objektů při nedávných povodních představují poměrně široký vzorek typických poruch na památkách, způsobených povodněmi. Přestože je velmi obtížné zobecňovat všechny pozorované poruchy ve vztahu k památkám a přiřadit je určitým kategoriím, byl vytvořen návrh systému klasifikace typů poškození, způsobených určitým působením vody a její statické i dynamické síly (Drdáký 2010b). Některé typy poškození nejsou výlučně typické pro historické objekty a mohou být pozorovány i na jiných stavbách.

## **Působení povodně na památkové objekty**

### ***Vodorovný hydrostatický tlak vzduté vody***

Vodorovný hydrostatický tlak vzduté vody je úměrný výšce vodního sloupce a může zejména poškodit nebo zničit lehké výplně otvorů ve stavbách, např. výplně dveří nebo zasklení oken, což může dále vyvolat další škody. Je nebezpečný zejména pro dlouhé volně stojící zdi (**obr. 114**)



**OBRÁZEK 115:** Utržená a odplavená střecha kuželníku – Podhoří 2002 (Foto M. Drdáčký)

a ploty, pokud působí jednostranně, tj. při jednostranném zaplavení. Destrukční účinek je obvykle ještě zesílen dynamickou složkou proudu. U podsklepených objektů zvyšuje tlak okolní zeminy na podzemní zdi a při nestejně výšce hladiny ve sklepech a v okolním terénu může dojít k prolomení stěn. Podobný efekt můžeme pozorovat i na opěrných zdech.

### ***Svislý hydrostatický tlak***

Svislý hydrostatický tlak (vztlak) způsobuje na památkách řadu rozdílných poškození. U podsklepených objektů může poškodit podlahy sklepů nadzvednutím či prolomením. Vztlakové síly mají snahu nadzvednout jakýkoliv objekt a snižují tak jeho gravitační stabilitu proti překocení. Při zaplavení celých objektů se nadzvednutí projevuje zejména u střech historických objektů u zděných staveb nebo vyzdvižením celých dřevěných staveb s případným oddělením od základových konstrukcí. Uvolněné objekty nebo části pak mohou být odplaveny proudem vody do značných vzdáleností (**obr. 115**). Movité objekty ve stavbách jsou samozřejmě nadzdvíženy také a často končí překoceny (**obr. 116**). V historických objektech patří mezi největší problémy vysazení dveřních či vratových křídel ze závěsů, neboť často bývají po povodni nakupeny v horizontální poloze, tvoří bariéry nebo blokují dveřní otvory (**obr. 117**). Vztlak je rovněž příčinou průniku vody kanalizačními, odvodňovacími nebo ventilačními systémy do míst ležících pod hladinou vody a chráněných vertikálními bariérami.

### ***Pomalé zaplavení objektu vodou***

Stavby ve větší vzdálenosti od povodňového proudu jsou zaplavovány pomalou rychlostí proudění vody a stejným způsobem voda i opadá. Škody se projevují spíše kvůli dlouhodobému působení vody, které vyvolává vymývání jemných částí zeminy z hlíněných malt i podloží. Movité plovoucí předměty (např. stoly) jsou přemísťovány pomalým prouděním vody v interiérech i mezi místnostmi. Dlouhodobá přítomnost vody způsobuje nasycením materiálů vodou řadu dalších poruch, které jsou popsány níže (objemové změny, přetížení, změny v zeminách apod.).





**OBRÁZEK 116:** Překocení a transportovaný nábytek – archiv architektury Invali-  
dovna 2002 (Zdroj <http://www.ntm.cz/projekty/vysouseci-pracoviste/index.html>)



**OBRÁZEK 117:** Typické vysazení dveřních křídel – ba-  
rokni dům Praha 2002 (Zdroj <http://www.ikaros.cz>)



**OBRÁZEK 118:** Vodním proudem probouraná hliněná zeď – Veltrusy 2002 (Foto M. Dropka)

### *Dynamický účinek vodního proudu*

Rychlý proud vody bez ohledu na to, jak velké množství vody přepravuje, patří mezi nejnebezpečnější a nejdestruktivnější účinky povodně. Jako příklad uveďme poruchu zdi z nepálených cihel v areálu Státního zámku Veltrusy, kdy malý proud vody stříkající do objektu otvorem v zasklení okna vytěžil v 60 cm tlusté zdi otvor o rozměrech 150 × 200 cm (**obr. 118**). Silný proud vody dokáže přemístit koryto řeky, je příčinou většiny poškození historických mostů a přehradních nebo rybníčních zemních hrází. Snadno vymývá půdu pod základy nebo maltu i cihly nebo kámen ze zdiva.

Podemílání základů mostních pilířů, založených na štěrkopísku, a podemílání břehů je nejčastěji určenou příčinou velkých havárií historických mostů (**obr. 119**). Problém vzniká ve chvíli, kdy je zablokovan průtok pod mostním obloukem např. naplaveným dřevem nebo ledovými krami a voda proudí pod touto bariérou velmi rychle podél dna s turbulencemi, které vymývají podloží. Mosty založené na skalním podloží nebo na pilotách jsou v tomto ohledu mnohem bezpečnější.

Na historických mostech jsou další rychlým proudem vody ohroženou konstrukcí parapetní zdi. Většinou bývaly vysoké, protože sloužily i obranným účelům. Např. na Juditině mostě v Praze byly parapetní (poprsní) zdi 2 m vysoké a 30 cm tlusté, původní Karlův most měl zdi vysoké 160 cm. Při větších povodních dosahuje úroveň vody vysoko nad úroveň mostovky a parapetní zdi nemohou takové kombinaci statického i dynamického tlaku úspěšně vzdorovat. Příkladem jsou poruchy středověkého mostu v Písku (**obr. 120**), kdy byla parapetní zeď vysokou vodou v roce 2002 smetena do řeky, odkud se po povodni podařilo většinu původních kvádrů vyzdvihnout.



**OBRÁZEK 119:** Havárie Karlova mostu v Praze při povodni v roce 1890 (R. Bruner-Dvořák)



**OBRÁZEK 120:** Povodní zničené parapetní zdi mostu v Písku v roce 2002 (Foto Michal Jánký)

### ***Dynamický účinek povodňové vlny***

Destruktivní povodňová vlna vzniká zejména v sevřených údolích vodních toků při tzv. bleskových povodních nebo protržení hrází a bariér. Na mořském pobřeží nebo na březích velkých vodních ploch mohou působit povodňové vlny i při silné bouři nebo zemětřesení (tsunami). Účinky jsou obvykle zcela destruktivní, části domů jsou odříznuty nebo celé domy přemístěny. Povodňová vlna je nebezpečná i pro historické lodě a čluny kotvící na vodě. Malé mosty na malých tocích jsou obvykle zcela zničeny.

### ***Dynamický účinek nárazu plovoucích předmětů***

Náraz plovoucích předmětů ohrožuje zejména mosty, mlýny a jiné stavby v korytech řek nebo v jejich těsné blízkosti. Voda unáší utržené lodě nebo čluny, menší dřevěné stavby (chaty), klády, sudy, kontejnery, ale i celá auta (**obr. 121**).

### ***Vytváření bariér na vodním toku***

Plovoucí objekty a materiál (klády, ledové kry, moderní stavební materiál, zejména izolační desky) se mohou kupit a vytvářet bariéry na březích vodních toků, před mosty nebo na nich



**OBRÁZEK 121:** Bariéra vytvořená na pěší lávce v Troji v roce 2002 (Foto T. Drdáký)



**OBRÁZEK 122:** Prosednutí násypu pod založením příček ve mlýně v Soběslavi (Foto M. Drdáký)

či na jiných překážkách ve vodním toku, dokonce i v budovách. Bariéry zvyšují hladinu vody, v objektech brání přístupu záchranných týmů při povodni i po opadnutí vody. Jak již bylo řečeno, zvyšují i riziko podemílání základů pilířů mostů a u mostů i zvětšují čelní plochu, vystavenou tlaku vody.

### ***Vlečení ledových ker***

Se zimními povodněmi a pohybem ledových ker souvisí kromě tvorby bariér i nebezpečí silových účinků na objekty (většinou již také zaplavené) v kontaktu s masou pomalu se pohybujícího ledu. V současnosti je toto nebezpečí nižší vzhledem k řadě možností, jak led uvolnit, ale je s ním třeba stále počítat.



**OBRAZEK 123:** Zřícení stropních trámů kombinací biodegradace dřeva a přetížením vodou nasycených konstrukcí skladovaného materiálu na půdě totálně zatopeného domu – Troja 2002 (Foto M. Drdácý)

### ***Zhutnění podloží nebo násypů***

Voda pronikající partikulárními látkami může vymývat a odplavovat jemné částice a způsobit velmi zřetelné zhutnění a dodatečné sedání, které může způsobit další škody na infrastruktuře, např. zlomení kanalizačních rour, poklesy dláždění, dokonce i deformace nebo zřícení příček na mělkých základech na nezhutněných násypech nebo násypech ze stavební suti, což je častým případem v historických objektech (**obr. 122**).

### ***Změny v podzákladí***

Pvodně velmi významně ovlivňují geotechnické podmínky v okolí stavby, zejména podmínky v podzákladí, což je důsledek kombinace nasycení základové půdy vodou a proudění vody v podloží. Typickým projevem je náhlá ztráta únosnosti jílu nebo vyplavení jemných písčitých částí či rekonsolidace zemin nakypřených vzlakem vody. Tyto geotechnické jevy jsou detailně popsány v článku Herle et al. (2010). Jen pro úplnost shrnujeme, že se jedná o sedání v důsledku změny efektivního napětí (časté na památkách v Benátkách), vzlak, zřícení opěrných zdí, deformace na bobtnavých nebo expanzivních zeminách, sesuvy půdy/suťové laviny v důsledku změn v podzemní vodě, eroze/podemílání, hnutí dřevěných základů, deformace bortivých zemin, změny v kríповém chování. Dodatečné sedání způsobuje vady a poruchy stavebních konstrukcí, zejména vznik trhlin.

### ***Nasycení materiálu vodou***

Nasycení materiálů vodou při jejich plném ponoření vede k řadě škod a poruch způsobených objemovými změnami, chemickými reakcemi, ztrátou pevnosti a dalšími. Kromě citlivých



**OBRÁZEK 124:** Boulení vodou nasycené podlahy – Troja 2002 (Foto M. Drdácký)



**OBRÁZEK 125:** Zřícený pohled s vodou a bahnem nasycenou tepelně izolační rohoží (Foto M. Drdácký)



**OBRÁZEK 126:** Příklad odpadávání povrchové vrstvy nepálených cihel po odstranění omítky, což je nevhodné u tohoto typu zdiva. V daném případě však je zdivo velmi heterogenní a nebylo jednoduché odhalit místa s nepálenými cihlami (Foto M. Drdácký)

zemin, popsaných výše, se mohou další materiály zhroutit při nasycení vodou – nepálená hlína, vepřovice, degradované dřevo. Nicméně i pálené cihly ztrácí svoji pevnost a únosnost poddimenzovaného zdiva a jeho tuhost (Sandu 2008) se významně snižují, což může vést až k celkovému zřícení konstrukce nebo stavby. Nasycené staré a ztrouchnivělé dřevo se také snadno poruší (**obr. 123**). Zdravé dřevěné prvky bobtnají a expandují bez porušení, a pokud je těmto deformacím bráněno, mohou vyvozovat na okolní konstrukce síly, obdobné lisům. To iniciuje trhliny ve zdivu, posunutí zdiva, boulení stropních trámů s pevně zazděnými konci, boulení podlahových polštářů s typickou kopulovitou deformací (**obr. 124**). Vodou nasáklé stropní násypy a tepelně izolační vrstvy zvyšují svoji hmotnost, což ještě může být zhoršeno vrstvami bahna a jiných plovoucích nečistot a končit zhroutilím stropů nebo stropních podhledů (**obr. 125**). Kamenné zdivo na vápennou maltu je celkem stabilní, zdivo z nepálených cihel může trpět odlupováním a odpadáváním povrchových vrstev cihel během sušení,



**OBRÁZEK 127:** Příklad znečištění domu, který byl celý pod hladinou vody (Foto M. Drdácý)

stejně jako některé slínové horniny (**obr. 126**). Rozpustné materiály mohou být vyplavovány z cenných památkových vrstev, např. pigmenty z nástěnných maleb. Materiály pojené kličem se obvykle rozpadnou.

Snížení pevnosti u hornin také závisí na jejich stupni nasycení (Peschel 1977, Kocher 2004). Siedel (2010) publikoval velmi detailní přehled změn pevnosti i dilatačních charakteristik různých typů kamene vlivem vlhkosti.

### ***Kontaminace materiálů chemickým a biologickým znečištěním***

Velká voda obvykle přepravuje různé chemické látky a mikroorganismy, které mohou u památek vyvolat chemickou degradaci nebo biologickou infekci. Změna pH ovlivňuje rozpustnost rozmanitých materiálů, zejména uhličitanů v kyselém nebo křemičitanů v alkalickém prostředí. Organické sloučeniny ve freskách jsou velmi citlivé na úroveň pH a mohou se snadno rozpouštět v alkalickém prostředí. Sírany (sádrové architektonické detaily) jsou také značně citlivé. Železité materiály mohou být napadány chloridy, což je nebezpečné pro výztuž ve starých betonových konstrukcích. Kontaminace rozpustnými solemi s následnou tvorbou výkvětů zvyšuje riziko znečištění povrchu. Vlhké materiály jsou snadněji kolonizovány biologickými vetřelci a toto nebezpečí je zintenzivněno kontaminovanou vodou. Může restartovat růst „dřímajících“ (latentních) činitelů.

### ***Znečištění památkových objektů***

Během povodní je vodou unášeno bahno a drobné nečistoty a úlomky, které se ukládají do historických objektů a na jeho povrchy (**obr. 127**).

### ***Poruchy po povodni***

Období po opadnutí vody je pro památky téměř stejně nebezpečné jako povodeň samotná a může v něm vzniknout nebo se projevit řada poruch. Příklady zahrnují trhliny z rozdílného sedání, objemové změny při vysoušení, solné výkvěty při vysoušení, biologické napadení a růst organismů, nevhodné opravné zásahy, zejména rychlé čerpání vody ze sklepů a podzákladí, ztráta soudržnosti některých materiálů při rychlém vysoušení (nepálené cihly), změny vnitřního prostředí a klimatu (vysoká vlhkost) apod.

Kategorizace sil a zatížení působících na památky během povodní pomáhá navrhnout a realizovat dočasné nebo stabilní opatření chránící objekty kulturního dědictví před poškozením nebo zničením. Preventivní opatření představují nejefektivnější nástroje pro zmírnění dopadů jakékoliv přírodní katastrofy. Povodně tuto úlohu usnadňují, neboť jsou dobře lokalizované a relativně dobře předvídatelné na základě povětrnostní situace.

### **Prevence povodňových poruch na památkových objektech**

Opatření pro prevenci povodňových poruch na památkových objektech se obvykle dělí na dva typy: technické a organizační/operativní (Drdácký et al. 2007). Technická opatření je někdy obtížné na památkách realizovat, protože jsou většinou viditelná a rušící a navíc často nejsou ani hospodárná. Aplikace norem pro ochranu kulturního dědictví před účinky povodní vede k problému řešení otázek zachování originality, autenticity a estetických kvalit a hodnot památek. Ve skutečnosti není k dispozici potřebná evropská norma, přestože by standardizace některých preventivních procesů byla užitečná, např. dokumentace a monitoring.

Generalizovat úspěšné příklady praxe v dostatečně informativní podobě je obtížné. Nicméně z některých základních principů, které se ukázaly být efektivní, se můžeme poučit v literatuře (Drdácký et al. 2011). S využitím výše zmíněné kategorizace vad a poruch autor navrhl třídít památkové objekty podle úrovně jejich zranitelnosti do pěti kategorií: (0) objekty odolné proti povodním a působení vody, (1) objekty z materiálů silně reagujících na vlhkost změnou objemu, (2) objekty z materiálů ztrácejících pevnost v důsledku vlhkosti, (3) objekty náchylné k částečnému poškození povodňovým zatížením a (4) objekty a prvky náchylné ke zhroucení nebo odplavení. Dělení bylo převzato i do nové Metodiky MK ČR (Nedvědová et al. 2014) a v následující části bude využito pro popis vybraných opatření.

Doporučení a pokyny, jak se chovat při povodních, mají dlouhou historii a většinou se týkaly organizačních nebo operačních opatření. V českých zemích byl takový návod vydán již v roce 1538 a týkal se ochrany rybníků a nádrží. Další vládní nařízení z roku 1542 nařizovalo otevření jezových propustí během povodní (Munzar a Ondráček 2005). Dlouhodobě trvá snaha pečlivě analyzovat povodňové případy a poučit se z nich pro zlepšení řízení krizové situace, návrh preventivních opatření i chování po opadnutí vody. Takové příklady např. uvádí Thieken et al. (2005) nebo Messner a Meyer (2005). Návod k hodnocení povodňových škod na kulturním dědictví, založený na zkušenostech z povodně na řece Mississippi v roce 1993, navrhl Kelley (1994). Jak již bylo zmíněno, povodňové dopady na norské památky analyzovali Mattsson a Oftedal (2004).

Evropská komise věnovala v posledních letech nemalé prostředky na výzkum řízení povodňových rizik, např. podporou velmi detailního projektu FLOODsite, vždy však bez uvážení specifik záchrany a ochrany kulturního dědictví. Systémy a metody pro hodnocení škod



neberou v úvahu ztráty na kulturních a přírodních hodnotách. Nicméně navrhovaná obecná opatření většinou přispívají i k ochraně památek. Jediným evropským projektem zaměřeným výhradně na zachování kulturního a přírodního dědictví byl již zmíněný projekt CHEF (Cultural Heritage Protection Against Flooding – CHEF 2011).

## **Strategie a opatření k ochraně památek**

Před uvedením příkladů konkrétních konstrukčních opatření uvedme několik poznámek týkajících se nestrukturálních nástrojů zvýšení prevence škod na památkách z přírodních hrozeb. Podrobnější informace přináší Nedvědová et al. (2014).

### ***Pravidelné prohlídky zdravotního stavu památek***

Pravidelné prohlídky zdravotního stavu památek se týkají všech kategorií objektů kulturního dědictví, které jsou obecně ohroženy některým přírodním rizikem, neboť i proti povodním odolné objekty mohou rychle tuto odolnost ztratit při nedostatečné údržbě. Zvláštní pozornost je třeba věnovat konstrukční celistvosti a případným vadám hrází a přehrad, zejména ve vztahu k historickým vodním stavbám (rybníkům a kanálům), dále pak mostům, zvláště pokud jsou malé a provedené z materiálů citlivých na vodu.

Vady a nedostatky zjištěné při pravidelných prohlídkách musí pak být opraveny co nejdříve, aby objekty zůstaly v dobře udržovaném stavu a zdravé. V řadě případů může údržba vyžadovat provedení restaurátorských zásahů včetně konsolidace nebo zesílení materiálů či konstrukcí. Takové práce musí být provedeny tak, aby se vyloučily případné negativní jevy při přírodní katastrofě.

### ***Krizové plány a návody***

Povodňové krizové plány a návody, jak se chovat při krizové situaci, patří mezi nejdůležitější preventivní opatření výrazně omezující poškození a ztráty na kulturním dědictví. Musí vzít v úvahu nemovité i movité kulturní dědictví včetně přírodního dědictví. Škody na movitém kulturním dědictví jsou podle nedávných zkušeností mnohem větší než na stavbách a konstrukcích a obvykle jsou důsledkem nevhodných či nedostatečných evakuačních plánů a řízení krizové situace – tedy problémy v oblasti organizačních a operačních opatření.

Většina návodů a doporučení pro oblast nemovitého kulturního dědictví je založena na úvaze, že absolutní ochrana před povodní je vzhledem k vysokým nákladům a značné nejistotě úspěšnosti většinou nedosažitelná i nevhodná. Opatření tak směřují ke kombinaci řízení rizik na jedné straně a snížení zranitelnosti na straně druhé (např. Hooijer et al. 2002).

Velmi instruktivní návod „Preparing for Floods“ vydala ve Velké Británii kancelář místopředsedy vlády v roce 2003. Ukazuje způsoby, jak zlepšit odolnost proti povodním u obytných domů a je využitelný i pro památky. Podobně užitečná je pro ochranu památek publikace „Before and After Disasters“ (FEMA 2005). Specificky zaměřené průvodce na oblast kulturního dědictví v situacích hrozby přírodní katastrofy opakovaně vydává i ICCROM.

Je třeba zdůraznit, že všechny krizové plány musí obsahovat mapy s vyznačením umístění kulturního dědictví v záplavové oblasti s jasně kategorizovanou zranitelností a potřebou nouzového opatření. Musí být dále zajištěny přístupové cesty, dopravní prostředky pro evakuaci movitého kulturního dědictví a skladovací prostory pro evakuovaný materiál.

### ***Systémy včasného varování a sdílení informací***

Včasné varování a sdílení objektivních a co nejpřesnějších informací sehrává zásadní roli při zmírňování povodňových škod a dopadá na všechny výše zmíněné kategorie objektů. Při selhání těchto nástrojů dochází k prudkému nárůstu škod včetně totálních ztrát na kulturním dědictví, jak ukázala zkušenost z ničivé povodně ve střední Evropě v roce 2002.

### ***Připravené technické protipovodňové prostředky***

Technické prostředky proti zaplavení památkových budov nebo jejich okolí jsou většinou součástí integrálních ochranných opatření větších území, zejména sídel. Typicky zahrnují stabilní stěny a hráze s uzavíratelnými branami nebo dočasné bariéry, které mohou být snadno instalovány na předem připravené kotevní podpory. Do této kategorie zahrnujeme i dočasné zábrany pro těsné uzavření a ochranu okenních a dveřních otvorů, větracích a podobných kanálů, např. speciálními okenicemi, automatickými uzávěry nebo třeba jen pytli s pískem. Technické prostředky jsou použitelné pro všechny kategorie objektů, nicméně, vždy je třeba jejich instalaci řešit podle konkrétní situace a s ohledem na památkové požadavky.

### ***Dočasné zesílení či podepření***

Dočasné zesílení nebo podepření potřebují volně stojící sochy ohrožené proudem vody nebo zdi s předpokládaným jednostranným zatížením vysokou vodou. U takových zdí je však vhodné umožnit zaplavení symetrické, tedy z obou stran, např. zřízením dočasných otvorů ve zdi, umožňujících vniknutí vody za zeď i její odtok po povodni. Přídavné podpory nesmí vést ke vzniku přehrazení toku zachytáváním plovoucích předmětů. Zesilování je nutné pro zvýšení odolnosti existujících dveří, zasklení nebo lehkých stěn.

Doporučuje se i podepření dřevěných stropních konstrukcí, kde může dojít k nadměrným deformacím kvůli přetížení vodou nasycených násypů, izolací i dřeva.

Mezi tato opatření můžeme zahrnout i dočasnou povrchovou ochranu materiálů náchylných k rozplavení a vymývání, např. stěn z nepálených cihel, násypů, zemních hrází, stejně tak jako fresek a podobných památkově hodnotných povrchů. Týká se i kamenného zdiva na hliněnou maltu, zejména u opěrných zdí, kde je navíc většinou třeba přidat i dočasné podepření.

### ***Snížení zatížení***

O snižování zatížení tlakem vody při povodni se snažíme zejména u výše zmíněných volných zdí, mostů a podlah podzemních prostor. Na mostech se při nebezpečí velmi vysoké vody dosahující nad mostovku doporučuje snést parapetní zdi nebo zábradlí, případně i sochy (které však pro jejich ochranu většinou stačí jen přídavně ukotvit), pro snížení plochy vystavené proudu vody. Toto opatření pomáhá nejen k záchraně původního materiálu parapetních zdí u historických mostů a soch, ale také k záchraně mostu samotného. Volné stěny se nejlépe chrání zaplavením prostoru za zdi. Stejný princip je úspěšný i při ochraně podzemních stěn a podlah ve sklepích, kde zaplavení vyrovnává tlak i vztlak a zabraňuje poškození.

Významné síly vyvolávají objemové změny vodou nasáklých prvků, zejména dřevěných, pokud nemohou volně dilatovat. Poruchám lze zabránit vytvořením dostatečně velkých dilatačních spár, které umožní dřevěným stropním trámům nebo podlahovým polštářům prodloužení bez porušení okolních konstrukcí.

Do této kategorie patří i odstranění všech silně nasákových nebo bahno zadržujících materiálů, např. vysokých vrstev sena, izolačních rohoží apod. z půdních prostor, neboť mohou vést k přetížení stropních konstrukcí po opadnutí povodňové vlny.

### ***Ukotvení odplavitelných součástí staveb i celých objektů***

Lehké mosty, lávky, dřevěné střechy, dřevěné konstrukce a objekty, i lodě a čluny by měly být ukotveny k podporujícím konstrukcím a zajištěny proti utržení a odplavení.

### ***Odstranění vodou unášených objektů***

Vodou unášené objekty jsou velmi nebezpečné pro mosty i stavby v zaplaveném území a musí být zachyceny a zajištěny tak, aby nárazem neohrozily výše uvedené stavby. U mostů, pokud nejsou zaplaveny, se většinou používá pojízdného jeřábu, kterým se loví plovoucí objekty a zabraňuje vytvoření bariéry.

### ***Řízení činností po opadnutí vody***

Období po povodni je rovněž velmi kritické pro všechny kategorie objektů kulturního dědictví. Proto jsou vydávány pokyny a příručky pro činnosti po opadnutí vody. Radí, jak předejít škodám z rychlého sedání, jak včas opravit potenciálně nebezpečnou vadu nebo poruchu, jak optimalizovat proces vysoušení, aby se vyloučil rozpad materiálu nebo biodegradace, jak omezit krystalizace a provádět odsolování, jak zabránit korozi ze znečištěné vody a škodám z klimatických jevů atd.

## **Trvalá a dočasná protipovodňová opatření na památkách**

### ***Objekty a konstrukce odolné proti povodním a působení vody (kategorie 1)***

I památky odolné proti povodním vyžadují provedení preventivních nebo dočasných opatření. Pokud jsou situovány v územích s vysokou pravděpodobností inundace, dá se předpokládat, že přežily řadu historických povodní a nejlepší ochranou je udržovat je ve stavu, který se osvědčil. To se týká především velmi vysoké vody.

Nicméně i takové objekty mohou být ponořeny do mělké vody během povodně a jejich vnější i vnitřní konstrukce, materiály a výzdoba jsou ohroženy zavodněním. Je vhodné interiéry chránit utěsněním všech vstupních otvorů dočasnými nebo permanentně osazenými uzávěry oken a dveří. Nezřídka je třeba provést zesílení zasklení a přidat bariéry z pytlů s pískem. Podlahy přízemí je užitečné dočasně vyztužit a zatížit (např. sudy nebo nádržemi napuštěnými vodou) nebo podepřít proti vztlaku.

Je absolutně nutné snížit na minimum možnost znečištění povodňovou vodou. To vyžaduje uzavřít a utěsnit všechny kanalizační zaústění, kterými by mohla pronikat znečištěná voda do objektu. Ideální je osadit na všechny hlavní svody automatické uzávěry proti vzduté vodě.

Historické budovy mohou nést významné památkové detaily nebo informace, které mohou být povodní vážně poškozeny nebo zničeny. Umělecké detaily, dřevěné podlahy, nátery nebo nástěnné malby stejně jako režné kamenné povrchy mohou trpět fyzikálním, chemickým nebo biologickým napadením během povodně či po opadnutí vody. Pokud je to z památkového hlediska přijatelné, mohou být povrchy citlivých objektů předem ošetřeny hydrofobními nátěry nebo krátkodobě chráněny dobře utěsněnými ochrannými plastickými fóliemi.

V případě plného zaplavení se doporučuje otevřít, vysadit a uskladnit dveřní křídla nejlépe mimo dosah vody.

Během povodně musí být objekty chráněny i proti vniknutí z plavidel a zabezpečeny proti vandalismu a zlodějství. Zvýšená hladina vody může otevřít přístupové cesty ve vyšších podlažích, která jsou jinak nedostupná.

Evakuace nábytku a dalších movitostí, např. knih, ze suterénů a přízemí do vyšších podlaží musí být plánována a řízena tak, aby se zamezilo možnému přetížení stropních konstrukcí a schodišť nepatřičným zvýšením užitého zatížení ve vyšších patrech budovy.

### ***Objekty z materiálů silně reagujících na vlhkost změnou objemu (kategorie 1)***

Masivní dřevěné prvky, např. stropní trámy nebo klády, se při nasycení vodou roztahují – bobtnají rozdílně v různých směrech. Pokud jsou tyto prvky volně uloženy, je tato deformace více méně reversibilní a po vysušení zaujmou masivní prvky téměř stejný tvar jako před namočením. Na druhé straně deskové dřevěné prvky se nejen roztahují, ale také bortí a kroutí a nikdy se po prostém vysušení nevrátí do původního tvaru. Proto je třeba tyto prvky a konstrukce evakuovat z ohrožené budovy, pokud je to možné. Speciálním případem jsou podlahy, které v historických objektech bývají obvykle složeny z dřevěných prvků spojených často do několika vrstev s mnohsměrnou orientací vláken dřeva, což pomáhá bránit výraznému kroucení. Podlahy mají tendenci boulet kvůli zamezení jejich roztažení při zvlhčení. Tento jev se vyloučí vytvořením dostatečně široké dilatační spáry po obvodě místnosti mezi podlahou a stěnami.

Zvláštní problém nastává u kombinovaných konstrukcí, kde se v jednom celku vyskytují materiály s rozdílnou vlhkostní expanzí. Typickým příkladem je výše uvedená dřevěná podlahová konstrukce nebo stropní konstrukce vložená mezi zděné stěny. Pokud není v takovém případě dřevěné konstrukci umožněna patřičná volnost pohybu, může dřevo při expanzi poškodit zděnou konstrukci vznikem trhlin, případně i posunutím celé stěny. Vznikající síly jsou velmi vysoké.

Expanzivní zeminy patří do této kategorie problémů, např. jíly. Tyto materiály obvykle reagují na změnu vlhkosti pomalu a poškození se objevují se zpožděním. Chování zeminy lze řídit drenážemi a čerpáním vody.

### ***Objekty z materiálů ztrácejících pevnost v důsledku vlhkosti (kategorie 2)***

Nasycení vodou má zdrcující vliv na mechanické vlastnosti nepálených cihel, takže hliněné zdivo se může zhroutit velmi rychle, zejména v situacích, kde je zaplavení ještě spojeno s vymýváním proudem vody. Zkušenosti z povodní ukazují, že zdivo z nepálených cihel opatřené oboustrannou vodě odolnou, např. vápennou omítkou přežívá povodně bez poškození. Proto lze doporučit chránit hliněné zdivo dočasným oboustranným opláštěním a ochranou povrchu hliněných cihel před přímým kontaktem s vodou. Nedávná studie o konsolidaci hliněného zdiva ukázala pozitivní účinek povrchové úpravy nátěrem želatiny a ethylsilikátu proti vlivu střídání zaplavení a vysoušení (Ferron 2007).

Cihelné nebo kamenné zdivo na hliněnou maltu nebo hliněnou maltu s nízkým obsahem vápna či cementu je také velmi zranitelné při povodni. Zejména nepravidelné plášťové zdivo může při povodni rychle ztratit únosnost. Preventivní opatření jsou stejná jako u hliněného zdiva, tj. zamezení přímého kontaktu malty s vodou a případně vyztužení oboustranným obedněním.

Vlhkost však také snižuje únosnost zdíva, které je provedeno z cihelného nebo kamenného zdíva na kvalitní maltu. Pevnosti vodou nasycených cihel nebo některých hornin mohou klesnout až na 50 % jejich pevnosti v suchém stavu (Siedel 2010). Proto by měly být všechny zděné budovy v záplavových územích zkoumány z hlediska jejich možného snížení bezpečnosti při zaplavení vodou. Zejména je třeba posoudit únosnost mokrych zděných pilířů a kleneb a v případě nedostatečné bezpečnosti je třeba navrhnout jejich zesílení nebo předepsat podepření při krizových situacích. Podobné požadavky musí být vyznačeny do záplavových map a zahrnuty do krizových plánů.

Ztrouchnivělé dřevo – ať již z jakéhokoliv důvodu, např. působením dřevokazných hub nebo hmyzu, má typicky nižší hustotu a pojme více vody, což zvyšuje zatížení vlastní tíhou. Pevnost i nového dřeva se po nasycení vodou snižuje, u biodegradovaného dřeva je snížení ještě výraznější a masivní historické trámy se nezřídka zlomí. Tento efekt se násobí všude, kde dochází k lokálnímu oslabení průřezů, tedy především ve spojích. Také dřevěné konstrukce mohou vyžadovat při krizových situacích dočasná podepření, zejména ohýbané prvky, což nejen brání jejich porušení, ale také omezuje vznik nadměrných průhybů.

### ***Násypy a podloží s jemnými částicemi***

Nestabilita podloží a základů patří mezi významné hrozby památkám při povodních. Zeminy s jemnými částicemi nebo násypy jsou většinou ohroženy vyplavováním těchto částic a dodatečným sedáním. K vyplavování může docházet proudící vodou, často při opadávání vody po povodni, ale také příliš rychlým čerpáním vody ze zatopených sklepů. Prevencí tedy je řízení rychlosti čerpání vody (Drdáček 2010b). Mělké základy pod příčkami na násypech mohou být zesíleny podepřením nebo injektážemi násypu.

### ***Objekty náchylné k částečnému poškození povodňovým zatížením (kategorie 3)***

Dřevěné střechy, dřevěné sochy, venkovní schodiště, verandy a podobné objekty mohou být nadzvednuty a odplaveny. Je třeba provést inspekci kvality jejich ukotvení a při nedostatecích zajistit nápravu. Základem prevence je pravidelná údržba, někdy je třeba provést i dodatečné zesílení proti účinku povodně.

Zranitelné jsou zejména objekty se sníženou konstrukční robustností. Příkladem takových objektů jsou zděné budovy bez ztužujících věnců. Robustnost může být zlepšena vložením systému vertikálních a horizontálních táhel, zvýšením pevnosti a odolnosti klíčových konstrukčních prvků, tj. prvků, jejichž porucha vede k celkovému zřícení nebo zřícení části budovy, sekundární ochranou klíčových prvků a robustními detaily.

Do této kategorie patří i velké mosty, které většinou vzdorují povodním bez větších poruch. Nicméně vznik částečného poškození je u nich aktuální, zejména poruchy parapetních zdí a základů, jak jsme ukázali výše. Kritickou poruchou je podemletí základů, neboť může způsobit i velké havárie. Podemletí je nebezpečné na šterkopískových podložích a pro jeho prevenci se historicky používala ochrana dřevěnými rošty nesoucími malé bariérové ostrůvky kolem mostních pilířů, dlážděné kamennými deskami (**obr. 128**). Podloží je možno zlepšovat injektážemi a základ je možno chránit také paženými stěnami. Lehké řetězové nebo visuté mosty mohou být ohroženy proudem vody a vytvářením bariér a zde pomáhá dočasné odstranění zábradlí, jak bylo popsáno výše.



**OBRAZEK 128:** *Příklad ochrany základů mostních pilířů proti podemletí malými dlážděnými ostrůvky*

Lokální poruchy uličního dláždění nebo opevnění břehů zahrnují povrchovou erozi, zhutnění násypů a jemných zemin, sufozi nebo vnitřní erozi, obvykle v nedostatečně zhutněných zásypech výkopů apod. Pro prevenci se používají většinou injektáže, často polyuretanovými pryskyřicemi.

#### ***Objekty a prvky náchylné ke zhroucení nebo odplavení (kategorie 4)***

Malé mostky a lávky pro pěší mohou být preventivně chráněny stejným způsobem jako velké mosty, tj. snížením zatížení dočasným odstraněním zábradlí. Nicméně tyto objekty jsou většinou při větších povodních zničeny, a tak se doporučuje před povodní sejmout všechny cenné výzdoby, sochy apod. a umístit je do dočasných skladů.

Volně stojící zdi mohou být chráněny podepřením, což je pro dlouhé zdi nákladné a většinou málo efektivní, nebo levnějším a efektivnějším způsobem vytvořením symetrického zatížení zaplavením zdi z obou stran. Krátké zdi a zejména zdi v nižších podlažích budov mohou být účinně chráněny vyztužením. Stěny stojící kolmo ke směru proudění vody musí být kromě přenesení dynamického účinku vody navrženy také na vyšší hydrostatický tlak, než je tlak z prosté hloubky vody vlivem tzv. zpětné vody, což je třeba uvážit při návrhu vyztužení sklepů a přízemí. Několikrát zmiňované snesení parapetních zdí mostů vyžaduje provedení detailní dokumentace a očíslování jednotlivých kamenů pro snadnější rekonstrukci.

Lehké nedostatečně kotvené objekty jako altánky a chaty, ale i těžší dřevěné roubenky jsou snadno odplavitelné. Pro prevenci jejich škod je třeba zlepšit ukotvení a doporučuje se evakuovat všechny movité umělecké předměty i sejmutelné architektonické detaily pro případ havárie.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu 6. RP EK „CHEF“ a projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

- Colombo, A. a A. L. Vetere Arellano (eds.). *Lessons learnt from floods*. NEDIES Report, EUR 20261 EN. Ispra: Institute for the Protection and Security of the Citizen, 2002.
- Deutsch, M. a K.-H. Pörtge. Historische Hochwasserinformationen – Möglichkeiten und Grenzen ihrer Auswertungen. In: *Hochwasser – Niedrigwasser – Risiken*. München, Hirthammer, 2001, 23-38.
- Drdácký, M. (a). Impact of floods on heritage structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2010, 24(5), 430-431.  
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000152](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000152)
- Drdácký, M. (b). Flood damage to historic buildings and structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2010, 24(5), 439-445.  
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000065](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000065)
- Drdácký, M., L. Binda, I. C. Hennen, C. Köpp, L. G. Lanza a R. Helmerich (eds.). *CHEF - Cultural heritage protection against flooding*. Prague: ITAM, 2011. ISBN 978-80-86246-37-6.
- Drdácký, M., L. Binda, I. Herle, L. G. Lanza, I. Maxwell a S. Pospíšil. *Protecting the cultural heritage from natural disasters*. Study of the European Parliament. IP/B/CULT/IC/2006\_163, PE 369.029. Brussels: European Parliament, 2007.
- Drdácký, M., I. Herle, S. Pospíšil a Z. Slížková. Protecting cultural heritage against natural hazards. In: *Seismic Protection of Cultural Heritage. WCCE-Ecce-TCCE Joint Conference 2*. Ankara: Turkish Chamber of Civil Engineers, 2011, 103-122. ISBN 978-605-01-0188-1.
- Drdácký, M. F. a Z. Slížková. Flood and post-flood performance of historic stone arch bridges. In: Laureço, P. B., D. V. Oliveira a A. Portela (eds.). *Arch '07: 5th International Conference on Arch Bridges*. Guimarães: University of Minho, 2007, 163-170. ISBN 978-972-8692-31-5.
- Federal Emergency Management Agency, Before and After Disasters*. FEMA 533, 2005. [www.heritageemergency.org](http://www.heritageemergency.org)
- Ferron, A. *The consolidation of earthen surface finishes: A study of disaggregating plasters at Mesa Verde National Park*. MSc Thesis. Philadelphia: University of Pennsylvania, 2007. Flood Policy Inventory. <http://www.flapp.org>
- Herle, I., V. Herbstová, M. Kupka, a D. Kolymbas. Geotechnical problems of cultural heritage due to floods. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2010, 24(5), 446-451.  
[http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000058](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000058)
- Hooijer, A., F. Klijn, J. Kwadijk a B. Pedroli (eds.). *Towards sustainable flood risk management in the Rhine and Meuse river basins*, NCR-publication 17-2002. Delft: NCR, 2002. ISSN 1568-234X.
- Kelley, S. J. a J. Wiss. *Curriculum on flood damage assessment of cultural heritage properties: relative to the Mississippi River floods of 1993*. Washington: National Trust for Historic Preservation, 1994.

- Kocher M. *Quelldruckmessungen und thermische Druckmessungen an ausgewählten Sandsteinen*. PhD thesis. München: Ludwig-Maximilians-Universität, 2005.
- Mattsson, J. a T. Oftedal. Research on biodeterioration of cultural heritage in Norway. In: Slížková, Z., J. Válek a M. Drdácý (eds.). *Historic Materials and their Diagnostics in the Czech Republic: a State-of-the-Art Review, Vol. 2*. Prague: ITAM, 2004, 477-480. ISBN 80-86246-24-8.
- Messner, F. a V. Meyer. Flood damage, vulnerability and risk perception – challenges for flood damage research. In: *UFZ Discussion papers*. 13/2005. Leipzig: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ, 2005. ISSN 1436-140X.
- Munzar, J. a S. Ondráček. Velké povodně na území České republiky – ztráta historické paměti. *Historická geografie*, 2005, 33, 97-118. ISBN 80-7286-080-1.
- Nedvěďová, K., J. Frankl, L. Balík, O. Šimůnek, V. Herbstová, I. Kopecká, R. Pergl a T. Drdácý. *Posouzení zranitelnosti a prevence poškození kulturního dědictví povodněmi*. Certifikovaná metodika, Ministerstvo kultury ČR, Osvědčení č. 20, 2014.
- Peschel, A. *Natursteine*. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1977.
- Preparing for Floods*, Office of the Deputy Prime Minister, 2003. [www.odpm.gov.uk](http://www.odpm.gov.uk)
- Sandu I. et al. In situ monitoring of the frescoes restoration behaviour for Probotă Monastery. In: *Proceedings First World Conference on Global Climate Change and its Impact on Structures of Cultural Heritage*. Macao, 2008, 83-89.
- Siedel, H. Historic building stones and flooding. Changes of physical properties due to water saturation. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2010, 24 (5), 452-461. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000066](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000066)
- Thieken, A. H., J.-M. Brito, J.-M. Blanchais, K. Morris, M. Vlahov a W. B. M. Brinke. Flood Mission Bulgaria, 25.-29. July, 2005. In: *Final Report*, EU Member States Experts - GFZ Potsdam (Germany), Centre national des Ponts de Secours (France), BCEOM (France/Bulgaria), Environment Agency (UK), Ministry of Transport, Public Works and Water Management (The Netherlands), 2005.



# Historické materiály a technologie

## Replikace výroby vápna

Jan Válek

Po staletí bylo vápno zásadním materiálem, který ovlivňoval konstrukci staveb, jejich funkci a vzhled. Každá doba přirozeně přispěla něčím novým a i vápenné technologie prodělávaly svůj vývoj současně se společností. Nyní má vápno ve stavebním průmyslu pouze marginální úlohu. Na druhou stranu náš po staletí kultivovaný životní prostor, naše historická města a architektonické památky jsou stále ještě živoucím dokladem znalostí, řemeslné dovednosti a estetického cítění našich předků. Snahou výzkumu je využití současných znalostí pro ochranu hodnot, které jsou spojeny s použitím vápna jako historického stavebního materiálu, to jest k ochraně a zachování věrohodnosti a autentičnosti našeho kulturního dědictví. Pro renesanci vápenných technologií bylo třeba: i) identifikovat, dokumentovat a prezentovat zaniklé surovinové zdroje a specifické technologie zpracování vápenného pojiva ve spojení s jejich využitím v historických stavbách, ii) vyvinout a realizovat vápennou pec a zajistit její následné využití pro malovýrobu vápenných pojiv a jejich zpracování tradičními technologiemi, iii) vyvinout, navrhnout a ověřit výrobu a zpracování vápenných pojiv používaných v minulosti s ohledem na možnosti jejich současného použití.

### Mapy surovinových zdrojů a technologií pro výrobu vápna

Jako vhodný prostředek pro komplexní dokumentaci a prostorové zobrazení historických a současných surovinových zdrojů a technologií pro výrobu vápenných pojiv byla vytvořena *Geodatabáze Calcarius*<sup>1</sup> pro území České republiky. Databáze je základem geografického informačního systému, který umožňuje práci s vloženými daty včetně řešení jejich prostorových vazeb a vztahů. Tento informační systém v současné době obsahuje přes 800 záznamů o surovinových ložiscích, pro které, kromě lokalizace, poskytuje i historické údaje a orientační časové zařazení. Dále nabízí podrobnější geologické informace o vápencích z různých lomů včetně jejich chemického složení; obsahuje údaje o 409 vápenných pecích a dalších

---

<sup>1</sup> GIS geodatabáze Calcarius a další mapové aplikace (Specializované mapy s odborným obsahem) jsou přístupné v různých prezentačních prostředcích a službách na internetu. Jednotný přístup je možný na stránkách <http://www.calcarius.cz/gis.php>.

souvisejících technologiích; a uvádí místa nejstaršího využití vápenných technologií. Geografický informační systém navíc umožňuje hledání vztahů k dnešní i k historické krajině, zkoumání polohy prvků vůči sobě navzájem a vytváření nových dat pomocí prostorových analýz.

Prezentačním výstupem, který dovoluje práci s daty širokému spektru uživatelů (architektům, projektantům, technologům, stavebním historikům, odborným památkovým pracovníkům ad.), jsou tři základní webové aplikace, které byly za tímto účelem speciálně vytvořeny ve službě ArcGIS Online:

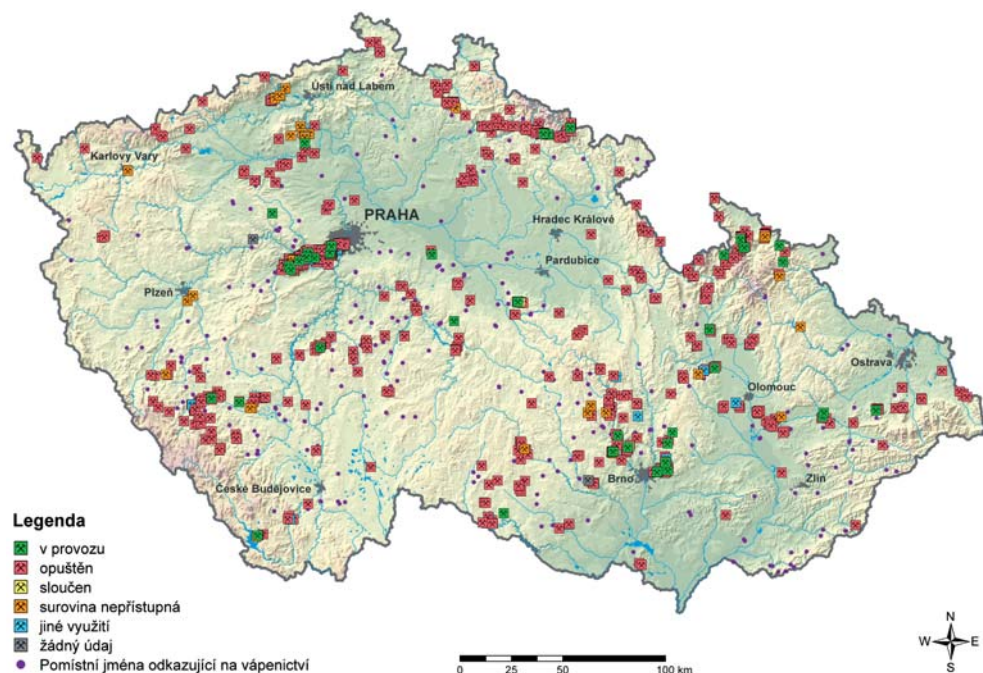
- *mapa historických a současných zdrojů surovin pro vápenné technologie,*
- *mapa karbonátových surovin pro výrobu vápna,*
- *mapa vápenných technologií.*

Navíc je zde k dispozici i digitalizovaná verze dat o karbonátových surovinách ze Soupisu lomu ČSR publikovaného mezi léty 1932 až 1961 celkem v 55 svazcích (Vachtl et al. 1932–1961).

Specializovaná *Mapa historických a současných zdrojů surovin pro vápenné technologie* je vytvořena syntézou dostupných informací o lomech a místech těžby vápence pro výrobu vápna a související technologie (**obr. 129**). Vybrané popisné informace jsou přiřazeny k polohově definovanému bodu, který lokalizuje místo surovinového zdroje. Mapa zobrazuje výskyt dokumentovaných lomů a surovinových zdrojů zhruba od 12. století po současnost. Hlavním atributem mapy je časové zařazení horninových ložisek z hlediska založení jejich těžby, doby provozu, ukončení těžby a opuštění. Tyto informace jsou získány z archivních zdrojů, literatury a ze soupisových a z mapovacích geologických prací, které dané surovinové zdroje popisují. Přesnost a kompletnost mapy je závislá na kvalitě a na přesnosti dochovaných informací a obecně platí, že klesá, čím více je vzdálena od 20. století.

Specializovaná *Mapa karbonátových surovin pro výrobu vápna* umožňuje detailnější zobrazení lokalit na základě chemického složení, stáří a litologického popisu kamene. Hlavním atributem mapy je tedy rozlišení lomů a surovinových zdrojů dle geologického označení vápence a jeho složení. Chemické složení je uváděno jako průměr z analýz uváděných v publikovaných popř. archivovaných průzkumných zprávách. Ve specifických případech je chemické složení doplněno na základě vlastního odběru vzorků a individuálních analýz. Geologická skladba je popisována a doplněna na základě regionálních znalostí. Mapa umožňuje klasifikovat suroviny pomocí cementačního indexu.

Specializovaná *Mapa vápenných technologií* umožňuje zobrazit výskyt historických pecí, mís, karbů, mlýnů a dalších vápenických zařízení počínaje archeologickými nálezy ze starověku a raného středověku a konče průmyslovými a technickými památkami 20. století. Kromě samotného popisu technologie a jejího prostorového umístění je hlavní předností i orientační časové zařazení. Pro určení místa a popis technologie byly využity informace z literatury a z písemných pramenů (Ebel 2014), z Archeologické databáze Čech (Kuna a Křivánková 2006), z historických mapových děl a informace z regionálních muzeí nebo z webových stránek zaměřených na historické či technické památky a z vlastního zjištění v terénu. Archeologické nálezy z oblasti Moravy byly získány z publikovaných písemných pramenů. Přesnost a kompletnost mapy je dána dostupností údajů.



**OBRAZEK 129:** Ukázka jednoho z možných mapových výstupů z databáze Calcarius. Na mapě je zobrazen současný stav existujících a zaniklých lomů karbonátových surovin (stav geodatabáze k 1. 8. 2015)

Mapové informace jsou spravovány databázově v geografickém informačním systému od firmy ESRI, jejímž výhradním dodavatelem v ČR je firma ArcData. Konkrétně je využíván software ArcGIS Desktop úroveň Standard s technologií ArcSDE, Microsoft SQL Server 2008 a dále ArcGIS Server Workgroup Standard pro možnost publikování mapových služeb na web. Samotná databáze je vytvořena v relačním databázovém systému Microsoft SQL Server 2008 R2, s využitím technologie ArcSDE, která umožňuje pracovat s SQL databází v prostředí ArcGIS, konkrétně v ArcCatalogu.

## Pálení vápna v experimentální peci

Historicky byla pro výrobu vápna využívána místní ložiska vápence. Kvalita a vhodnost surovin tak byla dána geologickým výskytem a jeho rozmanitostí. Nepochybně byly upřednostňovány zdroje čistého vápence, které po výpalu poskytovaly bílé vzdušné vápno. Na druhou stranu z literatury i z analýz historických pojiv malt a omítek je známo, že byly využívány i méně čisté suroviny, ze kterých byla vyráběna hydraulická vápna. Pro výzkum těchto dnes již zapomenutých surovin byla navržena vápenná pec, která umožňuje malosériovou výrobu vápna tradičními technologiemi<sup>1</sup>. Dalším výzkumným důvodem pro návrh a provoz vápenné pece bylo popsání vlivu tradičního způsobu výpalu na kvalitu vápna (Válek et al. 2012 a 2013a).

<sup>1</sup> Vyvinutý prototyp vápenné pece tvoří základ Experimentálního centra pro tradiční výrobu vápenných pojiv ÚTAM AV ČR, v. v. i., umístěného v Solvayových lomech u obce Bubovice.

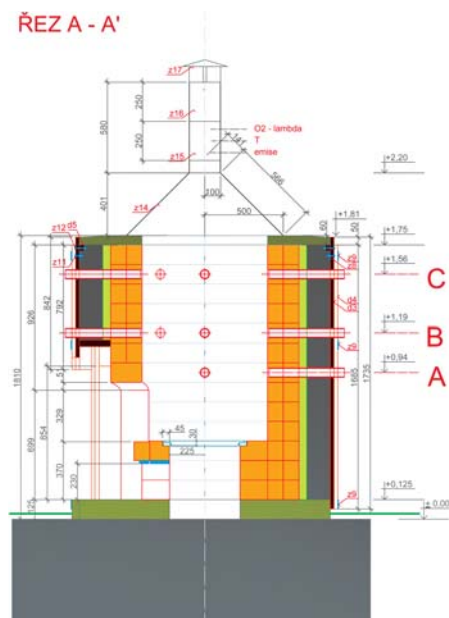
Při návrhu vápenné pece byla zohledněna následující základní kritéria:

- Pec musí umožňovat výpal vápence tak, aby celý proces byl srovnatelný s technologiemi používanými v době od cca 12. do pol. 19. století. Jako zásadní charakteristiky takového technologického procesu byly uváženy: použití dřeva jako paliva; způsob skládání kamene do pece; „ruční“ plnění, přikládání paliva a výběr vypáleného vápence. Na druhou stranu musí být pec i univerzální a tudíž umožňovat výpal, kdy je palivo smícháno s vápencovou vsázkou a hoří tzv. krátkým plamenem<sup>1</sup>.
- Kapacita pece musí být úměrná experimentálnímu provozu. Na druhou stranu musí být dostatečná k tomu, aby reprezentovala technologický proces i v případném větším měřítku. Jednou z mnoha předloh s ohledem na velikost byl provoz vápenných pecí ve Skýcově na Slovensku, které fungovaly na přelomu 19. a 20. stol.
- Návrh a konečné provedení musí být odladěno tak, aby pec byla „prodatelná“ jako produkt pro malovýrobu vápenných pojiv. Tedy zejména splňovat nároky na trvanlivost, jednoduchost obsluhy a bezpečnost provozu. S ohledem na univerzálnost byla pec navržena s možností volby paliva (dřevo, dřevěné uhlí) a s tím souvisejícím způsobem plnění.
- Pro vývojovou fázi bylo ještě přidáno kritérium „demontovatelnosti“ pece a variabilní možnosti monitorování procesu výpalu.

Vlastní konstrukce pece je uvedena na **obrázcích 130 a 131**. Pec tvoří malá cylindrická šachta o vnitřním průměru 0,8 m a výšce 1,3 m nad litinovým roštem. Vnitřní vyzdívka je z šamotových cihel zděných na hliněnou maltu. Šamotová konstrukce je obalena žáruvzdornou izolací o tl. 50 mm. Z vnější strany je pec stažena obručemi a dřevěným svisle kladeným prkenným pláštěm. Prostor mezi venkovním dřevěným pláštěm a izolací je vysypán vápencovou drtí frakce 0–4 mm. Primární přívod vzduchu zajišťuje otvor (20 × 20 cm), který nasává vzduch přes popeliště, a skrz rošt je vzduch přiveden do pece. Sekundární přívod vzduchu (využívaný při použití dřeva jako paliva) je umístěn ve dvířkách topeniště. Hlavu zdíva a pece zakončuje litá 6 cm tlustá betonová deska z románského cementu. Deska byla po zatvrdnutí rozřezána na segmenty, které zajišťují dilataci při roztažnosti ohřevem. Segmenty je též možné vyjmout např. pro inspekci zásypu. Pro monitorování spalin a případnou regulaci tahu je na hlavu pece možno nasadit kuželový nástavec s komínem.

Pec je navržena na maximální vsázkou 1 t vápence. Způsob uložení vápence a velikost jednotlivých kamenů závisí na druhu zvoleného paliva a tím i na průběhu výpalu. Při použití dřeva pro výpal je vápence vyklenut nad prostorem topeniště a poté vyskládán až po horní okraj pece. Důležitou součástí (při tomto způsobu výpalu) je předvídaní teplotních rozdílů v peci. V tradičních vápenných pecích totiž není možné rovnoměrné zahřátí celé vsázky nad 900 °C najednou. V peci vznikne horké jádro a tahové průduchy, kde je dosahováno nejvyšších teplot. Cílem každého výpalu je úplná kalcinace veškeré vápencové vsázky. V důsledku toho se vsázka skládá do pece v různých frakcích, aby procento vypáleného vápna bylo co nejvyšší. Na klenbu se používají spíše plošší, neobroušené kameny skládané tak, aby nebránily průchodu kouře a plamene skrz klenbu. Velikost nejmenšího rozměru klenebních kamenů je od 80 do 150 mm. Do pece se dále rovnají kameny frakce 80–125 mm. Chladnější místa jsou vyplněna frakcí kolem 40 mm.

<sup>1</sup> Více o tradičních technologiích výpalu je psáno jinde (např. Válek et al. 2014b a 2015).



**OBRAZEK 130:** Návrh vápenné pece pro experimentální malovýrobu vápenných pojiv. Řez pecí (návrh J. Válek)



**OBRAZEK 131:** První výpal vápna v experimentální vápenné peci

Při výpalu, kdy je vápence smíchán s palivem, je příkladací otvor vyplněn šamotovou vyzdívkou. Zapálení pece se provádí skrz rošt. Poměr paliva ku vápenci je závislý na druhu použitého paliva a jeho výhřevnosti (jako palivo se používá uhlí, dřevěné uhlí, rašelinové brikety, dřevoštěpkové brikety a další). Obdobně tomu může být přizpůsobena velikost kamene. Obvykle je využívána frakce vápence 60–80 mm v hmotnostním poměru vápence ku palivu 4:1. Vyšší spotřeba paliva oproti kontinuálnímu provozu je dána periodickým provozem pece.

Výpal při použití dřeva jako paliva je rozdělen na několik fází: sušení, ohřev, výpal a chladnutí. Fáze sušení závisí od vlhkosti kamene. V této počáteční fázi je intenzita topení minimální. Doba sušení a přechod do fáze výpalu je určována odhadem. Fáze ohřevu je brána do doby, než je ve středu pece v místě cca 20 cm pod vrchem konstrukce pece dosaženo 900 °C. To v běžných podmínkách, při vsázce 1 t a příkládání 16 kg dřeva za hodinu, trvá 17 až 20 hodin. Trvání následující fáze výpalu je závislé na velikosti kamene a dosažené teploty. Obecně je tento vztah mezi výší dosažené teploty, velikostí kamene a dobou výpalu znám z literatury (Helan a Klement 1960). V případě tradičního výpalu dřevem a výše zmiňovaném velikostním rozložení kamene lze doporučit dobu 15 hodin. Po ukončení výpalu pec chladne přibližně 24 hodin. Následně je kusové vápno z pece vybráno k dalšímu zpracování.

Pro popsání rozložení teplot v peci je během celého procesu výpalu monitorována teplota ve třech horizontálních profilech a třech osách pomocí termočlánků typu S. Většina teplot je sledována po obvodu, ale ve třech pozicích je možno sledovat i teplotní profil od středu k obvodu. Dále je monitorován obsah kyslíku, oxidu uhelnatého a oxidu uhličitého ve spalinách, rychlost proudění vzduchu na primárním přívodu vzduchu a tlak okolního prostředí.



**OBRAZEK 132:** *Historická ilustrace z 15. století zobrazující přípravu malty (Die Hausbücher der Nürnberger Zwölfbrüderstiftungen, Amb. 317, fol. 36r)*

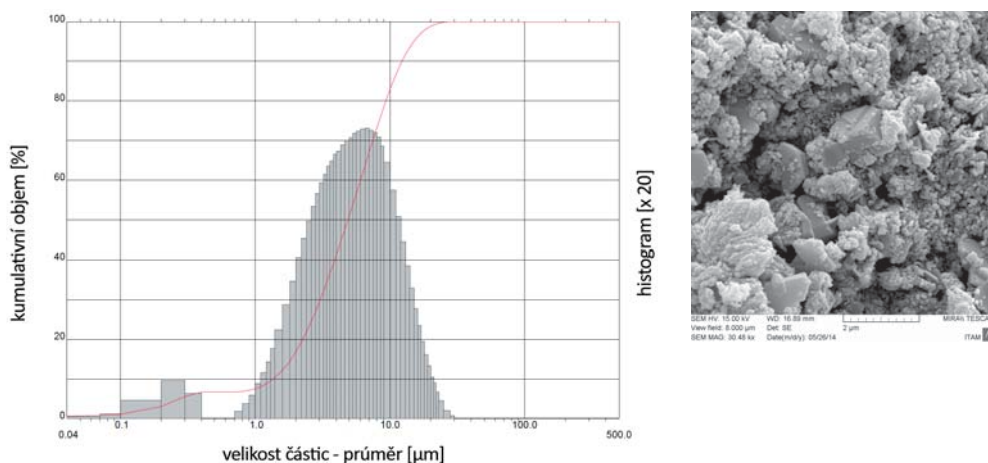
Poměrně rozsáhlé monitorování bylo zavedeno za účelem popsání tradičního výpalu a následné optimalizace celého procesu s využitím známých tradičních metod (zakrývání vrchu pece mazaninou, způsob skládání kamene, vkládání kúlů).

Během čtyřletého provozu bylo provedeno celkem 19 experimentálních výpalů vápna. Vlastní výroba vápna poskytla unikátní materiál pro detailní materiálový výzkum vápenných pojiv a umožnila výzkum tradičních technologií výroby a zpracování vápna. Výpal vápna dřevem a tradiční postupy do jisté míry předurčují podmínky výpalu a tím i kvalitu vápna, které je jako celek měkce pálené. Moderní materiálové analýzy umožňují srovnání kvality vyrobených vápén na základě reaktivity, měrné plochy povrchu, pórovitosti, popř. i měrné hmotnosti. Výzkum ukázal, že v tradiční peci lze výpalem dřevem vyrobit velmi kvalitní vápno (Válek et al. 2013b). Na druhou stranu nelze využívat tradiční způsob výpalu bez dalších návazných znalostí, které byly v minulosti využívány k dosažení požadované kvality. Studium tradičních technologií výroby a zpracování vápna tyto technologie popisuje a umožňuje tak jejich zhodnocení pro využití v památkové praxi<sup>1</sup>. Návazný výzkum vycházel z ověřování technologických postupů známých ze současné a historické odborné literatury včetně ikonografie (**obr. 132**).

## Příprava tradiční vápenné kaše

Kvalitní vápenná kaše má zásadní význam pro restaurování historických uměleckých a řemeslných děl, jako jsou nástěnné malby, sgrafitové a štukové výzdoby, nátěry a další speciální aplikace. Její předností je soubor vlastností, který je dán kvalitou výchozí suroviny, způsobem výpalu, hašením v nadbytku vody a uležením. Využití vápenné kaše je spojeno

<sup>1</sup> Odborná metodika „Návrh a výroba specializovaných vápenných pojiv pro obnovu památek s využitím historických technologií“, autorský kolektiv, 2015, <http://www.calcearius.cz>.



**OBRÁZEK 133:** Velikostní distribuce (vlevo) a morfologie (vpravo) částic  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , vápenné kaše z vysokoprocenního vápence po necelých dvou letech zrání ve vápenné jámě



**OBRÁZEK 134:** Dva roky odležená vápenná kaše má pevnou konzistenci a drží tvar po vyjmutí z jámy

s ověřenými tradičními postupy, které zajišťují její kvalitu. V rámci výzkumu byly definovány klíčové vlastnosti a technologické vlivy, které byly laboratorně ověřeny a které umožňují reprodukovat kvalitu tradičně vyráběného produktu. Unikátní a zároveň hospodářsky významnou vlastností tohoto nově vytvořeného vzorového produktu je právě napodobení historické předlohy.

### **Vzorová výroba a zpracování vápenné kaše**

Vápenná kaše je vyrobena z vysokoprocenních vápenců. Technologie výroby a zpracování odpovídá tradičnímu způsobu používanému před průmyslovým rozvojem v polovině 19. století.

Vápno je páleno malosériově v peci, která je periodická a která umožňuje výpal dřevem s odděleným ohništěm od vápencové vsázky. Teplota výpalu je v rozmezí od 850 do 1200 °C. Pro hašení a uležení je vybráno dobře vypálené vápno. Vápno se hasí v hasnici s nadbytkem vody. Vzniklé řídké hašené vápno má po uložení do vápenných jam velikost částic do 2 mm. Tyto větší částice se časem dále rozpadají nebo sedimentují ke dnu vápenné jámy. Uležením vznikne vápenná kaše. Minimální objemová hmotnost odležené vápenné kaše je 1400 kg/m<sup>3</sup>. Nároky na použití určují dobu uležení, která je optimálně v rozmezí 14 dnů až 3 let. Doba uležení má pozitivní vliv na velikost částic a plasticitu vápenné kaše (Mascolo et al. 2010; Matas et al. 2013). Velikost částic vzorku vápenné kaše z vysokoprocentního vápence po necelých dvou letech zrání je od 1 do 20 μm (**obr. 133**). Praktické posuzování kvality je založeno na plasticitě kaše (**obr. 134**) a její schopnosti pojit částice.

## Výroba přirozeně hydraulického vápenného pojiva

Přirozeně hydraulické vápenné pojivo je vhodné pro využití ve stavebnictví a zejména pro opravy historických objektů, jelikož bylo v minulosti rozšířeným pojivem. Experimentálně bylo přirozeně hydraulické vápno vyrobeno z dvorecko-prokopských vápenců, které byly využívány pro výrobu vápna v Praze již od středověku (Hošek a Muk 1989; Suchý 2014). Jeho unikátní a zároveň hospodářsky významnou vlastností je právě napodobení historické předlohy (obdobná výchozí surovina). Klíčové vlastnosti a kvalita vápenného pojiva byly laboratorně nově ověřeny i s ohledem na tradiční technologie výroby a zpracování.

### Vzorová výroba a zpracování přirozeně hydraulického vápna

Přirozeně hydraulické vápno je vyrobeno z dvorecko-prokopských vápenců. Chemické složení typické suroviny je uvedeno v **tabulce 2**. Vápno je páleno malosériově v peci, která je periodická. Teplota výpalu vápna je v rozmezí od 850 do 1200 °C. Hydraulické vlastnosti jsou předurčeny přírodním složením suroviny a hlavní hydraulická složka β-C<sub>2</sub>S (belitu) je zastoupena od 15 % do 40 % (**tabulka 3**). Složení a množství hydraulických složek je ale též výrazně ovlivněno podmínkami výpalu (Válek et al. 2014a).

**TABULKA 2:** Chemické složení použitých surovin z lomu Hvízdalka v hm. %

Označení	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Cementační index
DPH I	7,9	0,9	0,3	49,1	1,3	0,0	0,2	0,46 (slabě hydraulický)
DPH II	16,4	3,7	1,4	41,2	1,7	0,15	0,8	1,2 (silně hydraulický)

Technologie výroby a zpracování odpovídá tradičnímu způsobu používanému před průmyslovým rozvojem v polovině 19. století. Pálené kusové vápno je nadrceno v čelistovém drtiči na frakci 0–15 mm s ohledem na lepší zpracovatelnost a homogenizaci vypálené vsázky. Během vybírání z pece a drcení je zajištěno promíchání pojiva. Z jednoho výpalu v periodické peci tak lze obdržet pojivo s jednotnými průměrnými vlastnostmi. Přirozeně hydraulické vápno má svou charakteristickou barvu, která je dána jeho složením a teplotou výpalu (**obr. 135**). Drcené nehašené vápno lze použít přímo pro přípravu malty. Vápno se hasí s pískem během míchání nebo se po smíchání s mokrým pískem nechá krátkodobě uležet.





**OBRÁZEK 135:** Srovnání barvy přirozeně hydraulického vápna po výpalu od 850 do 1200 °C. Velikostní frakce 10–15 mm

**TABULKA 3:** Mineralogické složení přirozeně hydraulického vápna (hm. %) vyrobeného z dvorecko-prokopského vápence (chemické složení suroviny uvádí **tab. 2**) páleného v laboratorní a experimentální peci

	DPH I				DPH II	
	laboratoř			exp. pec	laboratoř	exp. pec
Kalcinační teplota (°C)	1000	1050	1100	700–1200	1050	700–1200
křemen (%)	0,7	0,8	0,3	2,0	0,7	-
vápno (%)	51,5	50,9	53,4	34,4	34,8	14,9
spurrít (%)	-	-	-	-	-	8,3
periklas (%)	1,2	1,1	1,3	0,6	1,2	0,9
kalcit (%)	-	-	-	13,5	-	15,6
$\beta$ -C <sub>2</sub> S (belit) (%)	37,7	42,9	40,3	18,2	36,2	15,1
brownmillerit (%)	-	-	-	0,4	2,0	0,6
C <sub>3</sub> A (%)	-	0,6	0,7	-	0,5	0,4
C <sub>4</sub> AF (%)	1,4	2,0	1,7	-	-	-
wollastonit (%)	0,8	0,7	1,4	-	1,7	-
ake-gehl (%)	0,9	0,6	0,9	-	3,1	2,1
amorfní podíl (%)	5,8	0,4	-	30,9	19,7	36



**OBRAZEK 136:** Příprava horké malty, kdy vrstvy vápna s pískem jsou ponechány několik desítek dní ve venkovním prostředí. Vápno se postupně vyhasí (Foto M. Hřčka)

## Technologie přípravy horké vápenné malty

Vápenná malta připravená hašením vápna přímo ve směsi s pískem a vodou se někdy nazývá horká malta. Přesný historický postup přípravy a aplikace se nedochoval, ale existují nepřímé důkazy o jeho využívání, zejména ve stavbách s masivní zděnou konstrukcí. Během výzkumu tradičních vápenných technologií byly upřesněny zásady přípravy horké malty.

### *Vzorová výroba a příprava horké malty*

Horká vápenná malta je připravena postupem, kdy se nehašené vápenné pojivo smíchá s vlhkým či mokřým pískem. K vyhašení vápna může dojít v různých časových intervalech, podle způsobu zpracování, podstatné je, že k němu dochází v momentě, kdy je vápno ve směsi s pískem. Horká vápenná malta obsahuje v různé míře částice o velikosti až několik centimetrů, které pocházejí ze suroviny, ze které bylo vápenné pojivo vyrobeno, ale které nesplňují běžnou charakteristiku vápenného pojiva, tj. nerozpadly se během hašení na jemné částice velikosti  $\mu\text{m}$  až desítek  $\mu\text{m}$  a které běžně nemají schopnost pojít ostatní pevné látky. V dokumentu se označují jako „technologické částice“.

Základním požadavkem pro výrobu horké malty je rozpad kusového vápna na jemné pojivové částice během procesu hašení, tedy vlivem reakce  $\text{CaO}$  s vodou. Vzdušná vápna by měla být měkce pálená a musí obsahovat dostatek volného vápna, což vyplývá i z normových požadavků na kvalitu (viz ČSN 459-1). Např. kategorie CL70 musí obsahovat nad 55 % hm. volného vápna. U přirozeně hydraulických vápen je situace složitější. Pro vyhašení hydraulického vápna se uvádí (Eckel 1928) jako minimální podíl okolo 10–15 % (hm.) aktivního



**OBRÁZEK 137:** Ukázka čerstvě připravené horké malty



**OBRÁZEK 138:** Čerstvě nahozená horká malta jako zkušební omítkový panel na hřbitovní zdi v Krchlebech u Čáslavi

vápna (tj. měkce páleného, rychle reaktivního CaO). Tuto hranici lze považovat za opravdu minimální a schopnost rozpadu vápna na pojivové částice je třeba ověřit zkouškou reaktivity.

Vápno dle svého charakteru obsahuje *technologické částice*, které jsou nedílnou součástí horkých malt. Jejich odstranění není v plné míře možné a v zásadě ani žádoucí. Důvodem pro jejich částečné odstranění může být jejich případná nadměrná velikost s ohledem na zamýšlenou aplikaci.

Technologické částice v horkých maltách jsou více druhů:

- a) Neúplně (nedostatečně) vypálený vápenc, kde část má stále vlastnosti a strukturu horniny.
- b) Částice, které se nerozpadly hašením kompletně na prachové částice, ale jsou v zásadě svým složením a strukturou podobné pojivu. Řádově mají velikost od 1 mm až po 1 cm.
- c) Částice, které jsou reakčními produkty vzniklými při výpalu suroviny a které se nerozpadají při hašení, popř. je nelze tradičními metodami výroby vápna a přípravy malty jednoznačně využít jako pojivo. Tyto částice ale reagují pod vlivem okolního prostředí. Např. hydraulické fáze  $C_3S$  (alit) nebo  $C_3A$  nelze hašením rozložit, ale tyto částice hydratují a vytvářejí pevné vazby uvnitř své struktury, tzv. hydratují. S ohledem na svou velikost mají omezenou schopnost pojit. Pokud jsou menší než 1 mm, lze je svým způsobem zahrnout do pojivového systému.
- d) Částice, které jsou reakčními produkty vzniklými při výpalu suroviny a které se nerozpadají při hašení, popř. je nelze tradičními metodami výroby vápna a přípravy malty jednoznačně využít jako pojivo. Tyto částice dále nereagují. Příkladem může být wollastonit, který dále nehydratuje ani nekarbonatuje. Do této kategorie lze též zařadit i další minerální fáze původně přítomné v surovině a které i po výpalu dále zůstávají chemicky víceméně inertní. Například zrna křemene.

Horká malta se na staveništi připravuje vrstvením dobře provlhčeného písku (mokrého) a nehašeného vápna rozbitého na drobné kusy o velikosti max. 20–30 mm v průměru. Počet vrstev vápna a písku je většinou okolo tří. První vrstva je písková a na konci musí zůstat písek na pokrytí celé hromady minimálně vrstvou silnou 30–50 mm (**obr. 136**). Další postup závisí na době zpracování, respektive na době odležení. Pokud je krátkodobé v řádu několika hodin,

tak se postupně začne přidávat voda a následně se mícháním připraví malta. Během míchání se vápno vyhasí spolu s pískem a malta je připravena k použití na zdění (**obr. 137**). V případě omítek je ale vhodné po promíchání směs znovu shromáždit na hromadu a nechat několik dní odležet. Doba odležení závisí na charakteru pojiva. U vzdušných vápen lze uvažovat při dobrém přikrytí zamezujícím přístupu vzduchu a odpařování vlhkosti v řádu i desítek dní. U hydraulických vápen je tato doba od jednoho do deseti dnů v závislosti na míře jejich hydraulicity. V rámci experimentálního posouzení technologie horké malty byla malta použita na omítky (**obr. 138**). Kromě ověření zpracovatelnosti a aplikace bylo možné posoudit i její vlastnosti během ročního cyklu zrání a fungování na zdivu.

## Poděkování

Výzkumy byly realizovány v rámci projektu *Tradiční vápenné technologie historických staveb a jejich využití v současnosti*<sup>1</sup> (DF11P01OVV010) financovaného Ministerstvem kultury ČR v letech 2011–2015.

## Použitá literatura

- Ebel, M. Vápno a jeho výroba do poloviny 19. století. *Sborník*. 2014, 12, 57-66. ISBN 978-80-260-6784-9.
- Eckel, E. C. *Cements, limes and plasters*. New York: Wiley; London: Chapman and Hall, 1928.
- Helan, B a K. Klement. *Vápno: výroba a použití*. Praha: SNTL, 1960.
- Hošek, J. a J. Muk. *Omítky historických staveb*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1989. ISBN 80-04-23349-X.
- Kuna, M. a D. Křivánková. *Archiv 3.0. Systém Archeologické databáze Čech*. (Uživatelská příručka). Praha: Archeologický ústav AV ČR, 2006.
- Mascolo, G., M. C. Mascolo, A. Vitale a O. Marino. Microstructure evolution of lime putty upon aging. *Journal of Crystal Growth*. 2010, 312(16-17), 2363-2368. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2010.05.020>
- Matas, T., J. Válek, D. Machová, V. Petráňová a R. Fabeš. Characterisation of lime putties made of quicklime calcined under different conditions. In: Hughes, J. (ed.). *The 3rd Historic mortars conference*. Glasgow: University of the West of Scotland, 2013. ISBN 978-1-903978-44-3.
- Suchý, M. Vápno, katedrála sv. Víta a pražští vápeníci v pozdním středověku: výpověď písemných pramenů. *Archaeologia historica*. 2014, 39(1), 349-363.
- Vachtl et al. *Soupis lomů ČSR. 55 individuálních svazků vydaných v letech 1932-1961 různými autory a nakladateli, přehled svazků na: <http://www.geology.cz/extranet/sluzby/knihovna>*

<sup>1</sup> Na výzkumu spolupracovali Ing. Jan Válek, Ph.D., Ing. Tomáš Matas, Eveline van Halem, MA, Mgr. Michal Panáček, Ing. Eva Stuchlíková, Ing. Olga Tomanová, Mgr. Dita Frankeová, Bc. Petra Hauková, Josef Jiroušek, Ing. Jan Bryscejn, Ing. Jiří Frankl, Ph.D., a RNDr. Antonín Zeman, CSc., z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky, AV ČR, v. v. i., Mgr. Jana Maříková-Kubková, Ph.D., RNDr. Iva Herichová, Ph.D., Mgr. Marek Suchý, Ph.D., z Archeologického ústavu AV ČR, v. v. i., Praha a PhDr. Martin Ebel, Ph.D., a Mgr. Pavel Kodera, Ph.D., z Národního technického muzea. Poděkování patří i všem jmenovaným a dalším nejmenovaným spolupracovníkům, kteří přispěli k řešení a výsledkům projektu.

- Válek, J., E. van Halem, A. Viani, M. Pérez-Estébanez, R. Ševčík a P. Šásek (a). Determination of optimal burning temperature ranges for production of natural hydraulic limes. *Construction and Building Materials*. 2014, 66, 771-780. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.015>
- Válek, J., J. Jiroušek, T. Matas, E. van Halem a J. Frankl. (b). Základní aspekty tradiční výroby vápna – výběr surovin a výpal. *Sborník*. 2014, 12, 67-76. ISBN 978-80-260-6784-9.
- Válek, J., M. Ebel, J. Maříková-Kubková, I. Herichová, M. Suchý, P. Kodera, P. Kozlovcev, J. Řihošek, M. Panáček a J. Bryscejn. *Vápenné technologie historických staveb*. Odborný katalog k výstavě „Calcarius čili vápeník“. Praha: NTM, 2015. ISBN 978-80-7037-256-2.
- Válek, J., T. Matas a J. Jiroušek. Experimentální vápenná pec pro malovýrobu vápenných pojiv. In: *Vápenický seminář 2012*. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, 2012, 49-55.
- Válek, J., T. Matas a J. Jiroušek. Design and development of a small scale lime kiln for production of custom-made lime binder. In: Hughes, J. (ed.). *The 3rd Historic mortars conference*. Glasgow: University of the West of Scotland, 2013. ISBN 978-1-903978-44-3.
- Válek, J., T. Matas, J. Jiroušek, J., D. Machová, V. Petráňová a D. Frankeová. Posouzení vlastností kusového vápna páleného v „tradiční“ vápenné peci. *Keramický zpravodaj*. 2013, 29(6), 6-10.
- Wingate, M. *Small-scale lime-burning: a practical introduction*. London: Intermediate Technology Publications, 1985.

# Návrh tesařských spojů pro opravy dřevěných konstrukcí

Jiří Kunecký, Hana Hasníková, Michal Kloiber

Dřevěné konstrukce mají svou nespornou historickou hodnotu: zdobené dřevěné stropní trámy či dřevěné konstrukce krovů mají kromě stavebně-historické i estetickou hodnotu a nesou v sobě navíc i cenné informace pro budoucnost. Z těchto důvodů je vhodné je i citlivě opravovat způsobem, který zachová maximální možnou část původní konstrukce a zároveň bude nenápadný, takže návštěvník nebude rušen novými prvky a dojem ze stavby splní svůj kulturní, estetický a edukativní účel.

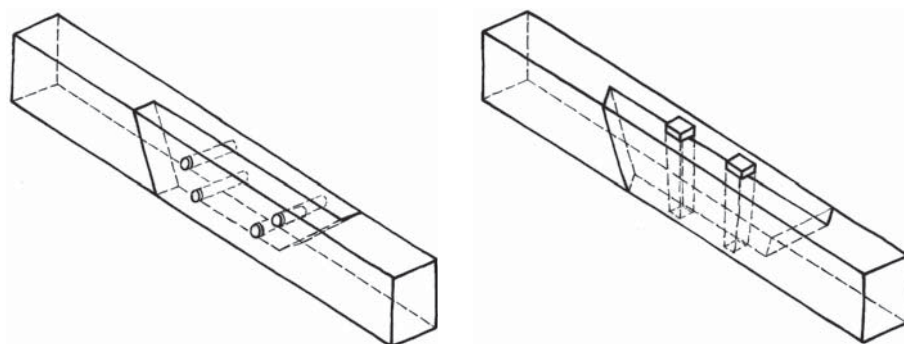
Stropní či vazné trámy nebo krokve jsou nejčastěji poškozeny vlivem hniloby či napadením houbou, které mají společného jmenovatele – přítomnost vlhkosti či přímo vody kvůli zatékání či kondenzaci vodních par v místě dotyku mezi zdívem a dřevem. Dalším běžným poškozením střešních konstrukcí je napadení hmyzem. Všechna tato poškození vedou k typickému problému – část konstrukce je poškozená, zatímco zbývající místa jsou z pohledu materiálových vlastností dřeva zdravá. V drtivé většině případů se jedná o kraje nosníku blízko záhlaví trámu. Řešením je nahrazení poškozených částí novými, což ovšem vyžaduje kromě znalosti řemesla především **použití nového druhu spoje**, který dovoluje přenášení všech potřebných sil ve spoji a vykazuje rovněž estetickou kompatibilitu. V dnešní době jsou možnými řešeními použití příložek z boků poškozeného trámu či použití plátového svorníkového spoje (**obr. 139**), který může být navíc ještě modifikován podélně vloženou pásovou ocelí do místa prořezu. Ani jedno řešení však nenaplňuje estetické nároky. Triviální možností vždy zůstává výměna celého prvku, ale to je možnost náročná i příliš nákladná, často zbytečná, která snižuje historickou cenu konstrukce, která je připravena o původní materiál.

K řešení problému se nabízí technika plátování, která dovoluje napojit novou část trámu (protézu) na původní část pomocí různých dřevěných spojovacích prostředků. Taková oprava probíhá v několika krocích. Nejprve je zmapován stav poškození dřeva (viz kapitola Zkoušení kvality a zdraví historického dřeva). Konstrukční prvek je pak zkrácen tak, aby zůstalo pouze zdravé dřevo. Trám je následně v místě budoucího spoje opracován podélně a z nového zdravého dřeva je vyrobena kompatibilní protilehlá část (protéza). Pomocí dřevěných spojovacích prostředků (dřevěný kolík, hmoždík) jsou obě části k sobě připojeny. Spoj je nenápadný a splňuje estetické požadavky. Problémem při návrhu zůstává chybějící podpora použitím dřevěných spojovacích prostředků v návrhových normách platných v ČR.

Tyto spoje (jednoduchý plát s kolmými čely) přenáší dobře namáhání tahem a tlakem, avšak pro přenos dalších namáhání – ohybu či kombinovaného namáhání nejsou vhodné vzhledem k nízké pevnosti dřeva v indukovaném namáhání – tahu kolmo na vlákna. V těchto



**OBRÁZEK 139:** Stávající esteticky nevhodné techniky oprav dřevěných konstrukcí – příložkování (vlevo) a použití ocelových svorníkových spojů (vpravo)

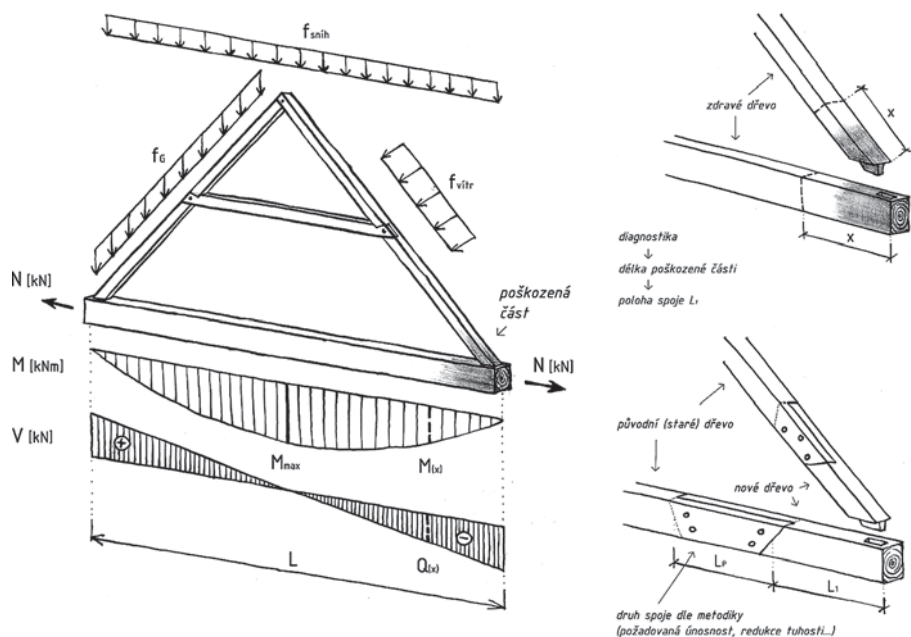


**OBRÁZEK 140:** Šikmočelný celodřevěný plát spojený pomocí kolíků (vlevo) a hmoždíků (vpravo)

případech je možné využít efektu šikmých čel (**obr. 140**), která rozkládají sílu na čelech a část sil přenášejí rozepřením do směru rovnoběžně s vlákny, čímž se výrazně zvýší jak tuhost, tak i únosnost spoje. Dalším výhodným efektem je distribuce sil na kolících, kterou umožňují poddajné dřevěné spojovací prostředky. Všechny tyto efekty do sebe integruje **šikmočelný celodřevěný plát**, jehož jednotlivé deriváty se staly výsledkem výzkumu.

Popisovaný inovativní spoj byl vyvinut v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., ve spolupráci s Fakultou stavební ČVUT a dále s Lesnickou a dřevařskou fakultou Mendelovy univerzity v Brně. Vývoj byl podpořen z prostředků programu pro podporu národní a kulturní identity (NAKI) a probíhal v letech 2012–2015. Na vývoji spoje se podíleli i zainteresovaní projektanti, statici a tesaři, takže výsledek byl diskutován z různých hledisek.

V literatuře najdeme celou řadu publikací týkajících se kolíkových spojů, které jsou přehledně zpracovány v přehledovém článku Patton-Malloryho et al. (1997). Nicméně, samotný plátový spoj byl ve světě zkoumán jen okrajově, zejména hmoždíkový spoj v omezeném počtu vzorků zkoumal Sangree a Schafer (2009). V České republice ideu spoje načrtl a vyzkoušel v praxi Ing. Vít Mlázovský, což vedlo k experimentálnímu testování spojů a publikacím (Drdácký 2002; Drdácký et al. 2004). ČR právě díky výše zmíněnému projektu patří



OBRÁZEK 141: Opravovaná vazba (vlevo) spolu s typickým zatížením střechy a provedenou opravou

v této oblasti k průkopníkům i díky práci o numerickém a experimentálním zkoušení spojů Kuneckého et al. (2015a), Arciszewska-Kędzior (2015), a tak existuje dostatek dat pro verifikaci modelů chování spojů. Dovršením výzkumu na téma plátových spojů je práce Fajmana et al. (2014), který vyvinul analytický model chování spoje, do kterého je však nutno dosadit některé experimentálně zjištěné hodnoty, zejména tuhosti jednotlivých komponent spoje. Na základě těchto publikací bylo možno sestavit komplexní návod na navrhování dřevěných spojů (Kunecký et al. 2015b).

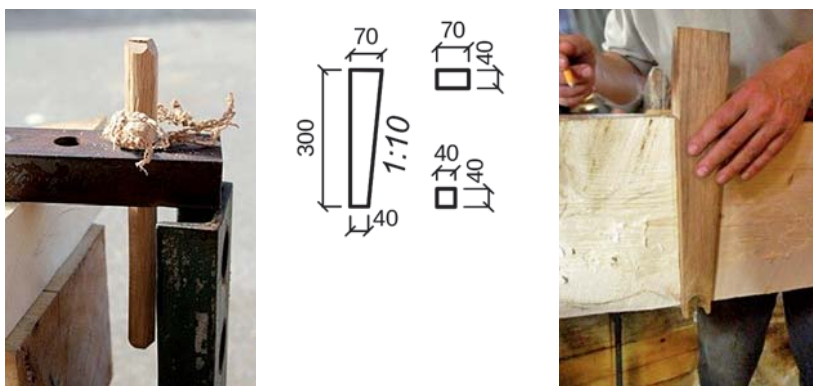
Spoj splňuje požadavky praxe, které vlastní výzkum iniciovaly – bylo vyžadováno navrhnout takový spoj, který bude schopen přenášet jednotlivé druhy namáhání (tah, tlak, ohyb a jejich kombinace), bude trvanlivý a v konstrukci nenápadný, aby zachoval její ráz. A to i přesto, že je inovativní a není tradiční, neboť sice z tradičního řemesla vychází, je jím umožněn a zpětně ho kultivuje, ale v konstrukcích se běžně nenachází a je v tomto smyslu nepůvodní.

## Návrh spoje

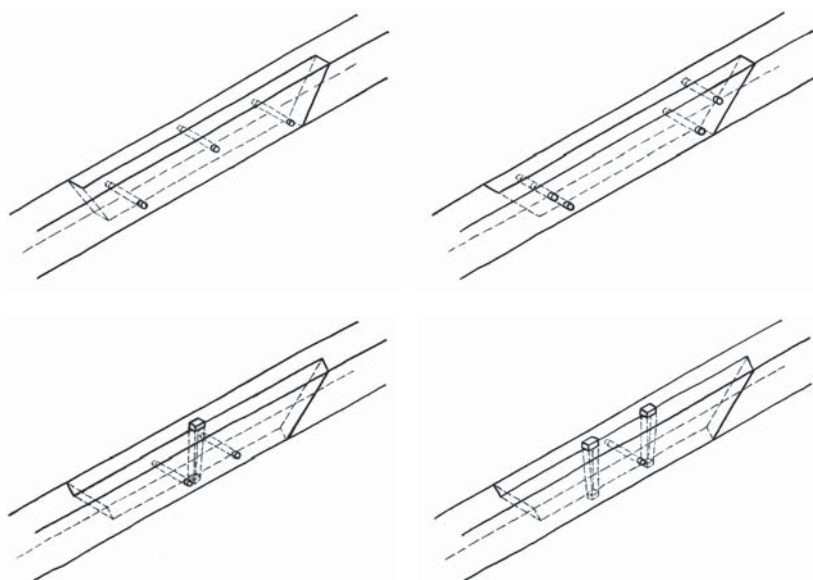
Vzhledem ke složitosti spoje a rozložení v něm působících sil je velice obtížné pro projektanta či statika tyto spoje rychle a spolehlivě navrhovat. V rámci výzkumu byla vytvořena již zmíněná metodika (Kunecký et al. 2015b), která tento postup razantně ulehčuje.

Náčrt typického problému včetně zásahu je shrnut na obr. 141. Znehodnocené dřevo nacházející se obvykle na konci trámu bude odstraněno a nahrazeno protézami. Vzhledem k tomu, že profil protézy je dán profilem původního opravovaného prvku a vzdálenost zdravého dřeva od konce trámu  $x$  je určena diagnostikou dřeva, je třeba umět navrhnout a sladit tyto





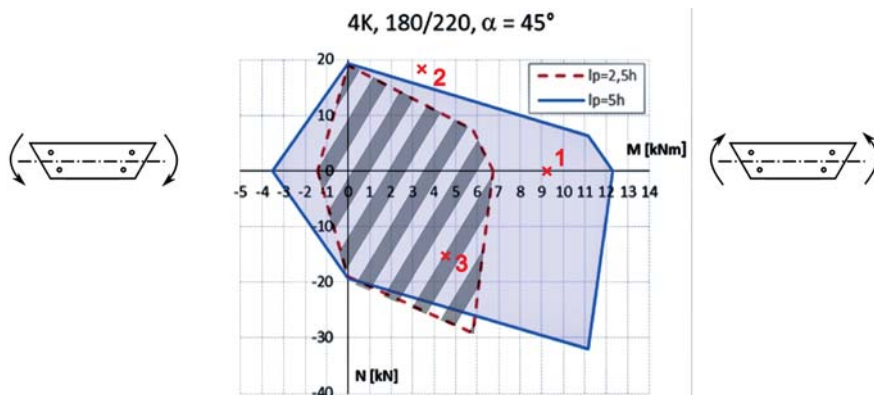
**OBRAZEK 142:** Spojovací prostředky – vlevo dubový kolík, uprostřed a vpravo dubový hmoždík



**OBRAZEK 143:** Základní typy spojů: vlevo nahoře tříkolíkový, vpravo nahoře čtyřkolíkový, vlevo dole jednohmoždíkový, vpravo dole dvouhmoždíkový spoj

parametry – délku  $L_1$  a délku plátu  $L_p$ . Na základě vnějšího zatížení (stálé zatížení, sníh, vítr) se určí, zda spoj zatížení v daném místě unese (navrhování na mezní stav únosnosti) a zda se nevětší příliš průhyb prvku (mezní stav použitelnosti). Pro návrh tedy známe všechny další potřebné informace – geometrii konstrukce a průběh vnitřních sil po konstrukci (normálová síla  $N$ , posouvající síla  $V$ , ohybový moment  $M$ ).

Šikmočelný celodřevěný plát je schopen přenášet tah, tlak, ohyb a jejich kombinace. Na základě náročnosti výroby a vhodného použití v konstrukci byly vyvinuty čtyři varianty spoje, které odpovídají různým vhodným použitím v konstrukci (**obr. 143**). Rozdíl je dán kromě jejich geometrie zejména použitými spojovacími prostředky, které jsou schopny



**OBRÁZEK 144:** Návrhový diagram pro mezní stav únosnosti, příklad pro čtyřkolíkový spoj, profil  $180 \times 200 \text{ mm}$  a úhel čel  $45^\circ$ . Bod 1 značí prostý ohyb, který krátký spoj neunes a delší ano. Bod 2 ukazuje kombinaci ohybového momentu a tahu, na který spoj nevyhoví a bod 3 ukazuje kombinaci ohybu a tlaku, který vydrží spoje s oběma délkami (2,5h i 5h).

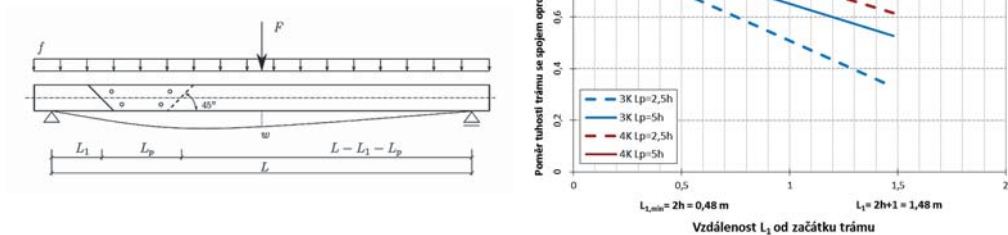
přenést rozdílné množství zatížení (obr. 142). Všechny spojovací prostředky by měly být vyrobeny z dubového dřeva. Dřevěný kolík má kromě nižší tuhosti i nižší únosnost, hmoždík má tyto hodnoty násobně vyšší, ale výroba spoje s hmoždíky je časově náročnější. Náročnost výroby spoje je jeden z aspektů, který může projektant vzít při návrhu v úvahu. Spoj pro opravu tlačných prvků by měly mít sklon šikmého čela  $60^\circ$ , ostatní  $45^\circ$ . Tříkolíkový spoj je nejjednodušší na výrobu, ale jeho únosnost je limitovaná, a je určen především pro použití na krokvičích. Zbytek spojů má univerzální použití a liší se zejména únosností. Ta je srovnatelná u spoje čtyřkolíkového a jednohmoždíkového, zatímco dvouhmoždíkový je nejúnosnějším spojením vůbec. Je ovšem vhodný především na velké profily a jeho výroba je nejpracnější. U hmoždíkových spojů jsou nutná vždy i podkosená čela, neboť jinak hrozí při tahu pootočení hmoždíku a rozevření plátu.

### Návrh spoje na mezní stav únosnosti

Únosnost spoje byla výzkumem zjištěna a kodifikována pomocí diagramů ohybový moment – normálová síla ( $M-N$ ), jehož didaktická varianta je na obr. 144. Diagram obsahuje dvě obálky odpovídající extrémním doporučeným délkám spoje  $L_p$ . Pro každý spoj existuje několik diagramů podle velikosti profilu opravovaného prvku a je možno mezi nimi lineárně interpolovat, pokud je profil či délka spoje odlišná. Pokud jsou vypočítány vnitřní síly v místě středu plánovaného spoje, je možno nahlédnout do diagramu, zda spoj na zatížení vyhoví. **Tyto diagramy zobrazují mezní namáhání, konec lineární oblasti pracovního diagramu zkoušených spojů a jsou uvedeny bez bezpečnosti, kterou při návrhu volí projektant/statik.** Určení výsledné bezpečnosti tak je na jeho straně.

### Návrh spoje na mezní stav použitelnosti

Při návrhu sledujeme i maximální průhyb  $w$  opravovaného prvku konstrukce. Tuhost konstrukce  $k$  se mění dle typu použitého spoje, jeho geometrie, ale i geometrie celého trámu. Díky



**OBRAZEK 145:** Určení tuhosti prvku se spojem – schéma (vlevo); vpravo změna tuhosti celého trámu v případě posouvání spoje ve směru ke středu prvku s profilem  $200 \times 240$  mm a rozpětím 6 m

numerickým modelům byli autoři schopni určit snížení tuhosti a zvětšení průhybu trámů se spojem. Na **obr. 145** je schematicky vyobrazeno určení tuhosti prvku se spojem spolu s vlivem umístění spoje po délce trámu ( $L_1$ ) na celkovou tuhost trámu. Pro každý spoj jsou uvedeny aproximační vzorce změny tuhosti a průhybu, jako např. pro čtyřkolíkový spoj (13, 14):

$$k = 870Eb \left(\frac{h}{L}\right)^{2,6} \quad (13)$$

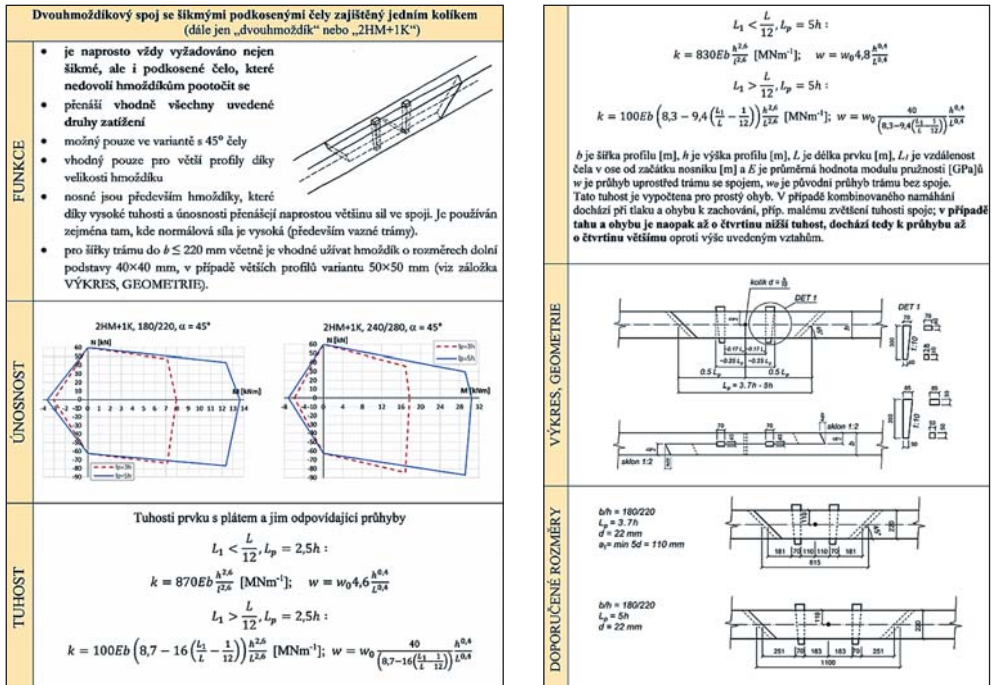
$$L_1 < \left(\frac{L}{12}\right), L_p = 2,5h : k = 870Eb \left(\frac{h}{L}\right)^{2,6} \left[\frac{\text{MN}}{12}\right]; w = w_0 \left(4,6 \left(\frac{h}{L}\right)^{0,4}\right) \quad (14)$$

kde  $b$  je šířka profilu [m],  $h$  je výška profilu [m],  $L$  je délka prvku [m],  $L_1$  je vzdálenost čela v ose od začátku nosníku [m] a  $E$  je průměrná hodnota modulu pružnosti [GPa];  $w$  je průhyb uprostřed trámu se spojem,  $w_0$  je původní průhyb trámu bez spoje.

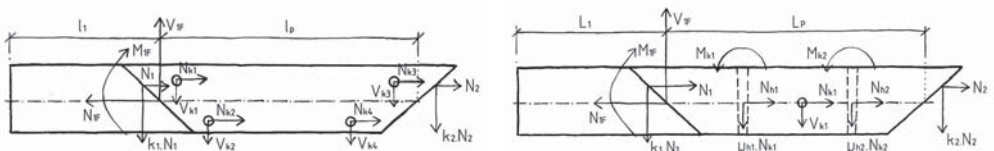
## Vymezení hranic návrhu

Navrhování spojů na základě výsledků výzkumu je tedy elegantní a snadné, avšak je nutné přihlídnout k mantinelům návrhu spoje (**obr. 146**). Druhy namáhání, se kterými model neuvazuje (viz níže), je třeba eliminovat. Limitem jsou minimální a maximální rozměry opraveného prvku, které jsou, stejně jako níže uvedené skutečnosti, v detailu uvedeny v metodice (Kunecký et al. 2015b). Dále je to místo použití – je třeba se vyvarovat míst, kde se mění ohybový moment (podpory), příliš blízko ke koncům trámů apod. Obě čela musí být dosazena na styk minimálně ve dvou třetinách své plochy, aby měla možnost začít fungovat. Výrobce – tesař musí počítat s objemovými změnami dřeva způsobenými změnami vlhkosti a vůle mezi spojovacími prostředky a okolním materiálem se nepřipouští. Kvalita dřeva hraje velkou roli. Řemeslnému zpracování byla ve výzkumu věnována zvláštní péče a ve výsledku je uvedena celá jedna kapitola o technologickém provedení spojů.

Zvláštní důležitost má i kontrola během stavby (zejména správná orientace spojů!) či kontrola spojů po realizaci stavby, kdy v pravidelných intervalech tří let by stav spojů měl být kontrolován a monitorován.



OBRÁZEK 146: Karta spoje shrnuje jeho přednosti a nevýhody; obsahuje všechny zmíněné technické informace, vhodné použití, ukazuje detailní geometrii spoje i s minimální a maximální povolenou variantou pro interpolaci



OBRÁZEK 147: Silové působení uvnitř spojů – vlevo čtyřkolíkový, vpravo dvouhmoždíkový spoj

### Princip mechanického chování spoje

Po představení základních typů spojů, druhů namáhání a principu bude přiblížen princip fungování spoje, což zpětně osvětlí rozdílnou únosnost spojů (obr. 147).

Pokud je spoj tažen, síly se distribuuji na kolících a hmoždících dle tuhosti jednotlivých komponent. Ne všechny spojovací prostředky jsou tedy vždy nosné, někdy mají prvotně pouze zajišťovací funkci. V hmoždíkových spojiích jsou nosné zejména hmoždíky, zatímco v kolíkových kolíky. V případě tlaku se zapojují především šikmá čela. Při namáhání ohybem dochází (v případě ohýbání na správnou stranu) k opírání čel, což díky rozkladu sil do složek jednak snižuje sílu ve směru kolmo na vlákna na jednotlivých kolících (nevhodné namáhání), jednak otáčí část sil do směru rovnoběžně s vlákny, ve kterém je dřevo únosnější. V případě ohybu na opačnou stranu čela se vůbec nezapojují a spoj funguje jako kdyby měl čela kolmá a nosnou funkci mají pouze spojovací prostředky.



**OBRÁZEK 148:** Vlevo krov na zámku v Lanškrouně s aplikovaným dvouhmoždíkovým spojem, vpravo krov kostela v Červené Vodě



**OBRÁZEK 149:** Výsledek – aplikace vyvinutých spojů v krovu

V případě kombinace jednotlivých namáhání je působení komplexnější. Ve zkratce je možné poznamenat, že při kombinaci ohybu a tlaku se síly na spojovacích prostředcích snižují, a proto je spoj na tento druh zatížení velice vhodný. Pokud se jedná o tah v kombinaci s ohybem, pak spoj je naopak více náchylný k porušení a hrozí i ztráta kontaktu na čelech, což může vést k přerozdělení sil na kolících. Proto je vhodný jednohmoždíkový spoj spíše než čtyřkolíkový pro případy vyšších tahů, protože hmoždík je velice tuhý a nedovolí oddálení i při mezním zatížení. Ostatní druhy namáhání jsou ve spoji zanedbány.

## Praktické použití

Spoje byly v rámci testování použity na některých památkově chráněných objektech, pro které je jejich používání primárně doporučeno. Realizace proběhla na krovu zámku v Lanškrouně či kostela v Červené Vodě. Spoje byly umístěny v konstrukci především na místa, kde převažovalo tahové zatížení (**obr. 148, 149**).

Kapitola využívá výsledků výzkumu, který probíhal v letech 2012–2015 v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., v rámci programu NAKI. Výsledkem je aplikovaný výstup v podobě metodiky návrhu plátových celodřevěných spojů se šikmými čely, který umožní projektantům opřít se při návrhu o výsledky, které do té doby nebyly dostupné.

V případě dalšího zájmu o téma, o samotnou metodiku či v případě potřeby konzultace aplikace spojů je možné autory kontaktovat na adrese spoje@itam.cas.cz.

## Poděkování

Práce vznikla za finanční podpory grantu NAKI DF12P01OVV004 Ministerstva kultury ČR.

## Použitá literatura

- Arciszewska-Kędzior, A., J. Kunecký, H. Hasníková a V. Sebera. Lapped scarf joint with inclined faces and wooden dowels: experimental and numerical analysis. *Engineering Structures*. 2015, 94, 1-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.03.036>
- Drdácký, M. Zkoušky historických tesařských spojů. In: Kotlíková, O. (ed.). *Sborník odborného semináře. Křivoklát 2002 - Netradiční způsoby oprav historických tesařských konstrukcí*. Praha: STOP, 2002, 22-23.
- Drdácký, M., V. Mlázovský, V. a P. Růžička. Historic carpentry in Europe: discoveries and potential. *APT Bulletin*. 2004, 35(2-3), 33-41. <http://dx.doi.org/10.2307/4126403>
- Fajman, P. Vliv tuhosti svorníku na síly v plátovém spoji. *Stavební obzor*. 2014, 7/8, 115–120. ISSN 1210-4027.
- Kunecký, J., P. Fajman, H. Hasníková, P. Kuklík, M. Kloiber, V. Sebera a J. Tippner. *Celodřevěné plátové spoje pro opravy historických konstrukcí*. Certifikovaná metodika, Ministerstvo kultury ČR, Osvědčení č. 113, 2015.
- Kunecký, J., V. Sebera, H. Hasníková, A. Arciszewska-Kedzior, J. Tippner a M. Kloiber. Experimental assessment of a full-scale lap scarf timber joint accompanied by a finite element analysis and digital image correlation. *Construction and Building Materials*. 2015, 76, 24-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.034>
- Patton-Mallory, M., P. J. Pellicane a F. W. Smith. Modeling bolted connections in wood: review. *Journal of Structural Engineering*. 1997, 123(8), 1054–1062. ) [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1997\)123:8\(1054\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1997)123:8(1054))
- Sangree, R. H. a B. W. Schafer. Experimental and numerical analysis of a stop-splayed traditional timber scarf joint with key. *Construction and Building Materials*. 2009, 23(1), 376–385. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.11.004>

# Materiály, technologie a metodická podpora restaurování památek

## Zpevňování omítek vápennou vodou

Miloš Drdácký, Zuzana Slížková

V nedávné minulosti probíhaly diskuse o možnostech konsolidace historických vápenných omítek jejich opakovaným napouštěním roztokem hydroxidu vápenatého obvykle nazývaného vápennou vodou. Skutečně vědeckých poznatků o účinku vápenné vody (i jiných konsolidantů) bylo publikováno velmi málo, navíc mnohdy zmateně a nepřesně. Nebo byly výsledky, získané při určitých okrajových podmínkách, velmi libovolně interpretovány či dokonce „extrapolovány“ do podmínek, kde neexistují znalosti o jejich chování, tím méně důkazy o jejich platnosti. Autoři kapitoly realizovali výzkumný projekt na toto téma a před jeho zahájením zpracovali přehled publikovaných názorů a výsledků vědeckého výzkumu o aplikaci vápenné vody při restaurování stavebních a uměleckých památek.

Technika konsolidace vápennou vodou je považována za starou a možnost jejího použití pro konsolidaci degradovaných vápenných malt a vápenců je stále pro mnohé restaurátory lákavá. Neboť, řečeno slovy Clifforda Price, „co může být přirozenějšího, než dodat vápno (*rozuměj hydroxid vápenatý*) do vápence a pak nechat vzduch, aby ho přeměnil v uhličitán vápenatý, tedy materiál, který tvoří vápenc?“ . Metoda má proto vášnivé zastánce, ale i skeptiky a přesvědčené odpůrce. V nemnoha publikacích z tohoto oboru je možno nalézt podporující články, ale také zprávy o totálním selhání. Následující řádky shrnují dosud publikované názory a výsledky výzkumu zaměřeného na aplikaci vápenné vody při konzervaci a restaurování kamene a omítek.

### Poznámka na úvod

Rozbory historických malt ukazují, že jedním z hlavních pojítek vápenných malt je uhličitán vápenatý. Vazební a adhezní vlastnosti  $\text{CaCO}_3$  k ostatním složkám kompozitu jsou silně závislé na mikrostruktuře uhličitánu vápenatého a výzkum potvrzuje (Beruto et al. 2005), že tyto pojivové vlastnosti se výrazně zlepšují, pokud je mikrostruktura vytvářena pseudogelovou morfologií, odlišnou od pravidelně krystalizovaných zrn  $\text{CaCO}_3$ . Proces tvorby  $\text{CaCO}_3$  ve vápenných maltách je složitý a řada otázek dosud není uspokojivě vysvětlena, např. proč  $\text{CaCO}_3$  vysrážený z nasyceného vodného roztoku hydrogenuhličitánu vápenatého nemá takové pojivové schopnosti jako  $\text{CaCO}_3$  vytvořený při tuhnutí vápenné malty (Giordani a Beruto 1987).

Zdá se, že v přirozených podmínkách aplikace vápenné malty je vytvoření pevných vazeb v maltě výsledkem postupných reakcí a komplexních vztahů mezi vysycháním, smršťováním a chemismem vápenné kaše, použité pro přípravu malty (Beruto et al. 2005). Z tohoto hlediska je technika vlhčení staré omítky vodným roztokem hydroxidu vápenatého natolik odlišná, že stěží můžeme přisuzovat vysráženému  $\text{CaCO}_3$  stejné pojivové vlastnosti, jako tomu, který vzniká při tuhnutí malty. Zatím nikdo nepodal vědecké objasnění procesu, ke kterému dochází při opakovaném vlhčení staré vápenné malty vápennou vodou, kde potřebný sled procesů pro vytváření  $\text{CaCO}_3$  je nepřirozeně ovlivněn technologií opakovaného máčení. I když vlhkost je obecně pro karbonataci nezbytná, proces tuhnutí vyžaduje i přiměřenou možnost vypařování a vysychání. A právě fáze tvorby vodní páry při vysychání je považována za nejdůležitější pro vytváření pevných vápencových vazeb. Na druhé straně přerušování dodávání vápenné vody do materiálu a tvorba krystalů v pórech zřejmě zhoršuje transportní podmínky a ovlivňuje efektivnost působení vápenné vody, jak bude ukázáno dále rozбором práce I. Brajer a N. Kalsbeek (1999).

Ve starých maltách je však přítomna řada dalších látek, které přispívají k funkci matrice jako pojítka. Jedná se o látky, které byly buď do malty přidávány při výrobě, nebo vznikly později chemickými reakcemi s plyny obsaženými v ovzduší či s látkami použitými pro povrchové úpravy. Zejména rozpustné soli hrají důležitou roli v pojivovém systému vápenné malty. Řada badatelů přisuzuje právě těmto solím významné zpevňovací účinky na zvětřených maltách či horninách.

Z výše uvedeného plyne, že před rozhodnutím o případné aplikaci vápenné vody je jedním z hlavních kritérií posouzení možných vlivů sycení kompozitu vodou na jeho chemickou reakci, které vyžaduje bezpodmínečné provedení podrobného chemického (chemické a mineralogické složení, obsah vodorozpustných solí, nebezpečnost vysokého pH pro organická pojítka) i fyzikálního (zejména pevnosti, nasákavosti a pórovitosti, přídržnosti k podkladu) rozboru stávající omítky v celém tloušťkovém profilu. Stejný rozbor je nutné provést i po ukončení aplikace vápenné vody.

## Historické poznámky o konsolidaci vápennou vodou

V české literatuře se většinou setkáváme s velmi obecnými, neurčitými a vlastním nebo převzatým vědeckým výzkumem či dlouhodobými zkušenostmi nepodloženými zmínkami o užívání vápenné vody, často i směřujícími nebo zaměřujícími pojmy „vápenná voda“ a „vápenný pačok“. Tak např. B. Štorm (1965) uvádí bez dalších referencí a technologických detailů, že *některé druhy kamene, hlavně pískovec, lze na krátký čas konzervovat napojením vápennou nebo barytovou vodou*. Dále pak již hovoří vždy jenom o vápenných nátěrech, které považuje za *nejdokonalejší konzervační prostředek, ať již jde o režné nebo omítané zdivo jakéhokoliv složení*. A hned v následující větě nenechává čtenáře na pochybách, že vápenným nátěrem rozumí *pačok* (vápenné mléko), tedy nikoliv vápennou vodu, ke které nepodává žádné reference a kterou, jak výše citováno, považuje za krátkodobě použitelnou pro konzervaci kamene.

Vápenný nátěr byl podle L. Lososa (1970) historicky používán jako běžná dokončovací povrchová úprava omítek. Tento autor píše: *Musíme si však uvědomit, že vlastní povrchovou úpravu u běžných středověkých omítek dotvářela ještě vrstva vápenného nátěru v různých*



*koncentracích, pohybujících se od lazujícího pačoku až po husté líčko. Zdá se, že v tomto smyslu píše o vápenné vodě i Millar (viz níže).*

Štorm zřejmě čerpá z práce F. Petra (1953), kde se uvádí vápenná (i barytová) voda mezi používanými *napájecími roztoky* na konzervaci památek s bližším vysvětlením, že se jedná o *konzervační prostředek od dávna používaný a také v mnoha případech osvědčený*. Nicméně Petr opět neuvádí žádnou referenci, vápennou vodou pouze doplňuje seznam prostředků sepsaný Friedrichem Rathgenem v roce 1898, kde vápenná voda doporučována není. V jiných článcích Petr pouze uvádí, jak se vápenná voda připravuje.

Podrobný návod na použití vápenné vody při konzervaci omítek podává Hošek a Muk (1989). Popis je identický s textem Stena Petersona (1982), který se tak zdá být „apoštolem teoretického podkladu“ propagace užívání vápenné vody pro konsolidaci omítek u nás. Tvrzení J. Hoška, že se jedná o *tradiční velmi účinný způsob zpevňování omítek*, není nijak vědecky ani technicky dokázáno. Sám Peterson ve své stati uvádí, že je obtížné vědecky dokázat účinnost metody a že ani neexistují publikace o metodě a technologických postupech, neboť *staří řemeslníci užívali pouze svoji zkušenost zděděnou z otců na syny a zřídka psali*. Aniž bychom zpochybňovali předávání zkušeností tradicí, musíme trvat na tom, že zmiňovaná *velká účinnost* při zpevňování by měla být snadno měřitelná a objektivně prokazatelná. Restaurátor Peterson popisuje použití vápenné vody zejména pro konsolidaci nástěnných maleb, tedy omítek, které jsou většinou málo zvětralé, jsou převážně umístěny v interiérech a jejich složení či úpravy pod malbu jsou většinou velmi odlišné od běžných fasádních omítek. Jeho práce proto nevyovídá nic o zkušenostech s používáním vápenné vody pro konsolidaci vnějších omítek. Pro úplnost uvedme v překladu jeho návod na přípravu a aplikaci vápenné vody pro zpevňování omítek:

*Vápenná voda (Ca(OH)<sub>2</sub>) je čirý nasycený roztok obsahující 1700 mg Ca v jednom litru vody při 20 °C, pH je přibližně 9<sup>1</sup>. Pro přípravu se vezme 1 díl vápenné kaše a 6–8 dílů čisté vody (objemově). Směs musí být velmi dobře rozmíchána a ponechána odstát nejméně 24 hodin. Po této době se usadí přebytečné vápno na dně nádoby a nad ním je čirý nasycený roztok vápenné vody, velmi brzy s tenkým škrálopem kalcitu na hladině. Před nalitím vody do rozprašovače je nutno plovoucí krustu odstranit a opatrně odebrat čirou tekutinu z nádoby.*

Peterson sice obecně píše, že metodu lze použít pro konsolidaci křehkých nebo drolivých omítek, ale zřejmě s touto aplikací má zkušenosti pouze v případech restaurování nástěnných maleb, tedy na omítkách relativně pevných. Svědčí pro to i jeho některá doporučení, jak zlepšit vsakování vápenné vody do omítky, pokud nemá podklad dobrou nasákavost (čištění, postřík čistou vodou). Doporučuje provádět aplikaci vápenné vody nejpozději dva měsíce před příchodem mrazů.

Peterson neuvádí, odkud čerpá své návody na přípravu vápenné vody. Zdá se však, že jsou založeny na klasické práci Morových (Mora et al. 1977) či na jejich zdrojích (Denninger 1958).

Zajímavá zkušenost je tradována a snad někde i používána ve Francii<sup>2</sup>. Staří francouzští řemeslníci znají na zpevňování porézniho pískovce a vápence vápennou vodu, připravenou z jednoho dílu vápna a 10 dílů vody. Podmínkou úspěchu prý je použití pasty z 6 až 7

<sup>1</sup> Podle odborné literatury je při 20 °C rozpuštěné množství menší (viz např. dále citovaný Lewis a Walter, 1986 nebo Chemické a analytické tabulky, Vohlídal, Julák, Štulík 1999: 1600 mg/l při 20 °C), pH je podle měření autorů článku 12–12,5. Literární údaje o rozpustnosti i kyselosti roztoku se velmi liší.

<sup>2</sup> Loits, A.: soukromé sdělení (private communication).

let starého vyhašeného vzdušného vápna uloženého pod vodou. Vápenný hydrát nebo mladší pasta jsou považovány za nevhodné. Opět se však jedná pouze o spekulaci, která není vědecky nijak ověřena či potvrzena<sup>1</sup>. Podstatné je snad jenom to, že za tradiční technologii se zde považuje užívání hašeného vzdušného vápna, uloženého delší dobu pod vodou. Nicméně, renomovaná francouzská badatelka v oboru zpevňování kamene V. Verges-Belmin popírá, že by se podobná technologie ve francouzské restaurátorské praxi používala<sup>2</sup>. Neznáme podrobnější návod na použití výše popsané tekutiny, pokud by však byla aplikována v uvedené koncentraci (1:10 obj.), pak vzhledem k rozpustnosti „vápna“ ve vodě se opět nejedná o vápenou vodu, nýbrž vápennou suspenzi (pačok).

V anglosaské literatuře patří mezi starší zmínky o vápenné vodě krátký odstavec v Millarově práci z roku 1897 „Plastering (plain & decorative)“<sup>3</sup>, kde se praví, že vápenná voda má především účinky dezinfekční, neboť *omítkáři jsou většinou zdraví a netrpí infekčními chorobami*. A dále, že vápenná voda použitá jako pačok nebo řídký nátěr (*wash*)<sup>4</sup> zpevňuje maltové odlitky. Také se prý užívá ke zpevnění povrchu při finální úpravě vrchní vrstvy omítky (*when scouring and trowelling setting stuff*).

Jeden z nejrozhodnějších článků proti používání vápenné vody pro konzervaci kamene napsal Nicholas J. T. Quayle z Cliveden Conservation Workshop Ltd. (1996). Článek se v podtitulu nazývá „marnost konsolidace kamene pomocí hydroxidu vápenatého“ a protože je názorem zkušeného praktika, stojí za podrobnější prezentaci. Autor uvádí, že příběh o narození této metody slyšel poprvé jako kamenický učeň v Yorku: *Jednou mladý tovaryš se svým mistrem bílili vápnem kostel. Každý večer vyplachovali své štětky ve vodě a potom jimi pleskali o zvětralý kamenný práh, aby odstranili vodu ze štětín. Po čase si bystrý mladý tovaryš všiml, že se práh stal tvrdším a odolnějším než okolní plochy drobného vápence na kostele. Aha, pomyslel si s velkou chápavostí, vápenná voda musí působit jako konsolidant na zvětralé kamenné prvky. A tak dnes následujeme příklad dobrého tovaryše a pleskáme vápennou vodu na plochy zvětralého vápence ve snaze zpevnit ho a chránit*. Quayle hodnotí tento příběh jako velmi nepravděpodobnou pohádku, která stojí pouze za vyprávění u krbu za dlouhých zimních večerů. Toto tvrzení podpírá následujícími argumenty.

*Nejprve připomeňme, že vápenná voda je roztok hydroxidu vápenatého ve vodě a aplikuje se tradičně štětkou nebo nověji mlžením (jemným postříkem) na zvětralé plochy kamene. Hydroxid vápenatý je rozpustný ve vodě, přičemž se obvykle lépe rozpouští při nižších teplotách než vyšších (konsolidace by se měla provádět studenou vodou). Při teplotě 0 °C obsahuje vápenná voda kolem 1,8 g rozpuštěného hydroxidu vápenatého v jednom litru (Lewis a Walter 1986), při teplotě 15 °C pouze kolem 1,4 g l<sup>-1</sup>. Teoreticky po aplikaci vápenné vody, absorbované drobným kamenným povrchem, přítomný hydroxid vápenatý reaguje se vzdušným kyslíčkem uhličitým a vytvoří uhličitán vápenatý. Předpokládá se pak, že se tato sloučenina váže kolem částec vápence, vyplňuje póry a zpevňuje rozpojenou látku. Potud teorie, která*

<sup>1</sup> Ve světle nedávných výzkumů vápenných nanočástic (viz níže) by se zde snad mohl příznivě projevovat vliv zvýšené teploty při hašení vzdušného vápna na velikost částic Ca(OH)<sub>2</sub>.

<sup>2</sup> Verges-Belmin, V.: soukromé sdělení (private communication).

<sup>3</sup> Reprint vydaný nakladatelstvím Donhead Publishing Ltd., 1998, str. 51.

<sup>4</sup> Toto konstatování je terminologicky nejasné a ukazuje opět na velmi libovolné a nepřesné používání termínu „vápenná voda“ i v odborné literatuře.

se v praxi zdá někdy fungovat a někdy ne. Spíše častěji nefunguje a ukazuje se, že vápenná voda nemá žádný efekt. Podle věhlasných odborníků na konzervaci památek Johna a Nicolly Ashurstových (Ashurst a Ashurst 1988a) „se pokusy zaznamenat či kvantifikovat tento jev (zpevnění) potkaly s rozčarovávajícími neúspěchy...“. Quayle uvádí vlastní zkušenost obtížné předpovědi dosažení zpevňovacího efektu, nicméně připouští, že u měkčích typů vápenců lze někdy pozorovat příznivé změny (vápenec z Bath, Doulting, Chilmark), u tvrdších (např. Portlandského) metoda nefunguje vůbec. Nicméně i u kamene, kde lze pozorovat zpevnění, se často nedosahuje žádaného efektu v celé ploše kamene. To je první argument proti používání vápenné vody jako zpevňovače. Konzervátor či restaurátor totiž může zjistit, že po dlouhé době strávené aplikací vápenné vody (obvykle 40 postřiky) byla jeho snaha částečně nebo úplně marná. Nepomohou zde ani zkoušky na menší ploše, protože případný úspěch na vybrané ploše nezaručuje fungování techniky na celém díle. Konsolidace vápennou vodou je ve výsledku natolik nepředpověditelná a náhodná a příliš často zcela selhávající, že neposkytuje spolehlivou a hospodárnou odpověď na řešení problému konsolidace zvětralého vápence. V dalším Quayle uvádí negativní výsledky Clifforda Price, získané právě pro měkčí typy vápence (Doulting, Monks Park), které popisujeme na jiném místě.

Druhým Quayleovým argumentem je přirozená obava z nadměrného máčení kamene. *Vlhkost je bezesporu největším nepřítelem kamene a většiny stavebních materiálů. Praxe převzatá od Petersona používá 30–40 aplikací vápenné vody. Množství absorbované vody se výrazně mění v závislosti na porozitě kamene a stupni vyschnutí před další aplikací. Kámen by v ideálním případě neměl zcela vyschnout, neboť začínající proces karbonatace by mohl bránit hlubšímu pronikání hydroxidu do látky<sup>1</sup>. Nicméně právě opakované máčení či vlhnutí materiálu je hlavním mechanismem, který způsobuje jeho degradaci. Je známo, že chátrající stavební hmoty často obsahují rozpustné soli. Opakované máčení tyto soli rozpouští a transportuje, v kameni obvykle směrem k povrchu při vysychání. Soly pak šťastně rekrystalizují buď na povrchu, nebo pod ním. My konzervátoři tak vystavujeme kámen opakovaným útokům jeho nejvražednějšího nepřítele v hluboké víře, že ho chráníme proti postupující degradaci. K destrukčním účinkům krystalizace solí přičiňují další zhoubné procesy. Jsou to cyklické objemové změny spojené s bobtnáním a smršťováním některých minerálů, opakovaně absorbujících a ztrácejících vodu. Tyto rovněž uvolňují vazby držící látku pohromadě. Dále jakékoliv residuální jílové či silikátové minerály mohou podléhat hydrataci a živce i hydrolýze. Stopy kyslíčků železa v kameni mohou být též předmětem hydratace a následné konverze na hydroxidy železa (Ollier 1984). Tyto chemické procesy, přestože v malých objemech, jsou dostatečnou příčinou dalšího rozvolňování a rozpadu oslabeného materiálu. Opakovaným máčením povrchu tak můžeme podporovat komplexní fyzikální a chemické změny, o nichž je známo, že vedou k přímému rozpadu kamene. Zkoušet konsolidovat materiál s nepochybným vědomím, že zrychlujeme proces rozpadu, je víc než nerozumné – je to šílenství.*

Třetím argumentem Quayle proti vápenné vodě je viditelné poškození, vyvolané opakovaným máčením. *Vápenná voda je většinou aplikována na svislé plochy a architektonické prvky. Ti z nás, kdo používali vápennou vodu, pozorovali se zoufalstvím, jak je uvolněný materiál viditelně splavován po povrchu kamene (Ashurst a Ashurst 1988b). S každou sprškou*

<sup>1</sup> Toto je jeden z nejméně prozkoumaných jevů. Na jedné straně zcela jistě nedochází k uzavření pórů a dá se předpokládat, že postupná karbonatace je pravděpodobně i efektivnější, na druhé straně zkušenosti I. Brajer a N. Kalsbeek mluví o opaku (pozn. autorů).

vápenné vody zrna kamene kloužou po stěně do propasti. Ale když takto vymyjeme většinu uvolněné látky, zřejmě nám na konci zůstane odolnější vrstva. Když kamenický tovaryš pleskal štětkou do schodu každý večer, zcela jistě mechanicky odstranil všechny uvolněné drolivé části a odkryl pevný kámen. Kde je teorie teď? V památkové péči není místo pro slepé objevy svěhlavého mládí.

V poslední části článku klade Quayle logickou otázku o mechanické účinnosti dosazeného množství vápna do degradovaného materiálu. Vychází přitom z vlastního pozorování, že někdy dochází ke zpevňovacímu efektu na povrchu. Poznává, že hlubší výzkum těchto případů ukazuje, že se obvykle vytváří pouze tenká krusta, která kryje stále drolivé jádro. Dále uvádí výsledky C. Price, o kterých referujeme na jiném místě a které podrobně studovaly jak malou hloubku penetrace, tak neměřitelný mechanický efekt. Quayle uzavírá svůj článek prohlášením, že *používat vápennou vodu jako konsolidant znamená dělat si problémy. Její nepředpověditelné a často neefektivní výsledky, vysoké náklady na aplikaci, nepochybné poškozování kamene, které způsobuje, mizivě malé množství vápenného depositu – to všechno ji činí zcela nevhodnou pro konsolidaci kamene.*

K problému se vyjádřil v ČR i P. Kotlík (2006) poměrně skeptickým názorem na pojivovou schopnost nově vzniklého uhličitanu vápenatého. Jako nevýhodu uvádí již zmíněnou malou odolnost nového kalcitu vůči kyselým exhalátům z atmosféry. Upozorňuje na riziko aktivace solí ve zdivu a dočasné ztěžknutí zchátralých omítkových vrstev při procesu opakované aplikace vápenné vody. Připomíná, že objektivní vyhodnocení charakteru vzniklého uhličitanu, jeho pojivové schopnosti apod. dosud v odborné literatuře nebylo zveřejněno.

## Vědecký výzkum o konzervačních účincích vápenné vody

Aplikace vápenné vody při zpevňování anorganických poréznych materiálů s vápennou maticí byla v minulosti vědecky zkoumána zejména pro restaurování vápencových památek. Příkladem jediné publikované dlouhodobě úspěšné aplikace vápna při konzervaci vápencových soch je restaurování soch na katedrále ve Wellsu v Anglii. Pro restaurování byl použit velmi složitý proces, vyvinutý profesorem R. Bakerem. Stručně řečeno sestává ze tří kroků: 1) Nejprve se na předem zvlhčený povrch nanese pasta z horkého čerstvě vyhašeného vápna (hydroxid vápenatý) ve vrstvě tlusté od 20 do 30 mm, která se přikryje polyethylenovou fólií. Tato pasta (vápenný obklad) zůstává na objektu dva až tři týdny a je pravidelně denně vlhčena, aby nevyschla. Potom je vápenný obklad opatrně sejmout, kámen je postříkán vodou a jemně přebroušen kvůli odstranění zbývajících nečistot. 2) Následně je kámen zvlhčen 40krát vápennou vodou (čirý nasycený roztok hydroxidu vápenatého), litou na povrch v průběhu několika dní. 3) V poslední fázi – po případném zatmelení poškozených částí vápennou maltou – je kámen opatřen ochranným krycím nátěrem, vyrobeným z vápna, písku a kamenného prachu.

C. A. Price (1984) podrobně zkoumal vliv výše zmíněného procesu na konsolidaci vápence. Petrologickým šetřením v mikroskopu nebyly zjištěny žádné deposity vápence či hydroxidu vápenatého, což samozřejmě neznamená, že se žádný neuložil do struktury, neboť petrologická metoda nemusí být dosti citlivá na velmi malá množství. Proto Price provedl další podrobnější výzkum při použití radioaktivně značkováného vápníku <sup>45</sup>Ca, který pak byl snáze detekovatelný (Price et al. 1988). Tento druhý výzkumný projekt ukázal, že se nějaké množství vápna (*some lime*) přece jenom uloží do degradovaného vápence a stopy byly

detekovatelné až do hloubky 26 mm. Ve všech případech však nejméně polovina vápna zůstala ve 2mm vrstvě u povrchu. Dále bylo zjištěno, že máčení vápennou vodou je přibližně 5krát efektivnější než obklady vápennou kaší. Zdá se, že tyto obklady snad mohou zlepšit pozdější pronikání vápenné vody do vápence.

Pro naši diskusi je zajímavější zkoumání vlivu vápna uloženého do kompozitu na zpevnění ošetřovaného materiálu. Price (1984) použil měření pomocí abraze křemenným pískem tryskáním tlakem 276 kPa na povrch a měřením objemu vytvořené díry o různých hloubkách od 10 do 50 mm. Nezjistil žádné zlepšení pevnosti, což nepřekvapí, když vezmeme v úvahu hloubku možného významnějšího depozitu do 2 mm (viz výše citovaný Price et al. 1988) s množstvím uloženého vápence v jednotlivých vrstvách: 1,19 % 0 až 1 mm, 0,73 % 1 až 2 mm, 0,28 % 2 až 3 mm, 0,14 % 3 až 4 mm, 0,10 % 4 až 5 mm, 0,04 % 5 až 7 mm, 0,03 % 7 až 9 mm, 0,02 % 9 až 11 mm. Taková množství jsou pro anorganické pojivo většinou zanedbatelná a jakýsi vliv bychom mohli očekávat pouze v hloubce do 2 mm.

Price (1984) tento dosti negativní experiment doplnil dalším pokusem konsolidovat drčený vápenc. Vycházel přitom z předpokladu, že drčená směs nemá žádnou počáteční soudržnost a tudíž jakékoliv sebemenší zlepšení soudržnosti po úpravě vápennou vodou bude okamžitě patrné. Tříděná směs měla následující proporce zůstatku na sítích: 2,36 mm 10 %, 1,18 mm 20 %, 600  $\mu$  20 %, 300  $\mu$  20 %, 150  $\mu$  15 % a 10 % propadlo sítem 150  $\mu$ . Tato směs byla zvlhčena a vložena do trychtýře s filtračním papírem, vysušena a zvážena. Potom byl ponořen spodek trychtýře do vápenné vody 2 °C teplé, dokud nedošlo k viditelnému zvlhčení drti. Tento úkon trval 5–10 minut a postup vyloučil vymytí nejmenších částic z drti ke dnu, ke kterému by došlo, kdyby byla vápenná voda nalévána shora. Následně byla drť ponechána při pokojové teplotě až do vyschnutí, což obvykle trvalo několik dní a nikdy méně než 24 hodin. Cyklus vlhčení a vysychání byl opakován 30krát a trval 6 měsíců a byl doprovázen stejným procesem na drti s použitím destilované vody pro vytvoření referenčního vzorku. Po skončení zkoušky bylo zjištěno zvýšení hmotnosti vzorku o 0,38 % a 0,40 % pro dva zkoušené typy vápence. Nicméně nebyl pozorován sebemenší konsolidační efekt. Z toho plyne, že silně zvětralou maltu nelze vápennou technologií úspěšně konsolidovat.

Jak tedy vysvětlit „zázrak z Wellsu“, kde je vidět nesporně pozitivní efekt na sochách ošetřených vápennou technologií? Price uvádí tři možné důvody.

Proces probíhající *in situ* se může lišit od modelované situace v laboratoři tím, že zvětralý kámen obsahuje významnější množství síranu vápenatého, vytvořeného reakcí s kyslíčkem síry obsaženými v ovzduší. Konsolidační efekt pak může být výsledkem rozpuštění a opětovné depozice síranu vápenatého<sup>1</sup>. Tuto teorii podporuje známý fakt, že i opakovaná aplikace destilované vody může mít podobné zpevňovací účinky jako vápenná voda (Clarke a Ashurst 1972). Laboratorní pokus mohl být ovlivněn i nižší vlhkostí vzduchu při schnutí než *in situ*.

Druhou možností je blahodárný vliv tenké povrchové krusty, která mohla být vytvořena vápennou vodou. Laboratorní pokusy byly zaměřeny na zpevnění materiálu do hloubky, nikoliv na povrchový efekt, ke kterému může snadno docházet *in situ*.

Třetí vysvětlení může být závěr, že dosažení úspěchu na sochách ve Wellsu vůbec nesouvisí s vápennou vodou, ale je výsledkem pečlivé práce restaurátora a pokrytí soch ochrannou vrstvou (nátěrem). Toto vysvětlení Price opakuje i v řadě dalších svých článků.

<sup>1</sup> Později ukážeme, že se tento předpoklad nenaplnuje.

Výše uvedené příklady zkoumání vlivu vápenné vody na konsolidaci kamene patří mezi nejserióznější práce v této oblasti. Výzkum na vápenných maltách v podobném rozsahu a vědecké kvalitě nebyl v minulosti publikován a pravděpodobně nikde ani realizován. Z uvedených údajů však přinejmenším vyplývá to, že spolehlivé a přesné měření velmi malého vlivu aplikace vápenné vody je velmi obtížné a kontrola účinnosti nemůže být prováděna bez dostatečného časového odstupu, potřebného k rozvoji karbonátace.

Vliv vápenné vody na impregnaci nástěnných maleb typu *secco* studovala Isabelle Brajer s Nicoline Kalsbeek (1999). Tato práce patří bezesporu mezi nejvýznamnější v oblasti výzkumu vlivu vápenné vody na malty a omítky. Nicméně, cílem použití vápenné vody byla fixace uvolněné vrstvy malby k podkladní omítce a nikoliv zpevnění omítky samotné. Této fixace bylo podle autorek dosaženo. Jedná se o klasický problém studia konsolidačního efektu vápenné vody, v daném případě malby provedené na vrstvě vápenného pačoku (*lime-wash*) technikou „*kalkmalerei*“, tedy o zcela jiný problém, než je konsolidace omítky. Cílem je konsolidovat uvolněné částičky pigmentu ve vrstvě malby, nikoliv zvýšit pevnost nebo soudržnost narušené omítky. Pro tento účel se vápenná voda s oblibou a zřejmě i úspěšně užívá zejména v Dánsku.

Práce I. Brajer a N. Kalsbeek (1999) je cenná zejména proto, že podrobně popisuje technologii aplikace vápenné vody a její výsledky při restaurování kostela v Avnsø v Dánsku, tedy v podmínkách, kdy se mohly uplatňovat všechny fyzikální vlivy včetně stavenišť (kapilarita, hydrofilní nebo elektroosmotické působení, difuze a vypařování, stavební podkladová konstrukce a její okolí). Výzdoba kostela je provedena jednobarevnou malbou s užitím na prach drceného dřevěného uhlí smíchaného s vápnem. Podklad tvoří tenká vrstva vápenného pačoku, natřená na 2 cm tlusté vápenné omítce, z heterogenní směsi jemného písku a drobných kamínků. Přílnavost podkladní vrstvy k omítce byla dobrá, pouze částice pigmentu byly uvolněné tak, že při lehkém přetření malby bavlnou došlo k jejímu znečištění. Obsah solí byl velmi nízký (pod  $0,05 \text{ mol.kg}^{-1}$ ), v maltě byly zjištěny stopy proteinů a podklad byl velmi nasáklý.

Při restaurování byly zkoumány tři rozdílné aplikace: i) stříkání povrchu vápennou vodou až do úplného nasycení podkladu tak, že podklad nemohl ani částečně vyschnout, ii) stříkání povrchu destilovanou vodou stejným způsobem jako v případě i) a iii) stříkání povrchu vápennou vodou s přestávkami, umožňujícími povrchové vyschnutí. První dvě procedury užívaly jemný aerosolový sprej a aplikace roztoku byla přerušena, jakmile se objevilo stékání vápenné vody po povrchu. Pokračovalo se dále ve chvíli, kdy byl podklad opět schopen absorbovat tekutinu. Množství aplikované tekutiny bylo váženo a časy přerušování aplikace zaznamenávány. Je zřejmé, že bylo nutno pracovat 24 hodin denně. Při stříkání s přerušením byl použit stejný způsob vlhčení, pouze s tím rozdílem, že přestávky byly delší (přibližně 12 hodin) a umožňovaly vyschnutí povrchové vrstvy, což bylo kontrolováno změnami barvy vlhkého a suchého povrchu. Práce probíhaly 10 dní v srpnu při průměrné teplotě  $17^\circ\text{C}$  a relativní vlhkosti 75 %.

Výsledky byly vyhodnocovány 14 a 80 dní po ukončení ošetřování malby. Opět bylo použito stírání povrchu bavlněnou buničinou. Kromě toho byl odebrán vzorek omítky pro mikroskopická šetření a další analýzy. Vzorek obsahoval i část se zachovanou informací původního stavu před ošetřováním. Během deseti dnů ošetřování došlo k 70 aplikacím vápenné i destilované vody bez přerušování k vyschnutí a ke 20 aplikacím vápenné vody s vysýcháním. Malba s podkladem přijala

30 l.m<sup>-2</sup> vápenné vody a 25,5 l.m<sup>-2</sup> destilované vody. Při umožnění vysychání bylo do podkladu vpraveno 10,57 l.m<sup>-2</sup> vody během 20 cyklů a deseti dnů. Třiceti litry vody lze do jednoho metru čtverečního omítky teoreticky dopravit cca 69 g.m<sup>2</sup> uhličitanu vápenatého, pokud pracujeme při nízké teplotě prostředí a zreaguje nám všechna vápenná voda se vzdušným kyslíčkem uhličitým. Samozřejmě toto množství je závislé i na nasákavosti podkladu.

Po 14 dnech nebyl na ošetřovaných plochách pozorován žádný vliv jak při makroskopickém, tak při mikroskopickém (SEM) zkoumání. Po 80 dnech jsou na ploše ošetřené bez možnosti vysychání pozorovatelné nové krystaly kalcitu a malba byla fixována. Autorky připouští, že tento efekt může nastat i dříve v intervalu mezi 14 a 80 dny. Na vzorcích ošetřených s přestávkami na vysychání nebyly zaznamenány na SEM žádné nové krystaly ani po 80 dnech. Z těchto pozorování a dalších analýz autorky dospěly k závěru, že je nutné aplikovat vápennou vodu pro fixaci malby kontinuálně bez přestávek na vysychání. Podle názoru pisatelů této zprávy není takovýto závěr zcela prokázáný. Množství vápenné vody, dopravené 20 cykly s vysycháním, je přibližně stejné jako množství vápenné vody dopravené do podkladu kontinuálními 20 aplikacemi. Bylo však pozorováno, že při vysychání se množství vody s každou následující aplikací snižuje rychleji než u kontinuálního syčení, a tak by celkové množství po 70 cyklech s vysycháním mohlo být skutečně značně nižší. Na druhé straně je postup s vysycháním šetrnější, neboť méně zatěžuje omítkovou vrstvu. Dalším významným závěrem je konstatování, že aplikace vápenné vody je technologie velmi náročná, vhodná pouze pro specifické podmínky a vyžadující velmi kvalifikovaný návrh postupu práce v závislosti na podrobném rozboru konkrétní situace.

V České republice již došlo k řadě aplikací metody opakovaného vlhčení omítek bez vědecky spolehlivě prováděného monitoringu a následného vyhodnocení s uvažováním všech možných a známých vlivů. Obvykle uváděné zpevnění měřené odlučovacím testem (tzv. „peeling test“ nebo „scotch tape test“) na omítkách je zatíženo velmi silným zkreslením a je pravděpodobně ve většině případů z podstatné části zdánlivé, neboť je významně ovlivněno postupným opakovaným „smýváním“ nedostatečně zakotvených zrn plniva a zvětřalého pojiva<sup>1</sup>.

Problémem je dále v textu několikrát zmíněné matení pojmů vápenná voda versus vápenný nátěr (pačok) a nedůsledné rozlišování aplikace na zpevnění maleb (tenké povrchové pigmentové vrstvy) versus zpevnění omítek. Nemůžeme se vyhnout míšení těchto pojmů ani v předkládaném přehledu literatury, jenom je třeba dávat pozor, jaké výsledky mohou být užitečné pro posouzení účinnosti vápenné vody při konsolidaci omítek.

Pro úplnost uvedme, že k vápenné vodě se často uvádí ještě varianta použití nasyceného roztoku hydrogenuhličitanu vápenatého (kalcium bikarbonátu) /Ca(HCO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> nebo CaCO<sub>3</sub>. H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/ obsahující 1100 mg CaCO<sub>3</sub> v jednom litru vody při 20 °C. Ve srovnání s nasyceným roztokem Ca(OH)<sub>2</sub> má tento roztok nižší pH, proto je uváděn v souvislosti s konsolidací temperových částí maleb, které jsou příliš citlivé na alkalické působení vápenné vody. Podle materiálů Scottish Lime Center (SLC 2006) lze vyrábět kalcium bikarbonát v pivních sudech pod tlakem a aplikovat také pro konsolidaci jádra pláštového zdíva. Podrobnější citace na výzkumné práce nebo výsledky materiálových zkoušek však SLC neposkytl<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Nejnovější výsledky výzkumu v této oblasti jsou známy teprve v posledních letech – viz kapitola Měření povrchové soudržnosti historických materiálů.

<sup>2</sup> Při osobním rozhovoru autorů této kapitoly v SLC v květnu 2007 bylo zjištěno, že takové údaje nejsou k dispozici.

## Konsolidační účinky vápenné vody podle výzkumu v ÚTAM

Výše uvedená rešerše ukazovala, že se v minulých výzkumech nepodařilo prokázat technicky významné zvýšení pevnosti či soudržnosti omítek nebo hornin v důsledku aplikace opakovaného máčení vápennou vodou. „Technicky významné“ znamená měřitelné a vyčíslitelné v hodnotách užívaných mechanických charakteristik a prokazatelně ovlivňující životnost a funkceschopnost stavebního prvku (omítky). Dále bylo zjištěno, že v závislosti na chemickém složení povrchové krusty může opakovaným vlhčením naopak docházet i k poškození historického povrchu. Proto byl v ÚTAM AVČR realizován speciální výzkum k hlubšímu poznání některých z těchto závislostí. Všechny poznatky a zkušenosti popsané výše byly využity pro plánování studie a experimentů.

Pro konsolidaci byly použity následující prostředky: destilovaná voda, vápenná voda ve dvou režimech aplikace – s napouštěním do stále vlhkého substrátu vedle režimu, kdy další množství bylo aplikováno až po vyschnutí substrátu – a síranová voda se stejnými dvěma režimy jako vápenná voda. Existuje mnoho variant kombinací jednotlivých konsolidačních prostředků, jejich koncentrací v roztocích nebo suspenzích a mnoho možností aplikačních technik. Studie nemohla postihnout všechny, výběr byl proveden tak, aby se prozkoumaly některé z otázek minulých výzkumů. To byl i případ použití destilované a síranové vody, kde se zkoumal jejich případný nezávislý vliv na konsolidaci, neboť tyto látky jsou nebo mohou být při praktických úlohách přítomné, protože opakované vlhčení krust může rozpouštět sírany. Ty pak mohou migrovat hlouběji do omítkových vrstev.

Z výzkumu C. Price plyne, že konsolidační efekt vápenné vody je obtížně měřitelný, proto byly vyvinuty speciální experimentální metody, které jsou podrobně uvedeny v kapitole Zkoušení konsolidačních efektů na maltách a horninách. Zde jen uvedme, že pro zkoušení vlivu napouštění vápennou vodou byla použita tenkostěnná zkušební tělesa – krátké válcové roury pro zkoušení materiálových vlastností v tlaku (**obr. 150**) a tenké destičky pro tahové zkoušky (**obr. 151**). Zkušební tělesa byla vyrobena z malty s nízkým obsahem pojiva. Maltovou směsí byla naplněna forma z trubkových mezikruží z nerezové oceli bez použití separátorů a poté dobře zhutněna, což umožnilo vytlačení nadusané čerstvé maltové roury z formy okamžitě po zhutnění a vyloučilo vznik trhlin vlivem smrštění při tuhnutí. Trubkový tvar zvýšil výrazně poměr plochy povrchu ku ploše průřezu v porovnání s válcovým tělesem a umožnil tak téměř rovnoměrnou depozici hydroxidu vápenatého v celém průřezu zkušebního tělesa. Tím se znásobila měřitelnost konsolidačního efektu. Vzorky jsou vždy napouštěny pouze z vnějšího povrchu a tím se u objemných těles snižuje množství uloženého konsolidačního prostředku podél hloubkového profilu. Tenké stěny zkušebních vzorků a vynechání separátorů pro odformování zlepšuje výrazně penetraci prostředku a podmínky pro jeho zrání.

Tělesa vyrobená z vápenné malty byla ošetřována šetrným postřikem destilované vody po dobu jednoho měsíce, což mělo lehce škodlivý erozní vliv na kvalitu kontaktních ploch trubky. Tyto geometrické nedokonalosti samozřejmě způsobují rozptyl výsledků a vyšší hodnoty pevností jsou měřeny na tělesech s perfektním kontaktem mezi tlačnou deskou a maltovou rourou. Nicméně experimentálně zjištěný vliv zarovnání okrajů sádrou nepřinesl významné zlepšení v rozptylu výsledků (**obr. 152**) a tak zkoušky probíhaly většinou na tělesech pouze s vyrovnanou geometrií podstavy. Tenké destičky pro tahové zkoušky byly opatřeny překližkovými koncovkami pro spolehlivé uchycení do speciální ohebné spojky, která zajišťovala správnou



**OBRÁZEK 150:** *Těleso pro tlakové zkoušky***OBRÁZEK 151:** *Tenká deska pro tahovou zkoušku***OBRÁZEK 152:** *Zkouška pevnosti v tlaku***OBRÁZEK 153:** *Zkouška pevnosti v tahu*

souosost bez excentricity a bez rušivých vlivů ohybových momentů (**obr. 153**). Všechny vzorky byly před zkouškou uloženy v prostředí s 20 °C a 65 % relativní vlhkosti.

Vápenná malta pro zkušební tělesa byla vyrobena ze směsi mletého hydrátu vzdušného vápna a říčního písku v poměru 1:9 objemově. Tělesa zrála šest měsíců před aplikací konsolidačních látek. Po aplikaci konsolidantů byla tělesa ponechána v klidu k dalšímu zrání po dobu 60 dní, aby mohla proběhnout karbonatace hydroxidu vápenatého. Úroveň karbonatace



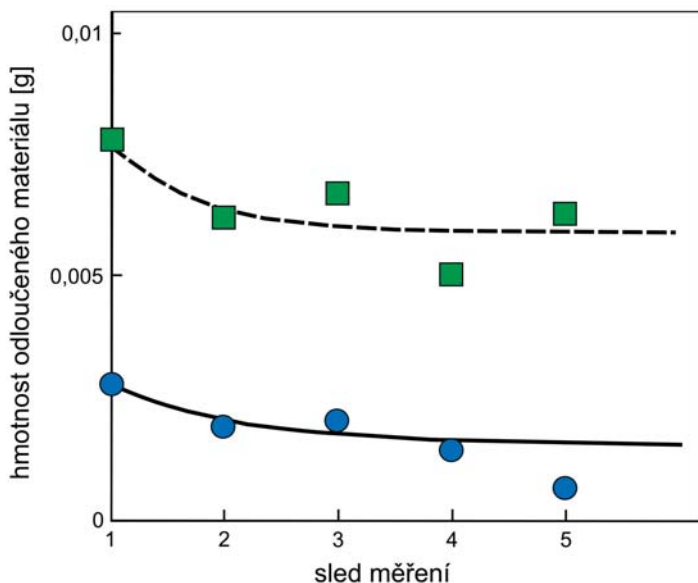
**OBRÁZEK 154:** Penetrování tenkostěnných rour pro tlakové zkoušky

byla kontrolována fenolftaleinovým indikátorem pH (1% roztok v etylalkoholu) jak v tělese před konsolidací, tak po vyzrálé konsolidaci. V obou případech byla reakce testu negativní a tělesa byla považována ze zkarbonatovaná a připravená ke zkouškám mechanických vlastností.

Každý konsolidant byl do zkušebních těles vpravován kontinuálně po kapkách pomocí injekční stříkačky kolmo k vodorovné poloze povrchu – roury byly navlečeny na otáčivou podporu (**obr. 154**) a destičky byly umístěny horizontálně na podložkách. V obou případech byla penetrace kapaliny podporována gravitační a kapilárními silami. Byly použity dva způsoby aplikace: impregnace s periodickým vysycháním zkušebního vzorku před každou další aplikací a impregnace stále vlhkého tělesa. V prvním případě byla tělesa ponechána schnout 12 hodin před další aplikací, ve druhém případě byla nová dávka aplikována, jakmile ji byla malta schopná přijmout a ještě nebyla vyschlá (vlhký substrát byl impregnován kapalinou). V tomto druhém případě byl typický interval pro novou aplikaci 8 hodin. Vzhledem k očekávanému efektu byly zvoleny dva režimy opakování – 50 až 58 cyklů a 161 až 163 cyklů. Impregnace byla prováděna velmi pečlivě bez ohledu na neděle a svátky či den a noc v pravidelných intervalech.

Po vyzrání konsolidantů byly zjišťovány fyzikální charakteristiky zkušebních těles. Pro zkoušení mechanických vlastností konsolidovaných povrchů v terénu nejsou vyvinuty jiné přímé metody než výše zmíněný odlučovací test pomocí lepicí pásky. Korektní postup této zkoušky je popsán v kapitole „Měření podpovrchové soudržnosti historických materiálů“ a byl také použit pro testování účinnosti impregnace zkušebních těles vápennou vodou. **Obr. 155** ukazuje, že po 50 cyklech napouštění vápennou vodou nebyl pozorován žádný významný vliv tohoto ošetření, zatímco po 160 cyklech již vliv pozorován byl.

Při destruktivních zkouškách byly tenkostěnné válcové roury zatěžovány ve směru jejich osy (**obr. 152**), tahové zkoušky (**obr. 153**) byly provedeny jenom na malém vzorku zkušebních těles a zjištěné tahové pevnosti jsou pouze informativní. Pro zjištění vlivu tvaru zkušebního tělesa byly na rourách dosažené tlakové pevnosti porovnány s pevnostmi, měřeními na kvádrech pro neimpregnovaná tělesa. Výsledky ukazují, že tlakové pevnosti měřené na rourách vykazují přibližně 70% hodnoty zjištěné na nestandardních kvádrech o rozměrech  $40 \times 40 \times 27 \text{ mm}^3$ . Průměrná tlaková pevnost malty určená na neošetřených krátkých rourách

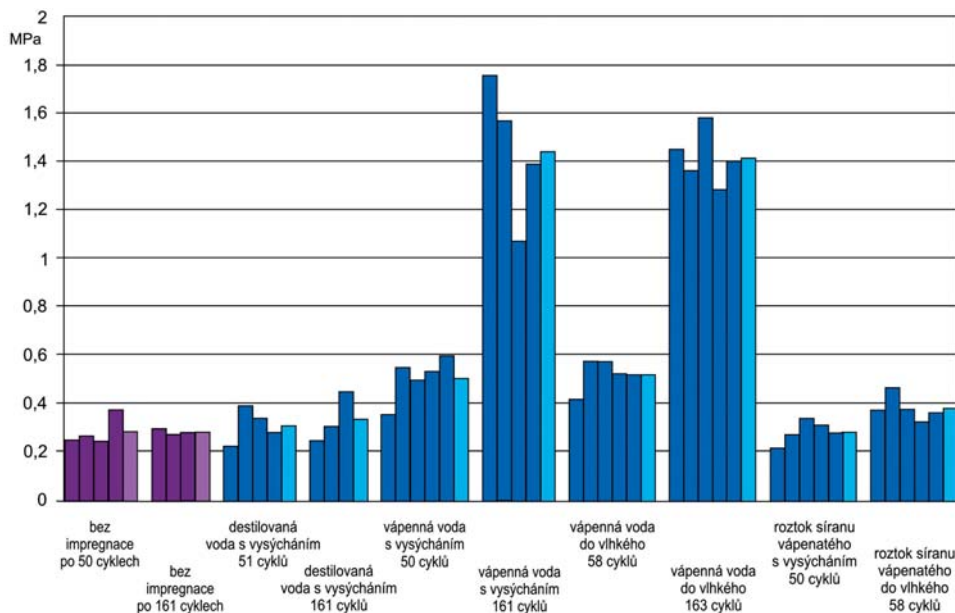


**OBRAZEK 155:** Soudržnost měřená odlučovacím testem po napouštění vápennou vodou – čárkovaná čára označuje výsledek po 50 cyklech napouštění, plná čára po 160 cyklech napouštění, čtverečky a kroužky označují průměry z pěti měření po příslušných cyklech napouštění

byla 0,260 MPa a průměrná tlaková pevnost zjištěná na kvádrech ze stejné maltové směsi dosahovala 0,365 MPa (po korekci na malou štíhlost podle kapitoly „Nestandardní laboratorní zkoušky malt a hornin“ této knihy). Pro účely testování vlivu různých konsolidantů porovnávacími zkouškami převod na standardní pevnosti nepotřebujeme znát, pokud máme zkušební tělesa ze stejného materiálu a o stejném tvaru a zajímá nás porovnání celkové odezvy. Nicméně znalost zkoušky kvádrů nám v tomto případě pomohly odhadnout, v jakém vztahu je zvolený modelový materiál (chudá malta) k obvyklým degradovaným historickým maltám. Pro hodnocení zkoušek je si však třeba uvědomit, že malta byla sice chudá, ale materiál byl velmi dobře zhutněn a působil celistvě, takže tento model nebyl vytvořen k tomu, aby napodobil typickou granulární desintegraci (pískovatění) degradovaných malt. Spíše odpovídal materiálu s vyplaveným pojivem. Nicméně, přes dobré zhutnění a kohezi zkoušené malty byl při aplikaci vápenné vody pozorován značný odpad zrn z ošetřovaného povrchu, i když napouštění bylo prováděno velmi jemně. Stejný efekt byl pozorován při terénní aplikaci vápenné vody na historické povrchy<sup>1</sup>. Měřené tlakové pevnosti jsou porovnány v **obr. 156**.

Grafy na **obr. 156** ukazují výsledky dvou souborů neošetřených zkušebních těles vždy stejného stáří, jako byly impregnované vzorky v okamžiku provádění zkoušky. První soubor odpovídá tělesům napouštěným 50 cykly vápenné vody s vysycháním a byl zkoušen s dalšími tělesy (50–58 cyklů) napouštěnými destilovanou vodou, síranovou vodou a vápennou vodou v režimu impregnace vlhkého substrátu 60 dní po posledním cyklu. Podobně druhý

<sup>1</sup> Drdáký, M., Slížková, Z. (2006): Nedestruktivní průzkum nezpevnovaných a zpevnovaných historických omítek na hradičích Pernštejně – I. etapa, Zpráva ÚTAM AVČR, 28 s., ÚTAM AVČR Praha, srpen 2006.



**OBRAZEK 156:** Porovnání vlivu různých impregnací na tlakovou pevnost chudé vápenné malty

soubor neošetřovaných těles odpovídá stářím tělesům napouštěným 160 cykly. Tento pečlivý plán experimentů vyloučil přítomnost neznámých vlivů zvýšení pevnosti v důsledku časově závislých chemických změn v maltě spojených s postupem karbonatace. Z grafu je patrné, že obavy byly správné a pozorované průměrné zvýšení pevnosti dosáhlo 12,5 %, když při výpočtu průměru byly vyloučeny nejnižší a nejvyšší dosažené pevnosti. Pokud bychom uvažovali o všech výsledcích, dosahuje průměrné zvýšení pevnosti 15 %.

Mírné zvýšení pevnosti těles napouštěných vápennou vodou (12,5 %) je v souladu se staršími publikovanými výsledky. Nicméně, závěry Clarka a Ashursta (1972) jsou podepřeny pouze vizuálním pozorováním a byly pravděpodobně založeny na množství odlučitelného materiálu (zrn) z povrchu malty. V naší studii je zvýšení pevnosti pravděpodobně výsledkem „léčení“ malých poruch a mikrotrhlin rekrystalizací částečně rozpouštěného uhličitanu vápenatého.

Impregnace 50 cykly napouštění vápennou vodou s vysýcháním a 58 cykly v režimu aplikace do stále ještě vlhkého substrátu vedlo ke zvýšení tlakové pevnosti zkušebních rour o 80 %, respektive 86 %. Takové zvýšení není nutně pozorovatelné při zkoušení standardních maltových krychlí, protože je detekovatelné pouze ve velmi tenké povrchové vrstvě. V našem případě byl napouštěný profil pouze 4 mm tlustý a víceméně kompletně nasycen konsolidantem, takže můžeme prohlásit měřený vliv za dobře definovaný. Výsledky dále neukazují na významný rozdíl mezi režimem napouštění vápennou vodou s vysýcháním a do stále ještě vlhkého substrátu. Zdá se, že u druhého režimu dochází při větším počtu cyklů k menšímu rozptylu výsledků.

Bylo dosaženo 497,7 % zvýšení tlakových pevností chudé vápenné malty po aplikaci 161 cyklů vápenné vody s periodickým vysýcháním a 485,5 % po 163 cyklech do vlhkého podkladu, což představuje významný zesilující efekt.

Tahová pevnost se zvýšila o 42,7 % po 119 cyklech impregnací vápennou vodou.<sup>1</sup>

Krystalizace síranu měla zanedbatelný vliv při aplikaci s periodickým vysýcháním. Napouštění do vlhkého podkladu a následná krystalizace vyvolala jisté zesílení, které dosáhlo 34,6 % po 58 cyklech a zůstalo mnohem nižší než efekt vápenné vody. Z toho plyne, že v úvodní části uvedený předpoklad C. Price o zpevňujícím vlivu rekrystalizace rozpouštěných síranů byl potvrzen pouze částečně a neměl by být uvažován jako významný při ošetřování vápennou vodou. Impregnace sulfátem snížila mírně tahovou pevnost (o 7,3 %), což nepřekvapilo vzhledem k očekávanému vzniku mikrotrhlin generovaných krystalizací rozpínavých sloučenin.

Z hlediska makroskopického pohledu mění větší počet opakovaných napouštění povrchu vápennou vodou jeho vzhled. Na povrchu se vytváří bílý zákal, který může tuto metodu diskvalifikovat pro aplikaci na sgrafita a omítky s nástěnnou malbou nebo barevné povrchy.

## Závěrečné doporučení

Opakované napouštění povrchu vápennou vodou může poskytnout přijatelné výsledky pro určitou třídu historických vápenných omítek jak z technického, tak z estetického hlediska. Ošetřované omítky by měly být dostatečně soudržné, celistvé a zároveň porézní bez kompaktní povrchové krusty. Nevhodné jsou zejména omítky a malty s granulárním rozpadem - pískovatěním. Významnější konsolidační efekt je dosažitelný jen s vysokým počtem opakovaného napouštění – obvykle 100 cyklů a více, při kterém však typicky dochází k uvolňování a odpadu zrn písku i pojiva z originálních povrchových vrstev. Tento jev mění texturu historických povrchů i jejich vzhled, navíc v kombinaci se vznikajícím bílým zákaelem při větším počtu cyklů. Technika je doprovázena i rizikem mobilizace rozpustných solí na povrchu i uvnitř omítky, a proto je třeba rozhodovat na základě pečlivého průzkumu substrátu, aby se zabránilo případným poškozením.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

- Ashurst, J. a N. Ashurst. *Practical building conservation: stone masonry*. New York: Wiley, 1988, 83.
- Ashurst, J. a N. Ashurst. *Practical building conservation: mortars, plasters and renders*. New York: Wiley, 1988, 56.
- Beruto, D. T., F. Barberis a R. Botter. Calcium carbonate binding mechanisms in the setting of calcium and calcium-magnesium putty limes. *Journal of Cultural Heritage*. 2005, 6(3), 253-260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2005.06.003>

<sup>1</sup> Naopak A. Hladíková („Porovnání účinnosti konsolidantů při zpevňování vápenných omítek“, Diplomová práce VŠCHT v Praze, 2006) uvádí, že pozorovala po aplikaci vápenné vody snížení ohybové pevnosti při zkouškách standardních maltových zkušebních trámečků.

- Brajer, I. a N. Kalsbeek. Limewater absorption and calcite crystal formation on a limewater-impregnated secco wall painting. *Studies in Conservation*. 1999, 44(3), 145-156. <http://dx.doi.org/10.1179/sic.1999.44.3.145>
- Clarke, B. L. a J. Ashurst. *Stone preservation experiments*. Watford: BRE; London: Directorate of Ancient Monuments and Special Services, 1972.
- Denninger, E. Die chemischen Vorgänge bei der Festigung von Wandmalereien mit sogenannten Kalksinterwasser. *Maltechnik*. 1958, 64, 67-69.
- Giordani, M. a D. Beruto. Effect of vaporization rate on calcium carbonate nucleation from hydrogen carbonate aqueous solution. *Journal of Crystal Growth*. 1987, 84(4), 679-682. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-0248\(87\)90060-1](http://dx.doi.org/10.1016/0022-0248(87)90060-1)
- Hošek, J. a J. Muk. *Omítky historických staveb*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1989. ISBN 80-04-23349-X.
- Kotlík, P. Zpevňovače – konsolidanty kamene, omítek apod. In: *Průzkum zpevňovačů minerálních materiálů*. Praha: STOP, 2006, 2-4.
- Lewis, M. a G. Walter. *Thinking Chemistry*. Oxford: Oxford University Press, 1986, 295.
- Losos, L. Omítky v památkové praxi (dokončení). *Obnova památek*. 1970, 4, 137-144.
- Mora, L., P. Mora, P. a J. Philippot. *La conservation des peintures murales*. Bologna: Compositori, 1977, 259-260.
- Oilier, C. *Weathering*. London: Longman, 1984.
- Peterson, S. Lime water consolidation. In: *Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings*. Roma: International Centre for the Study of the Preservation and the Restoration of Cultural Property, 1982, 53-59.
- Petr, F. Několik kapitol z technologie conservačních prací. *Zprávy památkové péče*. 1953, 13(1), 13-19.
- Quayle, T. The Case Against Lime Water (or, the futility of consolidating stone with calcium hydroxide). *Conservation News (United Kingdom Institute for Conservation of Historic and Artistic Works)*. 1996, 59, 68-70.
- SLC. *Notes on use of lime water and Calcium Bi-carbonate*, September 2006.
- Štorm, B. *Základy péče o stavební památky*, Praha: SÚPPOP, 1965, 39.

# Zpevnění vápenných stavebních materiálů vápennou nanodisperzí

Zuzana Slížková, Dita Frankeová

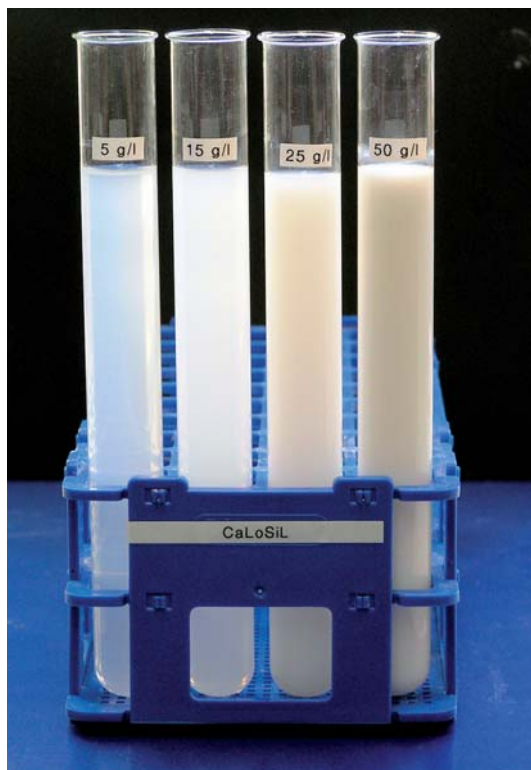
V současné době dochází k rozvoji nanotechnologií a nanomateriálů ve všech odvětvích lidské činnosti. Tyto postupy nacházejí uplatnění i v oborech, jako je restaurování a oprava historických památek. Příkladem je konsolidace degradovaného vápence nebo vápenné omítky pomocí nanočástic hydroxidu vápenatého rozptýlených v alkoholu. Ačkoli je tato technologie relativně nová a první komerční zpevňující prostředek na bázi vápenných nanočástic je dostupný od roku 2006 (CaLoSiL®), spektrum nanovápenných disperzí pro konsolidaci degradovaných stavebních vápenných materiálů se rozrůstá, a s tím i zkušenosti s jejich účinky (Ziegenbalg 2008; Drdácký et al. 2009; López-Arce et al. 2010). Nanodisperze hydroxidu vápenatého v různých alkoholech jsou v ÚTAM AV ČR testovány od roku 2007. Nejprve byl zkoušen vliv nanodisperzí na mechanické vlastnosti vápenné omítky ve studii zaměřené na účinnost vápenné vody ve srovnání s jinými zpevňujícími prostředky (Drdácký a Slížková 2008). V dalších letech byl zkoumán vliv nanodisperzí vápna na vlastnosti vybraných druhů malt a kamene. I v tomto výzkumu byly prioritně sledovány mechanické vlastnosti ošetřovaného materiálu, z dalších materiálových vlastností byly testovány zejména pórovitost a nasáklivost v závislosti na intenzitě ošetření substrátu (Slížková et al. 2010; Slížková 2011; Moreau et al. 2010).

## Vlastnosti nanodisperze CaLoSiL ve srovnání s dalšími zpevňovači

Pro konsolidaci vybraných substrátů byly v ÚTAM zkoušeny produkty CaLoSiL E 15, CaLoSiL E 25, CaLoSiL E 50 a CaLoSiL IP 25. Jedná se o disperze hydroxidu vápenatého o velikosti částic 50–200 nm v ethanolu (E) nebo isopropylalkoholu (IP). Koncentrace hydroxidu vápenatého v testovaných produktech je v rozmezí 15 až 50 g/l (**obr. 157**).

Z hlediska svého chemického složení se nanodisperze hydroxidu vápenatého nabízejí zejména pro aplikaci na materiály, jejichž složkou je uhličitán vápenatý: opuku, vápence, vápenné malty. Tyto stavební materiály, pokud vyžadují strukturální zpevnění, jsou v ČR impregnovány především vápennou vodou (historické vápenné omítky) nebo estery kyseliny křemičité.

Zkoumané produkty CaLoSiL i vápenná voda obsahují stejnou účinnou látku – hydroxid vápenatý. Zatímco ve vápenné vodě je velikost iontu vápníku malá, cca 0,1 nm (d'Armada a Hirst 2011), částice hydroxidu vápenatého ve zpevňujících prostředcích CaLoSiL jsou podstatně větší (50–200 nm). Tato vlastnost omezuje použití vápenné disperze na zpevňování materiálů s dostatečně velkým průměrem otevřených pórů. Množství hydroxidu vápenatého



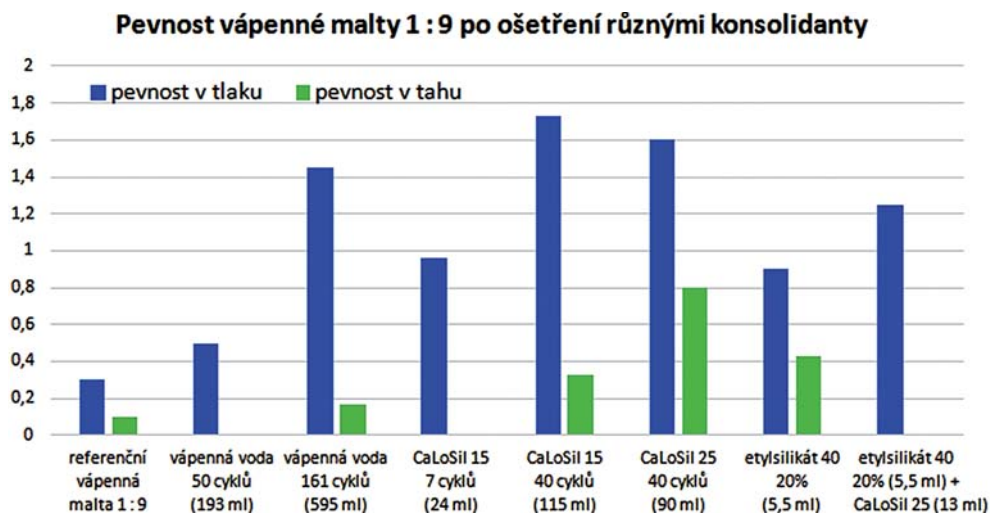
**OBRAZEK 157:** *Vzhled produktů CaLoSiL (nanodisperze hydroxidu vápenatého v ethanolu) při různých koncentracích účinné látky (Foto G. Ziegenbalg)*

ve vápenné vodě je velmi malé (1,7 g/l při 20 °C) a v případech, kdy je potřeba vnést do zpevňovaného materiálu větší množství vápna, produkty CaloSiL nabízejí více koncentrované varianty (5 až 50 g/l). Výhodou vyšší koncentrace hydroxidu vápenatého v CaLoSiLech je především možnost zkrácení doby trvání zpevňovacího procesu ve srovnání s vápennou vodou. K urychlení celkového konsolidačního procesu přispívá i rychlejší vysychání ethanolu nebo isopropylalkoholu ve srovnání s rychlostí vysychání vápenné vody.

Estery kyseliny křemičité (TEOS, Etylsilikát 40) vnášejí do zpevňovaného materiálu na rozdíl od vápenné vody a vápenných nanodisperzí amorfní oxid křemičitý. Množství účinné složky (SiO<sub>2</sub>) v komerčně dostupných produktech na bázi esterů kyseliny křemičité je obvykle 100–500 g/l, tedy mnohem vyšší ve srovnání s uvedenými vápennými prostředky. V praxi bývají organokřemičité prostředky aplikovány na zpevňovaný substrát většinou pouze jednorázově nebo dvojnásobným napuštěním materiálu.

Úspěšnost zpevňovacího procesu ovlivňuje celá řada faktorů. Mezi základní vlastnosti a parametry, které je třeba vzít v úvahu při návrhu technologie zpevňování, patří: chemické a mineralogické složení zpevňovaného materiálu, pevnost materiálu před zpevňováním, velikost a tvar otevřených pórů, pórovitost, velikost iontů, molekuly nebo částice účinné zpevňující látky ve zpevňujícím produktu, chemické složení a koncentrace účinné složky, rychlost





**OBRAZEK 158:** Pevnosti chudé vápenné malty po aplikaci různých konsolidačních prostředků v různých množstvích (objem maltových tělísek pro pevnost v tlaku byl 16 cm<sup>3</sup> a tělíska absorbovala během jedné impregnace 2–4 ml zpevňujícího prostředku)

vysychání a tvrdnutí účinné látky ve zpevňovaném substrátu při konkrétních teplotně vlhkostních podmínkách materiálu a okolního vzduchu (Ferreira Pinto a Delgado Rodrigues 2008). Znalost uvedených parametrů je dobrým základem pro návrh technologie zpevnění – typ zpevňujícího prostředku, koncentrace účinné složky, způsob aplikace konsolidantu, počet opakovaných aplikací v rámci jednoho konsolidačního procesu (Drdáček et al. 2012), způsob ošetřování substrátu po impregnaci. Důležitým nástrojem jsou při studiu chování konsolidačních produktů experimenty na reálných objektech i laboratorní experimenty s využitím modelových substrátů reprezentujících určité typy zpevňovaných materiálů.

### Zpevnění malty s nízkým obsahem vápna nanodisperzemi CaLoSiL

Pro studium efektu CaLoSiLu a dalších konsolidačních prostředků na vlastnosti vápenné malty s nízkým obsahem vápna byla připravena tělíska z malty o složení 1:9 obj. (vápenný hydrát: praný maltový písek). Z chudé čerstvé malty byla vydusána tělíska vhodných tvarů pro zkoušky pevnosti v tlaku a v tahu. Různé konsolidační prostředky byly aplikovány na zkarbonatovanou maltu po půl roce od přípravy vzorků, 2 měsíce po konsolidaci malt byla měřena pevnost zkušebních tělísek o tloušťce 5 mm. Připravená vápenná malta měla pórovitost 32 % a významná část pórů měla průměr kolem 100 μm. V menší míře malta obsahovala i menší póry o průměru 0,1–1 μm. Vlastnosti vápenné malty (rel. vysoká pórovitost tvořená z velké části relativně velkými póry) umožňovaly penetraci nanodisperze CaLoSiL E 15 a IP 25 i ve větším množství (až 40 cyklů). Jeden aplikační cyklus zpevňujícího prostředku se skládal z prosycení celého zkušebního vzorku konsolidantem a následného vyschnutí. Záměrem experimentu bylo porovnat efekt impregnace tohoto typu malty vápennou vodou, dvěma typy vápenné nanodisperze CaLoSiL, esterem kyseliny křemičité a kombinací jednotlivých prostředků. Nárůst pevnosti malty po opakované impregnaci vybranými prostředky je ilustrován na **obrázku 158**.



**OBRAZEK 159:** Změna barvy povrchu maltového tělíska po mnohonásobné aplikaci CaLoSiLu IP 25 (vlevo) ve srovnání s původním vzhledem malty (vpravo)

Z výsledků je zřejmé, že vápenná voda zpevňuje porézní vápennou omítku významněji až po nanesení vysokého počtu aplikačních cyklů (161 cyklů). Konsolidace malty 50 cykly vápenné vody přinesla určité, ale malé zvýšení tlakové pevnosti malty. Prokazatelný zpevňující efekt byl zjištěn u vápenných nanodisperzí CaLoSiL, které byly pro účel srovnání s vápennou vodou aplikovány rovněž ve vysokém počtu cyklů (40 cyklů). Dostatečného zpevnění bylo dosaženo CaLoSiLem E 15 i při menším počtu aplikací (7 cyklů). Díky rychlému schnutí prostředku v laboratorních podmínkách se všech 7 cyklů CaLoSiLu E 15 podařilo aplikovat během jednoho dne. Nejméně pracné (2 cykly) bylo zpevnění malty zředěným esterem kyseliny křemičité (obsah  $\text{SiO}_2$  v produktu cca 80 g/l). Z hlediska času a výše zpevnění se ukázala efektivní i varianta kombinovaného napuštění malty zředěným esterem kyseliny křemičité s následnou aplikací CaLoSiLu IP 25 v několika cyklech, vždy po vyschnutí předchozí dávky konsolidačního prostředku. Vyšší koncentrace účinné látky nevedla vždy k úměrně vyššímu zpevnění. Míru zpevnění ovlivňuje nejen množství vápna ve zpevňujícím prostředku, ale také rozložení prostředku ve zpevňované vrstvě materiálu. Cílem zpevňujícího procesu je rovnoměrné rozložení zpevňující látky v potřebné hloubce konsolidované omítky (malty).

Vysoce intenzivní impregnace malty CaLoSiLem IP 25 (40 cyklů) měla za následek zbělení povrchu maltového tělíska (**obr. 159**).

V další fázi byl studován vliv CaLoSiLu E 25 na zpevnění vápenných omítek s různým obsahem pojiva. Vápenné malty byly připraveny v objemových poměrech pojivo: plnivo 1:4, 1:6 a 1:9. Otevřená pórovitost malt se pohybovala v rozmezí 28 % (1:4) až 32 % (1:9) a s rostoucím podílem plniva se zvyšoval podíl pórů velikosti okolo 100  $\mu\text{m}$ . CaLoSiL E 25 velmi dobře penetroval do všech vzorků malt. Největší zpevňující efekt byl zaznamenán u nejjednodušší malty (1:9), u níž došlo ke zvýšení pevnosti v tlaku po 10 aplikacích na osminásobek hodnoty pevnosti zjištěné u neošetřené malty. Pevnost v tahu za ohybu této malty vzrostla po 10 aplikacích trojnásobně a pórovitost přístupná vodě poklesla z 32 na 28,8 %.

Provedené laboratorní experimenty potvrdily, že přípravky CaLoSiL E 15, E 25 i IP 25 prokazatelně zpevňují omítky s vápenným pojivem, pokud má omítka vhodnou distribuci velikosti pórů. Čím vyšší pórovitost malty a vyšší podíl pórů o průměru nad 10  $\mu\text{m}$ , tím větší

nárůst pevnosti byl dosažen. Použití v restaurátorské praxi musí být vždy přizpůsobeno vlastnostem ošetřovaného materiálu. Optimální způsob konsolidačního procesu konkrétního objektu pomocí vápenné nanodisperze CaLoSiL by měl být navržen na základě posouzení materiálových vlastností zpevňovaného materiálu a na základě výsledků testů na zkušební ploše objektu.

Na základě popsaných a dalších experimentů byl formulován památkový postup „Zpevnění historické vápenné omítky disperzí nanočástic hydroxidu vápenatého v alkoholu“ (Slížková a Frankeová 2015a).

## Zpevnění porézních vápenců nanodisperzemi CaLoSiL

Prostředky CaLoSiL E 15, E 25 a IP 25 byly studovány také jako potencionální zpevňovače kamene. Penetrace prostředků CaLoSiL do „zdravé“ opuky z lomu Přední Kopanina byla neúspěšná. Nepoškozená opuka prostředky CaLoSiL neabsorbovala, protože velikost jejích pórů je velmi malá (0,1  $\mu\text{m}$ ) v poměru k velikosti částic této nanodisperze. Zkoušky na reálném objektu byly provedeny na Hladové zdi v Praze. V tomto případě degradovaná opuka absorbovala prostředek CaLoSiL E 25 sítí jemných prasklin do hloubky 2 cm (po 30 min. napouštění). Systematický výzkum zpevňujícího efektu však nebyl proveden, protože stupeň i projevy poškození opuky byly velmi rozdílné. Vzorky opuky z Hladové zdi navíc obsahovaly vysoké množství vodorozpustných solí (dusičnany, chloridy, sírany a sodné, draselné a vápenné kationty).

Největší soubor laboratorních zkoušek byl proveden na maastrichtském vápenci (**obr. 160**). Tento typ vápence obsahuje póry o průměru cca 48  $\mu\text{m}$  (**tabulka 4**) a kámen tak absorboval i typy CaLoSiLu s vyšší koncentrací (50 g/l) v krátkém čase do značné hloubky (5 cm). Tento vápenc je velmi homogenní s velmi řídkce se objevující vrstevnatostí a obsahuje dobře tříděné částice s velikostí okolo 100  $\mu\text{m}$ , které jsou reprezentovány zejména drcenými schránkami mořských živočichů, a jen vzácně obsahuje částice křemene (Rescic et al. 2010). Vzhledem k nízké pevnosti tohoto kamene byl nárůst pevnosti po impregnaci dobře měřitelný a mohly být provedeny srovnávací zkoušky sledující vliv koncentrace CaLoSiLu, počtu cyklů, typu alkoholu na distribuci prostředku v kameni a změnu fyzikálních vlastností kamene po impregnaci. Byly sledovány účinky CaLoSiLu E 25, E 50 a IP 25 po 2, 4 a 6 cyklech, přičemž 1 cyklus reprezentoval prosycení celého objemu zkušební vzorku kamene (75  $\text{cm}^3$ ) stejnou dávkou prostředku (30 ml).

Experimentální výzkum byl zaměřen na stanovení vlivu tří konsolidačních prostředků na vlastnosti vápence pomocí nedestruktivních metod (porozita, rychlost ultrazvukových vln) i destruktivního testování (tahová pevnost za ohybu, tlaková pevnost). S výjimkou tlakové pevnosti byly klíčové vlastnosti kamene vyhodnoceny také v hloubkovém profilu v různé vzdálenosti od konsolidovaného povrchu.

**TABULKA 4:** Vlastnosti maastrichtského vápence

Kámen	Nasákavost [% hm.]	Absorpční koeficient [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{min}^{-1/2}$ ]	Objemová hmotnost [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	Otevřená pórovitost [% obj.]	Střední velikost pórů [ $\mu\text{m}$ ]
Maastrichtský vápenc	34,4	20,2	1,3	50	48



**OBRÁZEK 160:** Sada zkušebních těles maastrichtského vápence (vlevo) a postup zpeňování jednoho vzorku smáčením povrchu kamene vápennou nanodisperzí pomocí injekční stříkačky (vpravo)

Na základě provedených zkoušek byl vyhodnocen optimální konsolidační postup pro testovanou horninu: rovnoměrné a dostatečné zpevnění bylo dosaženo dvakrát za sebou provedenou aplikací prostředku CaLoSiL E 25. Vyšší počet aplikací měl za následek nadměrný nárůst pevnosti v povrchové vrstvě kamene. Po dvou aplikacích CaLoSiLu E 25 došlo k nárůstu tahové pevnosti za ohybu o 20 % a k nárůstu tlakové pevnosti o 50 % (CaLoSiL E 25). Ošetření vápennou nanodisperzí vedlo k jen velmi mírnému poklesu otevřené pórovitosti kamene (**tabulka 5**), a tím lze předpokládat i mírné omezení jeho nasákavosti. Následkem dvojnásobného prosycení vápence nanodisperzí CaLoSiL E 25 nedošlo ke změně barvy kamene. Takto ošetřené vzorky vykázaly rovnoměrné rozložení pevnosti uvnitř hloubkového profilu a zároveň nízký pokles porozity.

**TABULKA 5:** Výsledky stanovení porozity dostupné pro vodu

Maastrichtský vápence	Pórovitost přístupná vodě (RILEM I/I)	Pokles pórovitosti	
	[ % ]	[ % ] abs.	[ % ] rel.
Neošetřeno	50,3		
Ošetřeno CaLoSiL E 25 – 6 aplikací	47,4	2,9	5,8
Ošetřeno CaLoSiL IP 25 – 6 aplikací	47,4	2,9	5,8

Vedle uvedených laboratorních zkoušek opuky a maastrichtského vápence byly efekty vápenných nanodisperzí hodnoceny také na kutnohorském vápenci, na některých typech litavských vápenců a na umělých kamenech modelujících degradované porézní vápence se sníženou soudržností zrn. Jedním z výsledků tohoto výzkumu je následující památkový postup.

### **Zpevnění bělavého degradovaného porézního vápence suspenzí nanočástic hydroxidu vápenatého v alkoholu (Památkový postup)**

Památkový postup je určen pro využití při restaurování objektů, kde se vyskytuje jako materiál bělavý porézní typ vápence a tento materiál je natolik nesoudržný (málo pevný), že vyžaduje zpevnění. Pro záchranu a zachování objektu kulturního dědictví je v takovém případě nutné provést zásah vedoucí ke zpevnění nesoudržného materiálu a prodloužit tak životnost poškozeného materiálu. Obvyklým postupem zpevnění vápence je jeho napuštění zpevňujícím

(konsolidačním) kapalným materiálem, který obsahuje vhodné budoucí pojivo nesoudržných složek kamene. Toto pojivo v kameni po odpaření rozpouštědla působením vzduchu a vlhkostí ztvrdne a zároveň propojí částice vápence. Je žádoucí, aby zpevňující materiál (konsolidant) měl takové vlastnosti (viskozitu, velikost částic, povrchové napětí) umožňující jeho průnik do kamene do hloubky několika milimetrů až centimetrů, což je nejčastější tloušťka materiálu, vyžadující zpevnění. Zároveň je důležité, aby nové pojivo bylo jak funkční (způsobilo zvýšení pevnosti ošetřeného vápence), tak přijatelné i z jiných hledisek (mělo co nejpodobnější chemické a fyzikální vlastnosti původnímu pojivu, nezpůsobovalo přímo či nepřímo poškození ošetřené horniny a možné komplikace v kontextu péče a zachování objektu).

Vápence, které jsou popsáním způsobem poškozeny (degradovány) ve své povrchové vrstvě a které mají vhodnou velikost pórů, tzn., že obsahují póry nebo praskliny s průměrem větším než jeden mikrometr, je možné zpevnit zpevňujícím (konsolidačním) prostředkem, který obsahuje hydroxid vápenatý ve formě částic o velikosti stovek nanometrů. Částice hydroxidu vápenatého jsou v konsolidačním prostředí dispergovány (rozptýleny) v ethanolu. Výsledná suspenze (nebo též disperze, koloidní roztok, sol) nanočástic hydroxidu vápenatého v ethanolu může mít různou koncentraci a může se aplikovat do poškozeného vápence jednou nebo vícekrát v různém množství, podle koncentrace prostředku a podle vlastností kamene (absorpční kapacita kamene je odvozena od pórovitosti kamene). Komerčních konsolidačních prostředků obsahujících nanočástice hydroxidu vápenatého v alkoholu je více, navržený památkový postup využívá konsolidačního prostředku CaLoSil® E25 (výrobce fa IBZ-Freiberg, Ingenieurbüro Dr. Ziegenbalg GbR). Tento prostředek obsahuje vápenné částice velikosti 50× až 100× menší, než je velikost částic hydroxidu vápenatého připraveného tradičním způsobem (hašením páleného vápna). Koncentrace hydroxidu vápenatého je 25 g v 1 l prostředku CaLoSil E 25. Pro zpevnění vápence je možné využít i méně koncentrovaný typ prostředku, CaLoSil E 15, který obsahuje 15 g hydroxidu vápenatého v 1 l.

### ***Aplikační podmínky***

Památkový postup bude užíván pro záchranu a zachování objektů kulturního dědictví v případech, kdy materiálem objektu je bělavý porézni vápenc a soudržnost (pevnost) vápence je nedostatečná, takže dochází k postupnému ubývání materiálu, a tím ke ztrátě hodnot objektu kulturního dědictví. Zpevnění degradovaného porézniho vápence disperzí nanočástic hydroxidu vápenatého v ethanolu je možné v případech, kdy vápenc má vhodnou distribuci velikosti pórů umožňující penetraci tohoto konsolidačního prostředku (tzn., že vápenc obsahuje póry nebo praskliny s průměrem větším než jeden mikrometr).

### ***Zjištění materiálových vlastností vápence***

Pro ověření vhodnosti použití disperze nanočástic hydroxidu vápenatého pro zpevnění konkrétního degradovaného vápence a pro posouzení účinku provedeného zpevnění se provedou následující zkoušky za účelem zjištění materiálových vlastností vápence, pokud nejsou dostupné v dokumentaci k objektu kulturního dědictví nebo z jiných zdrojů:

- a) Stanovení otevřené pórovitosti a velikost pórů (např. rtuťovou porozimetrií, vyšetřením nábrusu nebo výbrusu mikroskopicky, pórovitost hydrostatickým vážením po nasáknutí vodou). Pokud vápenc ve vrstvě, která má být ošetřena, obsahuje dostatečně velké póry nebo praskliny (s průměrem větším než jeden mikrometr, ideálně s průměrem větším než

10 mikrometrů), je použití postupu zpevnění s využitím disperzí nanočástic hydroxidu vápenatého v ethanolu vhodné. Naopak malý nebo žádný obsah pórů nebo prasklin vhodné velikosti v povrchové vrstvě vápence je signálem, že disperze nanočástic hydroxidu vápenatého není vhodným konsolidačním prostředkem pro daný materiál. Případná aplikace by pravděpodobně vedla k zadržení částic na povrchu materiálu a vytvoření vápenné vrstvy podobné vápennému nátěru.

Stanovení hodnoty otevřené pórovitosti slouží pro vyhodnocení efektu zpevnění. Lze zpevňovat i vápence s nízkou pórovitostí, pokud je velikost pórů dostatečná pro penetraci prostředku.

- b) Stanovení rychlosti absorpce vody povrchem degradovaného kamene (např. Karstenovou trubicí nebo měřením času potřebného pro vsáknutí určitého objemu vody aplikované na povrch vápence). Stanovení hodnoty rychlosti absorpce vody před konsolidací slouží pro vyhodnocení efektu zpevnění. Stanovení hodnoty rychlosti absorpce konsolidačního prostředku (vápenné nanosuspenze) povrchem vápence slouží k ověření penetračních schopností prostředku do vápence.
- c) Stanovení povrchové soudržnosti kamene (tzv. peeling testem). Slouží k vyhodnocení efektu zpevnění.
- d) Popis barvy (hodnocení pouhým okem nebo s využitím spektrofotometru). Slouží k vyhodnocení efektu zpevnění.
- e) Stanovení obsahu vlhkosti a zasolení kamene. Materiál vhodný pro aplikaci suspenze nanočástic hydroxidu vápenatého by neměl před aplikací konsolidantu obsahovat zvýšený stupeň vlhkosti a zasolení, protože zatím není dostatečně prozkoumán vliv vody a vodorozpustných solí na výsledek konsolidace kamene suspenzí vápenných nanočástic. Vlhkost kamene před konsolidací by měla být v rozsahu rovnovážné vlhkosti odpovídající relativní vlhkosti vzduchu do 75 %. Z důvodu nedostatku zkušeností se nedoporučuje aplikace nanosuspenze na zasolený kámen (se zvýšeným obsahem vodorozpustných solí dle klasifikace v normě ČSN P 73 0610), přestože v literatuře (Daehne a Herm 2013) je pozitivně hodnocena konsolidace sádrové malty i zasolené románské fresky vápennou nanosuspenzí CaLoSiL E 25.

Zatímco některé zkoušky se provádí přímo na povrchu objektu, některá uvedená laboratorní vyšetření jsou vázaná na možnost odebrat z objektu malé vzorky kamene.

Na základě provedených zkoušek rychlosti absorpce vody a konsolidantu povrchem vápence jsou zmapována místa s různou nasákavostí a optimalizováno množství a koncentrace prostředku pro aplikaci. Zkoušení a hodnocení materiálových vlastností ve vztahu k plánované konsolidaci je vhodné konzultovat s odborníkem (specialistou v oboru konzervačních technologií a vlastností historických stavebních materiálů).

### ***Aplikace suspenze nanočástic hydroxidu vápenatého pro zpevnění degradovaného vápence***

Konsolidační prostředek CaLoSil E 25 se aplikuje při vhodných klimatických podmínkách (teplota vzduchu 10–25 °C). Aplikace konsolidantu je nejvhodnější pomalým napouštěním povrchu pomocí stříčky nebo injekční stříkačky, v případech silněji degradovaného materiálu v několika cyklech. Každá další aplikace může být realizovaná po odpaření ethanolu

z předchozí aplikace. Zpevňovací prostředek je aplikován do nasycení daného místa tak, aby nestékal a nezůstával nevsáklý na povrchu objektu, v záhybech apod. Případný přebytečný, nevsáklý kapalný konsolidant je odsáván buničinou nebo jiným savým materiálem. V průběhu konsolidace je sledována spotřeba konsolidantu na jednotlivých ošetřovaných plochách a vyjádřena v litrech na metr čtvereční ošetřeného povrchu. Po každém dni, ve kterém proběhlo zpevnění, je vhodné ošetřený povrch překrýt polyetylenovou fólií, aby se zpomalil odpar rozpouštědla, zamezilo se zpětné migraci vápenných částic k povrchu a vzniku bílého zákalu uhličitánu vápenatého.

Po napuštění dochází do několika hodin k odpaření ethanolu a dále v přítomnosti oxidu uhličitého ve vzduchu ke karbonataci vneseného hydroxidu vápenatého na uhličitán vápenatý. Ten má funkci pojiva v poškozené hornině. Nanočástice hydroxidu vápenatého obsažené v suspenzi karbonatují na základě provedených experimentů rychle. Karbonatace je ukončena cca po několika dnech až týdnech, v závislosti na konkrétních podmínkách. Reakce probíhá podle rovnice (15):



### ***Kontrola barvy povrchu vápence po konsolidaci***

Negativním doprovodným jevem konsolidace vápennými suspenzemi může být vznik bílého povlaku na povrchu zpevňovaného materiálu. Jedná se o hydroxid vápenatý (po karbonataci o uhličitán vápenatý), nahromaděný na napuštěném povrchu. Vznik bílého zákalu souvisí také s rychlostí odpařování ethanolu. Rychlé odpaření rozpouštědla může způsobit zpětnou migraci nanočástic na povrch materiálu, např. v případě vysoké teploty vzduchu, nízké relativní vzdušné vlhkosti, větru. Vzniku bílého zákalu lze zamezit zpomalením odparu rozpouštědla pomocí zakrývání ošetřeného povrchu neprodyšnou fólií nebo smočením ošetřeného povrchu kamene vodou po každém cyklu napouštění. Před dalšími napouštěcími cykly by však měl být povrch kamene opět vyschlý. Dále je nutné aplikovat konsolidant od nižší koncentrace směrem k vyšší (také v případě horší savosti aplikovat prostředek s nižší koncentrací, CaLoSiL E 15) a odstranit případné přebytky konsolidantu na povrchu kamene pomocí vhodného savého materiálu.

### ***Hodnocení efektu zpevnění***

S určitým časovým odstupem (týden a více) je vhodné vyhodnotit efekt zpevnění provedením následujících zkoušek materiálových vlastností a porovnáním hodnot sledovaných parametrů před a po konsolidaci na stejném nebo podobném místě, a pokud je to možné, také porovnáním parametrů konsolidovaného a „zdravého“ (nedegradovaného) kamene (např. na čerstvé lomové ploše nebo na vzorku odebraném z nepoškozeného místa na objektu). Výsledkem konsolidace by měl být návrat k původním materiálovým vlastnostem. Výsledky zpevnění jsou pozitivně hodnoceny, pokud došlo k prokazatelnému zvýšení soudržnosti vápence (lze hodnotit např. peeling testem, kdy odtržené množství kamene po konsolidaci je nižší než před konsolidací na přibližně stejném místě, případně rovno nebo nižší, než je odtržené množství „zdravého“ kamene). Peeling test není podpořen normou, ale doporučený standardizovaný postup byl opakován v řadě článků a je výsledkem výzkumu (Drdácový et al. 2012).

Nedestruktivně je možné hodnotit změnu rychlosti vsakování vody do povrchu vápence s využitím Karstenovy trubice nebo mikrotrubice pro přesné zjištění počáteční rychlosti vsakování vody. Měření se provádí před ošetřením, po ošetření a srovnává s referenční hodnotou zjištěnou na nedegradovaném místě kamene. Rychlost vsakování vody by měla po konsolidaci klesnout, zjištěná hodnota koeficientu kapilární absorpce by však po konsolidaci neměla být nižší o více než 50 % ve srovnání s hodnotou zjištěnou na referenční ploše nedegradovaného nebo dobře zachovaného kamene. Obdobně se doporučuje posoudit změnu pórovitosti kamene v ošetřené vrstvě a porovnat ji se stavem před zásahem a referenční hodnotou zdravého kamene. Po konsolidaci obvykle dochází ke snížení otevřené pórovitosti ve srovnání se stavem před konsolidací, ale ve srovnání se stavem zdravého kamene by hodnota otevřené pórovitosti ošetřeného kamene měla být obdobná (s mírou odchylky podle homogenity kamene 10–30 % rel.). Otevřenou pórovitost lze kontrolovat obrazovou analýzou mikroskopického snímku nábrusu (příčného řezu) z odebraného vzorku nebo ji změřit na odebraném vzorku pomocí rtuťové porozimetrie, ev. tzv. hydrostatickým vážením (vážení suchého vzorku a mokrého na vzduchu a pod vodou).

Barva povrchu kamene po konsolidaci se zjišťuje stejným způsobem jako před zásahem: pouhým okem nebo s využitím spektrofotometru. Konsolidace kamene suspenzí vápenných nanočástic by neměla vést ke změně barvy kamene viditelné okem, pokud pro konkrétní případ není pracovníky památkové péče stanoveno jinak.

Aplikovaná suspenze nanočástic hydroxidu vápenatého v alkoholu po svém vyschnutí a vytvrdnutí (odpaření alkoholu a karbonatací hydroxidu) nebrání aplikaci dalších materiálů včetně materiálů na vodné bázi nanášených v rámci dokončení restaurátorského procesu. Průběh zpevňování je dokumentován, jsou zaznamenána data o koncentraci prostředku, objemu naneseného prostředku na jednotku ošetřené plochy, počet aplikací, celkové množství aplikovaného prostředku, rozsah ošetřené plochy, teplota a vlhkost materiálu a ovzduší v průběhu procesu. Tyto informace jsou součástí restaurátorské zprávy a slouží pro dlouhodobé hodnocení efektů provedené konsolidace.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI DF11P010-VV012 „Nové materiály a technologie pro konzervaci povrchů památkových objektů a preventivní památkovou péči“.

## Použitá literatura

- d' Armada, P. a Hirst E. *Appraisal of nano-lime for consolidation of plaster and medieval wall painting*. STONECORE workshop, Peterborough, 2011, June 7.- 8.
- Dachne, A. a C. Herm. Calcium hydroxide nanosols for the consolidation of porous building materials - results from EU-STONECORE. *Heritage Science*. 2013, 1(11).  
<http://dx.doi.org/10.1186/2050-7445-1-11>
- Drdáček, M., J. Lesák, S. Rescic, Z. Slížková, P. Tiano a J. Valach. Standardization of peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic stone surfaces. *Materials and Structures*. 2012, 45(4), 505-520.  
<http://dx.doi.org/10.1617/s11527-011-9778-x>



- Drdácký, M. a Z. Slížková. Calcium hydroxide based consolidation of lime mortars and stone. In: J. Delgado-Rodrigues, J. M. Mimoso (eds.). *Proceedings of the International symposium stone consolidation in cultural heritage*. Lisbon: LNEC, 2008, 299-308. ISBN 978-972-49-2135-8.
- Drdácký, M. a Z. Slížková. Lime water consolidation effects on poor lime mortars. *APT Bulletin*. 2012, 43(1), 31-36.
- Drdácký, M., Z. Slížková, a G. Ziegenbalg. A nano approach to consolidation of degraded historic lime mortars. *Journal of Nano Research*. 2009, 8, 13-22.  
<http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/JNanoR.8.13>
- Ferreira Pinto, A. P. a J. Delgado Rodrigues. Stone consolidation: the role of treatment procedures. *Journal of Culture Heritage*. 2008, 9(1), 38-53.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2007.06.004>
- Hansen, E., E. Doehne, J. Fidler, J. Larson, B. Martin, M. Matteini, C. Rodriguez-Navarro, E. Sebastian Pardo, C. Price, A. de Tagle, J. M. Teutonico a N. Weiss. A review of selected inorganic consolidants and protective treatments for porous calcareous materials. *Studies in Conservation*. 2003, 48(Supp.1), 13-25.  
<http://dx.doi.org/10.1179/sic.2003.48.Supplement-1.13>
- López-Arce, P., L. S. Gomez-Villalba, L. Pinho, M. E. Fernández-Valle, M. Álvarez de Buergo a R. Fort. Influence of porosity and relative humidity on consolidation of dolostone with calcium hydroxide nanoparticles: effectiveness assessment with non-destructive techniques. *Materials Characterization*. 2010, 61(2), 168-184.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2009.11.007>
- Moreau C., Z. Slížková a M. Drdácký. *Consolidation of pure lime mortars with nanoparticles of calcium hydroxide*. In: Válek, J., C. Groot a J. J. Hughes. *2nd Historic Mortars Conference and RILEM TC 203-RHM Final workshop: HMC2010*. Bagneux: RILEM Publications, 2010. ISBN 978-2-35158-112-4.
- Rathouský, J. Nanovápno pro konsolidaci poréznych materiálů: principy, mechanismy. *Zprávodaj STOP: časopis společnosti pro technologie ochrany památek*. 2012, 14(3), 38-46. ISSN 1212-4168.
- Rescic, S., F. Fratini a P. Tiano. On-site evaluation of the mechanical properties of Maastricht limestone and their relationship with the physical characteristics. In: Smith, B. J., M. Gomez-Heras, H. Viles a J. Cassar (eds.). *Limestone in the built environment: present-day challenges for the preservation of the past*. London: Geological Society, Special publication 331, 2010, 203-208. <http://dx.doi.org/10.1144/SP331.18>
- RILEM Commission 25-PEM, Tentative Recommendations. *Materials and Structures*. 1980, 13(6), 461-465.
- Slížková Z. *Effects of CaLoSiL impregnation on consolidation of selected porous building materials*. STONECORE workshop, Peterborough, 2011, June 7.- 8.
- Slížková, Z., M. Drdácký, C. Moreau, D. Frankeová a L. Nosál. Consolidation of porous limestone with suspensions of calcium hydroxide nano-particles in alcohols. In: Ziegenbalg, G. (ed.). *Book of Abstracts from the International Conference Recent Progress in the Consolidation of Calcareous materials*. Freiberg: Gerald Ziegenbalg, 2010.
- Slížková Z. a D. Frankeová. Consolidation of porous limestone with nanolime laboratory study. In: *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. New York: Columbia University, 2012.  
<http://iscs.icomos.org/pdf-files/NewYorkConf/slizfran.pdf>

- Slížková, Z. a D. Frankeová. *Zpevnění bělavého degradovaného porézního vápence suspenzí nanočástic hydroxidu vápenatého v alkoholu*. Památkový postup. Ministerstvo kultury ČR, Osvědčení č. 4, 2015.
- Slížková, Z. a D. Frankeová. *Zpevnění historické vápenné omítky disperzí nanočástic hydroxidu vápenatého v alkoholu*. Památkový postup. Ministerstvo kultury ČR, Osvědčení č. 5, 2015.
- Tabasso, L. M. a S. Simon. Testing methods and criteria for the selection/evaluation of products for the conservation of porous building materials. *Studies in Conservation*. 2006, 51(Supp.1), 67-82. <http://dx.doi.org/10.1179/sic.2006.51.Supplement-1.67>
- Ziegenbalg, G. Colloidal calcium hydroxide – a new material for consolidation and conservation of carbonatic stones. In: Lukaszewicz, J. a P. Niemcewicz (eds.). *Proceedings of the 11th International Congress on deterioration and conservation of stone*. Torun: Nicolaus Copernicus University Press, 2008, 1109-1115.

# Vápenná malta se zvýšenou vnitřní hydrofobicitou

**Cristiana Lara Nunes, Zuzana Slížková**

Jednou z častých příčin poruch malt a omítek na bázi vzdušného vápna je nadměrný přísun vody do jejich mikrostruktury (například vztláním vody z podloží). V souvislosti se zavlhčením podléhají malty v našich klimatických podmínkách nejčastěji dvěma degradačním jevům. První je spojen se změnou fáze vody z kapalně na pevnou při mrznutí. To má za následek nárůst objemu vody a zvýšení pórového tlaku, což může vést ke vzniku trhlin ve vlhké maltě nebo omítce. Druhý degradační proces je spojen s přísunem cizorodých látek (solí) rozpuštěných ve vodě, které mohou krystalizovat a tvořit výkvěty v povrchové vrstvě malty nebo omítky. Kromě negativních dopadů na vzhled omítky má krystalizace a rekrystalizace solí za následek zvýšení vnitřních napětí v maltě či omítce, což podobně jako v případě mrznutí může vést ke vzniku trhlin. Oba zmíněné jevy mají přímý negativní vliv na trvanlivost vápenných omítek a malt.

Pomocí vhodné hydrofobní přísady je možné ovlivnit smáčivost malty, a tak snížit její nasákavost vodou. Snížením nasákavosti lze úspěšně zvýšit jak odolnost malty či omítky proti působení mrazu, tak proti poškození solemi. Je to jedna z cest, jak zlepšit trvanlivost vápenné malty. První zaznamenané použití vápenných malt s přísadou lněného oleje se datuje až do dob Vitruvia (Maciel 1999). Nedávné zahraniční studie vlastností vnitřně hydrofobních vápenných malt se zaměřily na vliv aniontových tenzidů (povrchově aktivních látek) ve funkci hydrofobní přísady, šlo o stearan vápenatý, stearan zinečnatý, oleát sodný (Falchi et al. 2013; Izaguirre et al. 2009; Zhu et al. 2013), a dále na vliv přísady rostlinných olejů (Čechová et al. 2010; Ventolà et al. 2011). Na historickou technologii úpravy vápenné malty olejem a na nedávné publikované výsledky navázal výzkum provedený v ÚTAM v letech 2011–2015. Cílem bylo připravit maltu obsahující křemenný písek, vápenné nebo vápenopucolánové pojivo a přísadu vhodně upravující pórovou strukturu zatvrdlé malty a její smáčivost. Výsledná malta v zatvrdlém stavu měla mít vyšší odolnost vůči cyklům mrznutí a tání, krystalizaci a rozpouštění solí (především zimní posypové soli NaCl) ve srovnání s maltou bez přísady. Řešitelé se zaměřili zejména na zjištění optimálního množství lněného oleje a správnou přípravu čerstvé maltové směsi s olejem, aby byla olejová složka rovnoměrně rozmíchána v maltě. Vedle surového lněného oleje byly sledovány efekty jiných hydrofobních přísad: lněné fermeže (tepelně upraveného oleje) a syntetického hydrofobního prostředku na bázi silanu/siloxanu. V další části výzkumu byl sledován vliv tenzidů na vlastnosti vápenné a vápenopucolánové malty: byly sledovány vlastnosti malt s přísadou laurylsulfátu sodného nebo oleátu sodného. Současně s parametry ovlivňujícími přímo trvanlivost malty nebo omítky byly sledovány vlastnosti důležité pro transport kapalně vlhkosti a vodní páry porézním systémem malty nebo omítky (kapilární nasákavost vodou, rychlost

vysychání, propustnost pro vodní páry). Dále bylo zjištěno, jak hydrofobní přísada ovlivnila mechanické vlastnosti malty, zejména její pevnost v tahu za ohybu a v tlaku. Zhodnocení komplexních vlastností navržených malt umožnilo posoudit a navrhnout vhodné aplikace studovaných malt v oblasti oprav historických staveb.

## Malty s přísadami lněného oleje nebo fermeže či alkylalkoxysilanu

Zkušební malty byly připraveny z vápenného hydrátu Čerták třídy CL 90 (vyrobeného ve vápence Čertovy schody, a. s.) a plniva v podobě křemenného písku frakce 0–4 mm se spojitou křivkou zrnitosti, přičemž hmotnostní poměr pojiva a plniva byl 1:3. Kromě čistě vápenných směsí byly také do výzkumu zahrnuty směsi s pucolánovou přísadou, kde byla čtvrtina hmotnosti vápna nahrazena metakaolinem Mefisto L05 (vyrobeného v Českých lupkových závodech, s. r. o.). Přídavek metakaolinu byl zvolen s cílem zvýšit pevnost malty (Grilo et al. 2014), a tak příznivě ovlivnit také odolnost malty proti mrazu (Vejmelková et al. 2012b). Hodnota vodního součinitele při přípravě malt byla navržena tak, aby rozliv čerstvých směsí byl roven  $170 \pm 5$  mm (podle doporučení ČSN EN 1015-3). Byly studovány tři látky ve funkci hydrofobní přísady: lněný olej za studena lisovaný (distribuovaný GRAC, s. r. o.), lněná fermež (distribuovaná firmou Cesta Dřeva) a alkylalkoxysilan/siloxan (prostředek Remmers Funcosil WS). Jejich dávkování do směsi odpovídalo 1,5 % hmotnosti pojiva (1,5 % z hmotnosti vápna nebo z hmotnosti směsi vápna a metakaolinu). Složení malt je uvedené v **tabulce 6**.

**TABULKA 6:** Složení jednotlivých typů malt a obsah vzduchu v čerstvé směsi

Označení	Pojivo	Hydrofobní přísada	Hmotnostní poměr voda / pojivo	Obsah vzduchu v čerstvé směsi [%]
L	vzdušné vápno	-	1,04	2,6 ± 0,1
LO	vzdušné vápno	lněný olej	1,08	5,4 ± 0,2
LBO	vzdušné vápno	lněná fermež	1,10	3,2 ± 0,1
LS	vzdušné vápno	alkylalkoxysilan	1,04	3,5 ± 0,1
LM	vzd. vápno + metakaolin	-	0,96	2,2 ± 0,1
LMO	vzd. vápno + metakaolin	lněný olej	1,02	4,0 ± 0,1
LMBO	vzd. vápno + metakaolin	lněná fermež	1,02	3,5 ± 0,2
LMS	vzd. vápno + metakaolin	alkylalkoxysilan	0,96	3,5 ± 0,3

Příprava směsi probíhala v následujících krocích. Nejprve byly promíchány všechny suché složky plniva a pojiva (kamenivo, vápenný hydrát a v případě vápenopucolánové malty také metakaolin). Poté se odebrala malá část suché směsi (přibližně 5 % objemu) a ta se promíchala v nádobě o vhodné velikosti s hydrofobní přísadou. Do takto připravené směsi bylo v dalších třech krocích přidáno 5 % suché směsi, aby došlo k rovnoměrnému rozmísení hydrofobní přísady. Poté se tato směs přidala zpět do suché směsi a obě složky (suchá směs a směs s rozmíchaným olejem) byly důkladně promíseny. Poté byla přidána voda v uvedeném množství. Připravené čerstvé maltové směsi obsahovaly různé množství vzduchu, které

je zaznamenané v **tabulce 6** (vyhodnoceno dle ČSN EN 1015-7). Z takto připravených směsí byly vyrobeny zkušební trávce s rozměry 40 × 40 × 160 mm, které byly uloženy na 90 dnů v prostředí s řízenou teplotou ( $20 \pm 5$  °C) a relativní vlhkostí ( $60 \pm 10$  %).

Experimentální výzkum byl zaměřen na vyhodnocení fyzikálních vlastností včetně mechanických vlastností. Otevřená pórovitost zatvrdlých malt byla určena pomocí ČSN EN 1936, nasákavost ponořením do vodní lázně po dobu 48 hodin (Teutonico 1988) a mechanické charakteristiky (tahová pevnost za ohybu, tlaková pevnost) podle ČSN EN 1015-11. Distribuce velikosti pórů byla změřena pomocí rtuťové porozimetrie podle doporučení RILEM I.5 a koeficient kapilární absorpce vodou byl na zatvrdlých maltách zjištěn podle metodiky uvedené v ČSN EN 1015-18. Mikrostruktura byla zjišťována pod optickým mikroskopem na tzv. nábrusech připravených ze vzorků malt.

Odolnost proti mrazu byla vyhodnocena podle ČSN 72 2452. Vzorky byly nejprve ponořeny do vody o teplotě  $20 \pm 5$  °C až do dosažení jejich konstantní hmotnosti. Každý zmrazovací cyklus se skládal ze zmrazení po dobu 4 hodin při teplotě  $-20 \pm 5$  °C a minimálně 2 hodin volného tání ve vodě při teplotě  $20 \pm 5$  °C. Po každých 5 zmrazovacích cyklech byl určen hmotnostní úbytek malt. Po ukončení posledního cyklu byly trávce malt vysušeny do konstantní hmotnosti a podrobeny mechanickým zkouškám. Z každé testované sady byly zmrazovány 3 vzorky (označeny Fa).

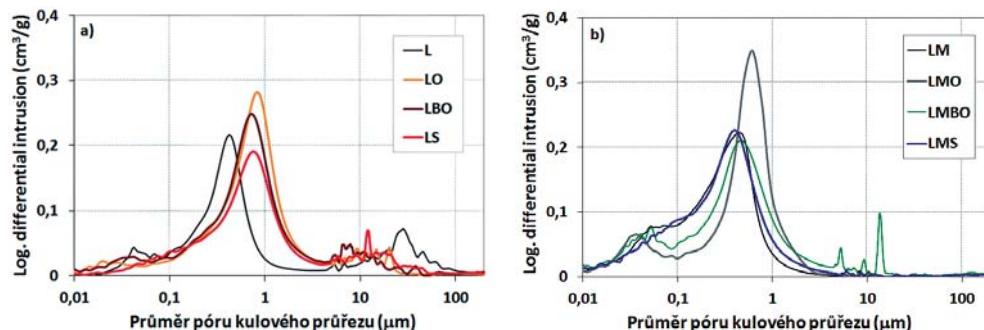
Odolnost proti solím byla vyhodnocena podle ČSN 73 1326. Tři zkušební tělesa (označena Sa) byla cyklicky máčena 8 hodin v 3% roztoku NaCl a následně byla 16 hodin vysušena při teplotě 60 °C. Po každých 5 cyklech byla tělesa zvážena, změřena a byla pořízena fotodokumentace vzhledu a příp. defektů maltových trávců.

Kromě vlivu mrazení a tání a vlivu krystalizace NaCl byl sledován také vliv dlouhodobého namočení malt do vody při laboratorní teplotě. Tyto malty byly označeny Wa, nebyly zmrazované a byly ponořené v destilované vodě po dobu trvání zmrazovacích nebo krystalizačních cyklů na maltách Fa nebo Sa.

**TABULKA 7:** Fyzikální a mechanické parametry jednotlivých typů malt v zatvrdlém stavu ve stáří 3 měsíce

Složení	Pórovitost [%]	Nasákavost 48 h [%]	Tahová pevnost za ohybu [MPa]	Tlaková pevnost [MPa]
vzdušné vápno	32,0 ± 0,2	17,1 ± 0,2	0,54 ± 0,06	1,01 ± 0,03
vzdušné vápno + olej	34,4 ± 0,6	2,3 ± 0,6	1,34 ± 0,07	2,29 ± 0,20
vzdušné vápno + fermež	34,7 ± 0,5	4,1 ± 0,5	0,53 ± 0,04	1,79 ± 0,16
vzdušné vápno + silan	29,4 ± 0,5	15,4 ± 0,1	0,82 ± 0,09	1,41 ± 0,11
vzdušné vápno + metak.	34,4 ± 0,1	21,6 ± 0,9	1,65 ± 0,20	6,71 ± 0,65
vzdušné vápno + metak. + olej	32,4 ± 0,5	6,0 ± 2,6	1,26 ± 0,26	4,02 ± 0,23
vzdušné vápno + metak. + fermež	34,4 ± 0,3	16,1 ± 0,4	0,75 ± 0,14	6,29 ± 0,31
vzdušné vápno + metak. + silan	32,8 ± 0,2	16,6 ± 0,4	0,85 ± 0,17	4,46 ± 0,69

Fyzikální a mechanické vlastnosti malt ve stáří 3 měsíců, které nebyly vystaveny mrazu ani solím, jsou uvedeny v **tabulce 7**. Z výsledků prezentovaných v **tabulkách 6 a 7** je patrné, že všechny tři přísady zvýšily obsah vzduchu v čerstvé maltě a nejvíce z nich surový lněný



**OBRAZEK 161:** Distribuce velikosti pórů: vápenné malty L (vlevo), vápenopucolánové malty LM (vpravo). Značení: malty bez přísady – L nebo LM, s přísadou oleje – LO nebo LMO, fermeže – LBO nebo LMBO, silanu – LS nebo LMS). Pro každou maltu je uvedena reprezentativní křivka z měřených tří vzorků

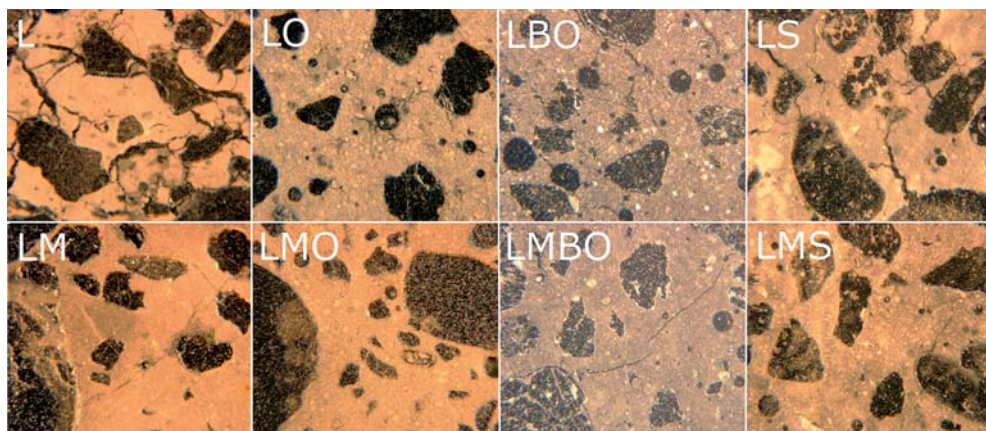
olej. Objem pórů v zatvrdlých maltách se však změnil díky přísadám jen málo (mírné zvýšení pórovitosti bylo zaznamenáno pouze u čistě vápenné malty upravené surovým lněným olejem nebo fermeží. V těchto maltách byl ale také mírně vyšší vodní součinitel při přípravě čerstvých malt, což může být příčinou mírně vyšší pórovitosti). Pórovitost zatvrdlé vápenopucolánové malty se nezvýšila ani vlivem oleje, ani vlivem fermeže, ani vlivem alkylalkoxy-silanu, při dávkování příměsi v množství 1,5 % z hmotnosti pojiva malty.

Z výsledků rtuťové porozimetrie (viz **obrázek 161**) je patrný malý vliv přísad na změnu velikosti pórů v rozsahu 10 nm až 200  $\mu\text{m}$  v zatvrdlé maltě. Použitá metoda neumožňuje hodnotit větší póry. Vápenná malta bez přísady měla ve sledovaném rozsahu nejvíce pórů s průměrem přibližně 0,4  $\mu\text{m}$ . Vlivem přísad se tato velikost pórů mírně zvýšila; průměr se přiblížil 1  $\mu\text{m}$ . Ani u vápenopucolánové malty nejsou změny ve velikosti pórů v měřené oblasti výrazné. Došlo k mírnému zvětšení průměru pórů v oblasti 0,1 až 1  $\mu\text{m}$ . Pouze surový lněný olej vyvolal kromě mírného zvětšení velikosti pórů také nárůst množství pórů v této velikostní oblasti. Nejmenší změny ve struktuře pórů byly zaznamenány v případě silanu, kde naměřená křivka rozložení velikosti pórů byla velmi podobná maltě bez přísady.

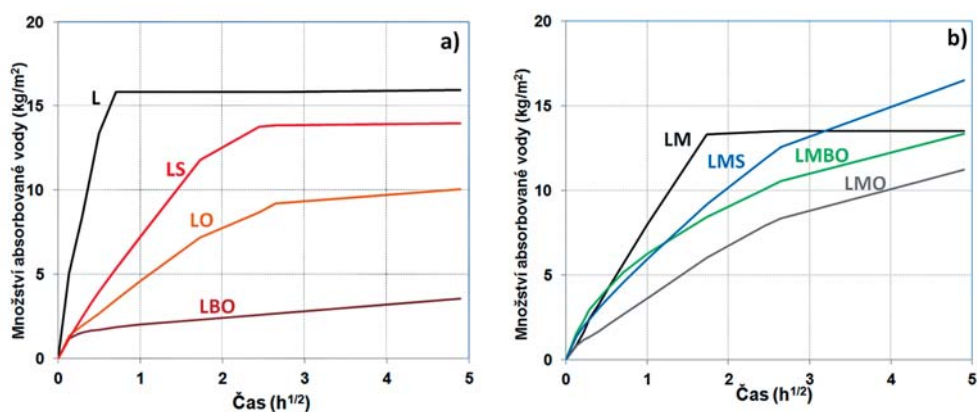
Pod optickým mikroskopem byly vyšetřeny větší póry a trhliny v zatvrdlých maltách (**obr. 162**). Vápenné malty s hydrofobními přísadami měly méně smršťovacích trhlín, a tím pádem lepší mechanické vlastnosti ve srovnání s vápennou maltou bez přísady. Pod mikroskopem byly zaznamenány póry s kulovitým tvarem s průměrem přes 200  $\mu\text{m}$ . Nejlepší strukturu a nejvyšší pevnosti měla vápenná malta s příměsí surového oleje (**tabulka 7**).

Vápenopucolánová malta měla bez přísad ve srovnání s čistě vápennou maltou jen mírně vyšší pórovitost, ale výrazně vyšší pevnosti (1,6 MPa v ohybu a 6,7 MPa v tlaku). S přísadami se ovšem mechanické charakteristiky vápenopucolánové malty pohoršily. Nižší pevnosti vápenopucolánových malt s hydrofobní přísadou nelze přičítat smršťovacím trhlinám. Je zřejmé, že přísady nepříznivě ovlivnily proces tuhnutí a tvrdnutí vápenopucolánové malty v neprospěch vzniku fází přispívajících k vyšší pevnosti zatvrdlé malty.

Všechny přísady byly funkční ve smyslu omezení nasákavosti vápenopucolánové malty, přičemž nejefektivnější byla přísada surového oleje. Silan snížil nasákavost obou typů malt nejméně. Fermež měla lepší efekt u vápenné malty, malý u vápenopucolánové malty. Surový olej snížil nejvíce nasákavost obou typů malt a navíc měl pozitivní vliv i na pevnosti vápenné malty.



**Obrázek 162:** Mikrostruktura vápenných malt (nahore) a vápenopucolánových malt (dole). Výbrus malty pod optickým mikroskopem. Zleva: malta bez přísady, s přísadou oleje (O), fermeže (BO), silanu (S).

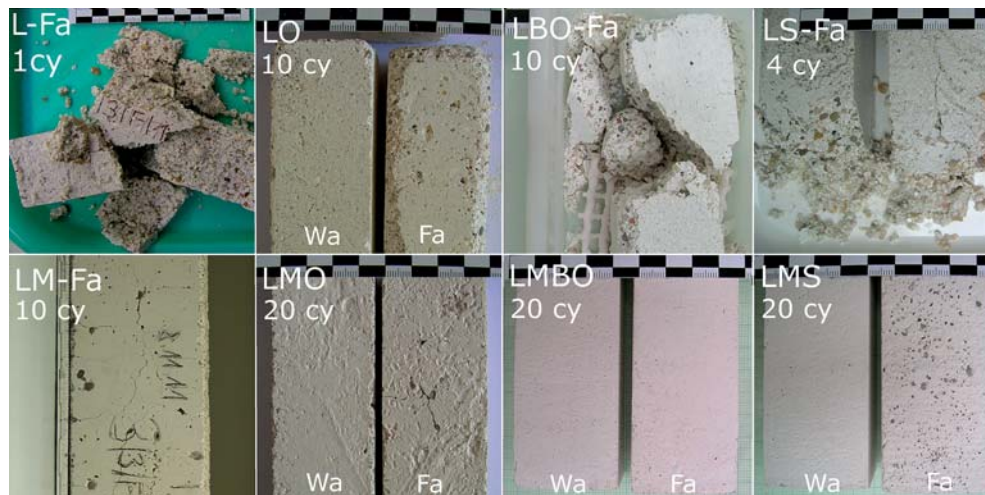


**Obrázek 163:** Křivky kapilární absorpce: vápenné malty L (vlevo), vápenopucolánové malty LM (vpravo). Malta bez přísady (L/LM), s přísadou oleje (LO/LMO), fermeže (LBO/LMBO), silanu (LS/LMS)

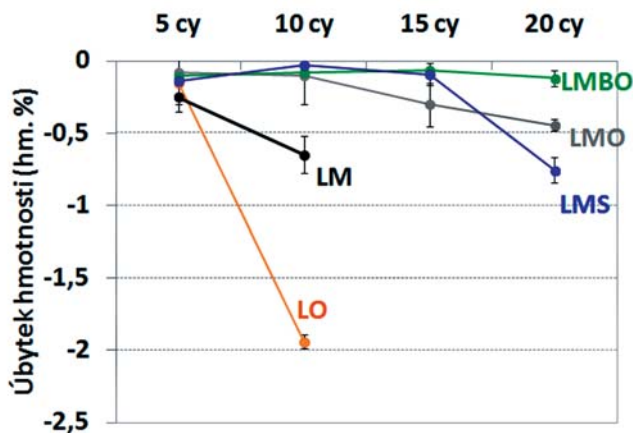
**Obrázek 163** zobrazuje průběh kapilární nasákavosti malt vodou během prvních 24 hodin. V případě vápenné malty byla kapilární nasákavost nejefektivněji snížena pomocí lněné fermeže, zatímco v případě vápenopucolánové malty tomu tak bylo pro lněný olej. Silan měl nejmenší vliv na kapilární nasákavost pro oba typy malt.

Odolnost proti mrazu byla vyhodnocena na základě monitorování vzhledu jednotlivých maltových trámčů, dále na základě úbytku hmotnosti zmrazovaných malt a také vyhodnocením mechanických parametrů po určitém počtu cyklů zmrazení a tání. Na základě publikovaných poznatků (Drdáček 2011) byla měřena ohybová pevnost, která je více citlivá na změny mikrostruktury materiálu.

**Obrázek 164** zobrazuje fotografie vizuálního monitoringu reprezentativních vzorků pro jednotlivé typy malt na konci testování. Vápenná malta bez hydrofobní přísady se rozpadla již během prvního cyklu zmrazování. Vápenná malta se silanem se rozpadla po čtvrtém



OBRÁZEK 164: Vizuální monitoring malt během testování odolnosti proti mrazu

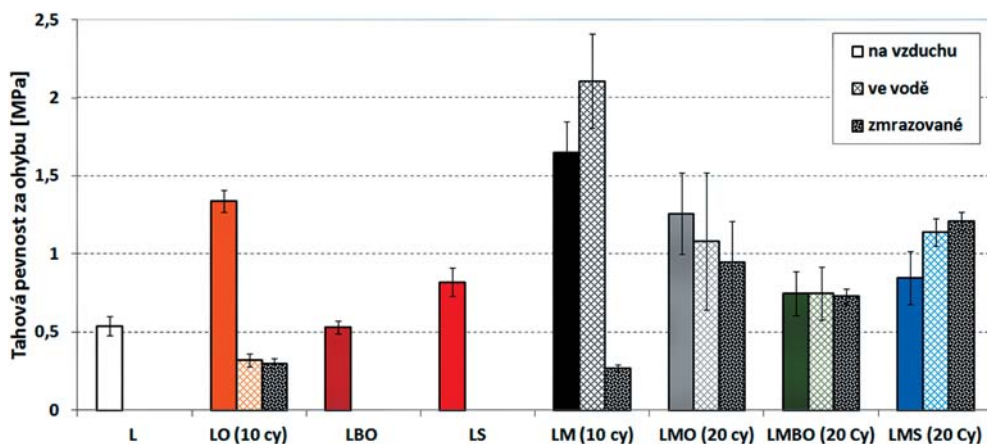


OBRÁZEK 165: Hmotnostní úbytky během testování odolnosti proti mrazu

zmrazovacím cyklu, zatímco malta se lněnou fermeží se rozpadla po desátém zmrazovacím cyklu. Nejlepších výsledků bylo dosaženo s přísadou lněného oleje, kde vzorky po deseti cyklech vykazovaly mírné poškození. V případě vápenopucolánových malt bylo obecně dosaženo lepších výsledků. Zatímco referenční malta bez hydrofobní přísady byla po deseti zmrazovacích cyklech poškozená sítí jemných trhlin, malty se lněným olejem či silanem obsahovaly pouze několik drobných trhlinek a rozpad matrice okolo větších zrn písku po deseti či dvaceti cyklech. V tomto případě bylo nejlepších výsledků dosaženo pro lněnou fermež, kde malta nevykázala po 20 cyklech téměř žádné poruchy.

Obrázek 165 zobrazuje hmotnostní úbytky, které byly měřeny po každých pěti cyklech zmrazení a rozmrazení. Výsledky mechanických zkoušek jsou zobrazeny v obrázku 166. Vápenná malta se lněným olejem vykazovala po deseti zmrazovacích cyklech pokles tahové pevnosti



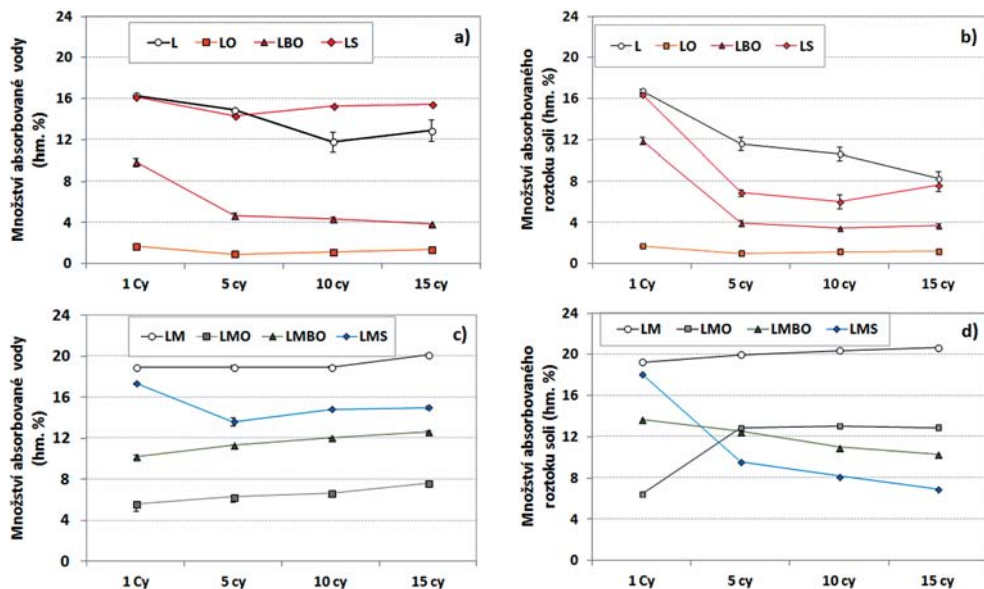


**OBRAZEK 166:** Tahová pevnost za ohybu pro jednotlivé typy malt a jednotlivé hydrofobní přísady ve stejném stáří, ve vysušeném stavu, po různém zatěžování zatvrdlých malt: 1) referenční – uložené v lab. podmínkách (na vzduchu), 2) namočené ve vodě o teplotě 20 °C a 3) zmrazované

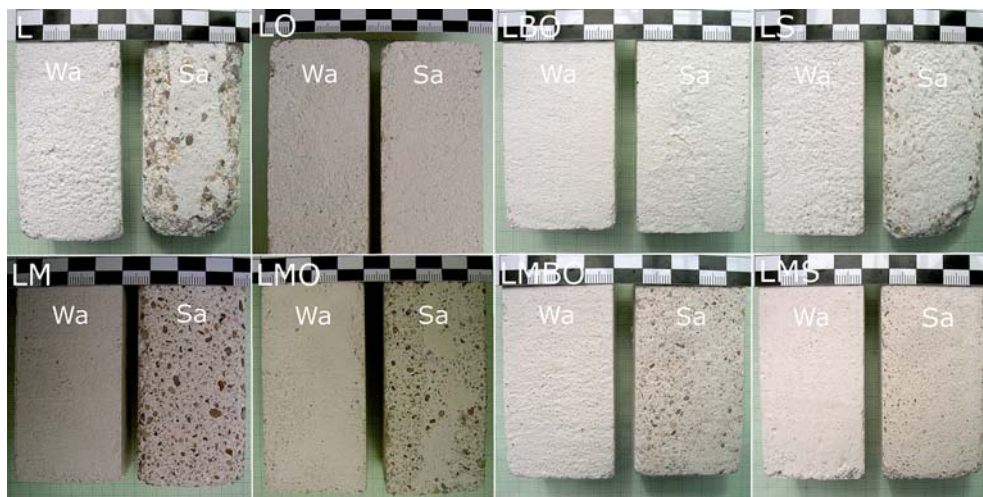
za ohybu o 78 % jak pro vzorky zmrazované, tak pro vzorky udržované pouze ve vodě. Tento výsledek indikuje, že v případě vápenné malty již samotné ponoření do vodní lázně výrazně snižuje pevnost, což lze přisoudit rozpouštění uhličitánu vápenatého a případných zbytků hydroxidu vápenatého v pojivu malty. Vápenné malty bez hydrofobní přísady jsou citlivé na působení mrazu, který způsobuje pokles pevnosti a porušení trhlinami. U čistě vápenné malty pouze přísada surového lněného oleje zlepšila mrazuvzdornost malty natolik, že malta byla soudržná i po 10 cyklech zmrazení a tání, nicméně pevnost zmrazované malty byla výrazně nižší než před mražením.

Vápenopucolánová malta bez hydrofobní přísady vystavená působení mrazu vykázala výrazný pokles pevnosti po 10 cyklech (o 84 %), zatímco vzorky ponořené pouze do vodní lázně vykázaly nárůst pevnosti. Tento nárůst byl pravděpodobně způsobený podporou pucolánové reakce díky přítomnosti vody. Vápenopucolánová malta bez hydrofobní přísady má vyšší pevnost ve srovnání s čistě vápennou maltou, z čehož vyplývá i lepší odolnost vůči mrazovým cyklům. Z hlediska mrazuvzdornosti má však vápenopucolánová malta také nevýhodnou strukturální vlastnost, a to je vyšší zastoupení menších pórů, ve kterých při zmrazovacích cyklech vzniká vyšší tlak. Ačkoli vápenopucolánová malta s přidavkem hydrofobních přísad má tendenci mít nižší tahovou pevnost za ohybu než malta bez přísad (**tabulka 7**), její odolnost proti mrazu je po úpravě hydrofobními přísadami vyšší.

Odolnost proti solím byla vyhodnocena na základě monitorování vzhledu vizuálně a na základě průběžného měření hmotnosti jednotlivých vzorků (hmotnosti nasáklé vody a hmotnosti nasáklého 3% vodného roztoku NaCl) při prvním, pátém, desátém a patnáctém cyklu (**obrázek 167**). Na základě výsledků těchto měření lze konstatovat, že malty se lněným olejem a se lněnou fermeží absorbovaly výrazně nižší objem vody, což je v souladu s výsledky nasákavosti malt při ponoření do vody na 48 hodin. Konfigurace malt L, LBO, LS a LMS absorbovala při pátém cyklu méně solného roztoku než při prvním cyklu. Tento pokles je způsobený snížením schopnosti absorbovat roztok soli z důvodu změny difuzního procesu vlivem již vytvořených krystalů soli. Naopak vápenopucolánová malta s olejem LMO vykázala nárůst absorbovaného množství solného roztoku mezi prvním a pátým cyklem. Tento jev lze vysvětlit tím, že krystaly



**OBRÁZEK 167:** Hmotnost nasáklé vody (vlevo) a solného roztoku (vpravo): vápenné malty (nahore), vápeno-pucolánové malty (dole) při opakovaných zkouškách kapilární nasákavosti malt



**OBRÁZEK 168:** Vizuální hodnocení vzhledu malt během zkoušky odolnosti malty proti krystalizaci NaCl

solí usazené na povrchu pórů redukuje efekt hydrofobní přísady, mění smáčivost stěn pórů malty a usnadňuje pronikání solného roztoku v průběhu dalších cyklů. Projevil se také rozdíl v chování čistě vápenné a vápeno-pucolánové malty. Vápenná malta bez přísad ve vysušeném stavu absorbovala cca 16% hm. vody při prvním nasáknutí a o něco menší množství při 15. nasáknutí vodou (13% hm). Absorpční kapacita pro vodu se tak příliš nezměnila ani po opakovaném nasáknutí a vysušení vody. Absorpční kapacita pro solný roztok ale u vápenné malty postupně

výrazně klesá – zatímco při prvním nasáknutí absorbovala malta 16 % hm. solného roztoku, při 15. nasáknutí již jen poloviční množství – 8 % hm. Vlivem hydrofobních přísad se v různé míře snížila absorpční kapacita vápenné malty pro vodu, nejvíce a podstatně vlivem surového oleje, minimálně vlivem silanu. U olejové přísady je hydrofobní efekt trvanlivý, tzn., že kapacita olejem upravené vápenné malty absorbovat vodu je stejná i při 15. opakovaném nasáknutí vodou (cca 2 % hm.). U přísady fermeže se časem hydrofobní efekt zlepšuje (schopnost fermeží upravené malty absorbovat vodu je při 5. nasáknutí menší a hydrofobní efekt se dále mírně zlepšuje až na nasákavost cca 4 % hm. při 15. cyklu). Pokud jde o schopnost absorbovat opakovaně solný roztok NaCl, jak bylo zmíněno výše, přísady snížily absorbované množství roztoku soli maltou a při 5. cyklu bylo toto množství ještě nižší. Nejvyššího efektu bylo dosaženo přísadou surového oleje, kdy byla naměřena absorpční kapacita upravené vápenné malty pro roztok soli kolem 2 % hm. a tato hodnota byla trvanlivá v rozsahu sledovaných 15 cyklů nasáknutí roztoku do malty. Vápenná malta upravená fermeží měla absorpční schopnost pro roztok soli v prvním cyklu cca 12 % hm., zatímco v 15. cyklu už pouze 4 % hm.

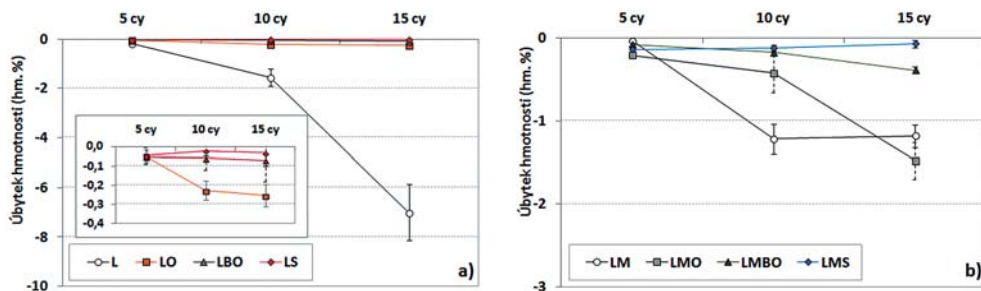
Vápenopucolánová malta bez přísad ve vysušeném stavu absorbovala cca 19 % hm. vody při prvním nasáknutí a absorpční kapacita v dalších cyklech nepatrně vzrostla (na 20 % hm.). Podobné hodnoty byly zjištěny i pro absorpci solného roztoku. Hydrofobní přísady snížily schopnost malty absorbovat solný roztok a při opakovaném nasáknutí došlo k dalšímu snížení s výjimkou malty s olejem. Hodnoty absorpce solného roztoku hydrofobizovanými maltami se pohybují v 15. cyklu mezi 8 a 13 % hm. Je tedy zřejmé, že vápenopucolánová malta i po úpravě hydrofobními přísadami absorbuje do svého porézního systému více solného roztoku.

**Obrázek 168** zobrazuje fotografie vizuálního monitoringu reprezentativních vzorků pro jednotlivé typy malt. Vzorky vystavené 3% roztoku NaCl obecně vykazovaly poškození zrnitým rozpadem malty na povrchu trámčů. Malty LO, LBO a LMS vykazují malé rozdíly mezi vzorky vystavené krystalizačním cyklům soli a vzorky uloženými pouze ve vodní lázni. Vzorky neupravené vápenné malty vykazovaly silný zrnitý rozpad, zatímco vzorky vápenné malty se silanem střední (zrnitý) rozpad. Neupravená vápenopucolánová malta byla silně poškozená rozpadem, zatímco vápenopucolánová malta s olejem středně poškozená rozpadem.

**Obrázek 169** zobrazuje vývoj úbytku hmotnosti pro jednotlivé typy malt. Tyto výsledky jsou ve velmi dobré shodě s vizuálním monitoringem. Vápenné malty se lněným olejem a se lněnou fermeží měly nejmenší hmotnostní úbytky, zatímco v případě vápenopucolánové malty tomu tak bylo pro lněnou fermež a silan. Díky nižší absorpční kapacitě a nižší kapilární nasákavosti mají vápenné malty s olejem vyšší odolnost proti solím. V případě vápenopucolánových malt byly nejmenší hmotnostní úbytky pozorovány u malty upravené silanem, což však nelze přisoudit hydrofobitě, protože tato malta měla vyšší nasákavost.

Na základě výše popsaných výsledků lze konstatovat, že lněný olej a fermež zvyšují hydrofobicitu (snižují smáčivost malt vodou) více než silan. V případě vápenopucolánové malty byla nejvyšší odolnost vůči účinkům krystalizace NaCl z nasáklého roztoku při vysušování malty pozorována u malty upravené lněnou fermeží.

V průběhu experimentu nebyly zkoušeny synergické účinky mrazových cyklů a krystalizačních cyklů solí. U čistě vápenné malty pouze přísada surového lněného oleje zlepšila mrazuvzdornost malty natolik, že malta byla soudržná i po 10 cyklech zmrazení a tání. Všechny přísady ale byly efektivní ve zkoušce odolnosti vůči krystalizaci NaCl. Úprava vápenné malty přísadou lněného oleje zvyšuje trvanlivost malty v případě její expozice opakovanému mrznutí i působení roztoku NaCl.



**OBRAZĚK 169:** Hmotnostní úbytky během zkoušky odolnosti malty proti krystalizaci NaCl: vápenné malty (vlevo), vápenopucolánové malty (vpravo)

V případě vápenopucolánové malty bylo nejlepšími výsledky z hlediska mrazuvzdornosti dosaženo po úpravě malty lněnou fermeží, kdy malta nevykázala po 20 cyklech zmrazení téměř žádné poruchy. Tato úprava se ukázala velmi výhodná i z hlediska odolnosti vápenopucolánové malty vůči krystalizačním cyklům NaCl. Rozdíly v efektu hydrofobních přísad nejsou u vápenopucolánové malty velké a lze konstatovat, že všechny studované látky – lněný olej, fermež i alkylalkoxysilan významně pozitivně ovlivnily mrazuvzdornost vápenopucolánové malty. V případě expozice malty opakovanému mrznutí i působení roztoku NaCl se zdá jako nejvýhodnější úprava vápenopucolánové malty lněnou fermeží.

Parametry modifikovaných malt byly ověřeny laboratorními zkouškami a odolnost malt vůči mrznutí a krystalizaci solí vybraných malt byla hodnocena při jejich expozici reálným klimatickým faktorům na zkušebních plochách vymezených na reálných historických konstrukcích (hřbitovní zdi v Krchlebech a obvodové zdi márnice hřbitova v Ostrovci). Výsledky provedených experimentů vedly k formulaci dvou užitečných vzorů a jedné certifikované metodiky. Vědecké poznatky byly prezentovány ve dvou disertačních pracích. Malta podle užitečného vzoru CZ 28676 U1 „Suchá maltová směs pro výrobu vápenopucolánové omítky se zvýšenou mrazuvzdorností“ byla použita pro opravu ohradní zdi kolem kostela Sv. Václava a hřbitova v Krchlebech u Čáslavi v roce 2015. Všechny tři výsledky aplikovaného výzkumu dosažené v rámci řešení projektu byly využity při opravě vnější omítky hřbitovní márnice v Ostrovci v západních Čechách.

Hlavním cílem projektu byl vývoj nových vysokohodnotných a kompatibilních vápenných malt pro extrémní použití při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví, vytvoření nástrojů pro jejich optimalizaci a numerickou simulaci a ověření jejich aplikace na vybraných modelových historických objektech. Nově vyvinuté materiály – malty – mají prodlouženou životnost ve srovnání s klasickými vápennými maltami a jsou vhodné pro opravu historických památkově chráněných staveb zatížených průnikem dešťové, zatekající a odstříkující vody. Jedná se především o horizontální povrchy architektonických prvků, místa kontaktu fasády se střechou objektu, okolí vyústění svislých dešťových svodů apod. Použití vnitřně hydrofobní vápenometakaolinové malty není vhodné v místech, kde je podklad (zdívo) trvale zvlhčován vztláním zemní vlhkosti nebo prosakováním vody z přilehlého vlhkého terénu. V takových případech je nutno počítat s tím, že vysychání vody ze zvlhčeného zdiva přes vnitřně hydrofobní omítku do ovzduší je ve srovnání s hydrofilní, kapilárně aktivní omítkou pomalejší.

Voda pronikající z vnějšího prostředí do stavební konstrukce je nežádoucí z hlediska potenciálního mrazového poškození omítky a případně i zdiva pod omítkou. Pronikající voda je často kontaminovaná vodorozpuštěnými solemi, které přispívají k degradaci porézní malty a případně i zdiva krystalizačními a hydratačními tlaky při teplotních a vlhkostních změnách. Snížením nasákavosti omítky a úpravou její porézní struktury díky přísadě oleje nebo tenzidů do čerstvé malty je rychlost průniku vody do omítky i celkové množství nasáknuté vody a roztoků soli do omítky nízké. Omítka upravená přísadami má tak delší životnost a zároveň je funkční ochranou zdiva před degradačními účinky z vnějšího prostředí pronikající vody.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI DF11P01O-VV008 „Vysokohodnotné a kompatibilní vápenné malty pro extrémní aplikaci při restaurování, opravách a preventivní údržbě architektonického dědictví“.

## Použitá literatura

- Čechová, E., I. Papayianni a M. Stefanidou. Properties of lime-based restoration mortars modified by the addition of linseed oil. In: Válek, J., C. Groot a J. J. Hughes. *2nd Historic Mortars Conference and RILEM TC 203-RHM Final workshop: HMC2010*. Bagnaux: RILEM Publications, 2010. ISBN 978-2-35158-112-4.
- Drdáký, M. Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars. *International Journal of Architectural Heritage*. 2011, 5(4-5), 383-394.  
<http://dx.doi.org/10.1080/15583051003717788>
- Falchi, L., U. Müller, P. Fontana, F. C. Izzo a E. Zendri. Influence and effectiveness of water-repellent admixtures on pozzolana-lime mortars for restoration application. *Construction and Building Materials*. 2013, 49, 272-280.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.030>
- Grilo, J., A. Santos Silva, P. Faria, A. Gameiro, R. Veiga a A. Velosa. Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials*. 2014, 51, 287-94.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.045>
- Chandra, S. a J. Aavik. Influence of black gram (natural organic material) addition as admixture in cement mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*. 1983, 13(3), 423-430.  
[http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846\(83\)90043-1](http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(83)90043-1)
- Izaguirre, A., J. Lanás a J. I. Álvarez. Effect of water-repellent admixtures on the behavior of aerial lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*. 2009, 39(11), 1095-1104.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.026>
- Janotová, D. *Vliv provzdušňovacích přísad na mrazuvzdornost metakaolinových malt*. Dizertační práce. Praha: Fakulta stavební ČVUT v Praze, 2015.
- Janotová, D. a Z. Slížková. *Suchá maltová směs pro výrobu vápenopucolánové omítky se zvýšenou mrazuvzdorností*. Užitečný vzor. Číslo vzoru: CZ 28676 U1, Úřad průmyslového vlastnictví, 2015.  
<http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0028/uv028676.pdf>
- Justnes, H., T. A. Ostnor a N. B. Vila. Vegetable oils as water repellents for mortars. In: *Proceedings 1st International Conference Asian Concrete Federation*. Chiang Mai: TCA, 2004.

- Liles, D. T. The fascinating world of silicones and their impact on coatings. In: Rawlins, J. a R. Storey (eds.). *The waterborne symposium: proceedings of the 39th annual international waterborne, high-solids and powder coatings symposium*. Lancaster (PA): DES-tech Publications, 2012. ISBN 978-1-60595-074-7.
- Lu, Z., X. Zhou a J. Zhang. Study on the performance of a new type of water-repellent admixture for cement mortar. *Cement and Concrete Research*. 2004, 34(11), 2015-2019. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.019>
- Maciel, M. J. *Vitrúvio, Tratado de Arquitectura* (Translated from Latin). Lisbon: Instituto Superior Técnico, 1999.
- Nunes, C. *Lime based mortars with a traditional water repellent admixture: a study on transport phenomena during ageing*. Disertační práce, FSV ČVUT v Praze, 2015.
- Nunes, C., Z. Slížková, D. Frankeová a P. Hauková. Vápenná vnitřně hydrofobní malta. Užitečný vzor. Číslo vzoru: CZ 28822 U1, Úřad průmyslového vlastnictví, 2015. <http://spisy.upv.cz/UtilityModels/FullDocuments/FDUM0028/uv028822.pdf>
- Nunes, C., Z. Slížková a D. Křivánková. Lime-based mortars with linseed oil: sodium chloride resistance assessment and characterization of the degraded material. *Periodico di Mineralogia*. 2013, 82(3), 411-427. <http://dx.doi.org/10.2451/2013PM0024>
- Perkins, P. H. *Repair, protection and waterproofing of concrete structures*. New York: Elsevier, 1986.
- RILEM Commission 25-PEM, Tentative Recommendations. *Materials and Structures*. 1980, 13(3), 192-193.
- Slížková, Z., D. Frankeová, C. L. Nunes a D. Janotová. *Příprava omítky se zvýšenou mrazuvzdorností pro opravy historických staveb*. Certifikovaná metodika, Ministerstvo kultury ČR, Osvědčení č. 101, 2015.
- Teutonico, J. M. *Laboratory Manual for Architectural Conservators*. Rome: ICCROM, 1988.
- Vejmelková, E., M. Keppert, P. Rovnaníková, Z. Keršner a R. Černý. Mechanical, fracture mechanical, hydric, thermal, and durability properties of lime–metakaolin plasters for renovation of historical buildings. *Construction and Building Materials*. 2012, 31, 22-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.084>
- Vejmelková, E., M. Keppert, P. Rovnaníková, Z. Keršner a R. Černý. Properties of lime composites containing a new type of pozzolana for the improvement of strength and durability. *Composites Part B: Engineering*. 2012, 43(8), 3534-3540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.11.053>
- Ventolà, L., M. Vendrell, P. Giraldez a L. Merino. Traditional organic additives improve lime mortars: new old materials for restoration and building natural stone fabrics. *Construction and Building Materials*. 2011, 25(8), 3313-3318. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.020>
- Vikan, H. a H. Justnes. Influence of vegetable oils on durability and pore structure of mortars. In: V. M. Malhotra (ed.). *Proceedings of Seventh CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete*. Montreal: ACI, 2006, SP-234-25.
- de Vries, J. a R. B. Polder. Hydrophobic treatment of concrete. *Construction and Building Materials*. 1997, 11(4), 259-265. [http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00046-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00046-9)
- Wendler, E., a A. E. Charola. Water and its interaction with porous inorganic building materials. In: Clercq, H. (ed.). *Hydrophobe V, 5th International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials*. Brussels: Aedificatio Publishers, 2008, 57-74.
- Zhu, Y-G., S-C. Kou, C-S. Poon., J-G. Dai a Q-Y. Li. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*. 2013, 35(1), 32-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.008>

# Využití pucolánové aktivity historických malt ke zvýšení konsolidačního efektu

**Dita Frankeová, Zuzana Slížková**

Pucolány jsou látky obsahující oxid křemičitý nebo hlinitý v reaktivní (amorfní) formě, který může reagovat ve vodném prostředí za normální teploty s hydroxidem vápenatým za vzniku hydratovaných křemičitanů (CSH), hlinitokřemičitanů (CASH) a hlinitanů (CAH) vápenatých. V moderním stavitelství se pucolány používají jako přísada do betonu, jejíž funkcí je vázat  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  vznikající hydratací cementu, a tak měnit mikrostrukturu betonu. Pucolánový beton má v důsledku formování dalších hydraulických fází jemnější póry, a proto vykazuje vyšší pevnosti a větší chemickou odolnost (Siddique a Klaus 2009, Frías a Cambra 2000, 2001). Pucolánově aktivní mohou být kromě přírodních materiálů i různé průmyslové odpady či vedlejší produkty (strusky, popílky atd.), jejichž použití jako částečné náhrady v betonu vede ke snižování negativních dopadů výroby cementu na životní prostředí tím, že snižují množství portlandského slínku a tím i vyprodukované množství  $\text{CO}_2$  (Massazza 2002, Hernandez et al. 1998, Sabir et al. 2001).

Použití pucolánově aktivních látek pro zlepšení vlastností vápenných malt je známo již od starověku, kdy staří Římané vyvinuli pokrokovou technologii přípravy malt odolných mořské vodě přidáním sopečného popela z okolí Vesuvu do vápenné malty (Vitruvius 1960, Oleson et al. 2006). Různé formy vápeno-pucolánových pojiv byly používány pro výrobu hydraulického pojiva až do 19. století (Drdáček et al. 2013, Frankeová et al. 2012), kdy byly nahrazeny vysoce hydraulickými pojivy cementového typu. Vlastnosti pucolánových malt a průběh reakce mezi hydroxidem vápenatým a pucolánem jsou v současné době rozsáhle studovány, mezi nejvíce zkoumané materiály patří tepelně aktivované jíly, a to hlavně meta-kaolin (Gameiro et al. 2012, Cabrera a Rojas 2000, Vejmelková et al. 2009, Silva et al. 2014), dále tufy nebo zeolity (Najimi et al. 2012). Výsledky tohoto výzkumu se uplatňují především v moderním stavebnictví, ale vápenné malty s přidavkem pucolánů jsou používány i jako kompatibilní materiál pro opravy historických budov.

Nasycený roztok hydroxidu vápenatého, běžně známý jako vápenná voda (Tavares et al. 2008, Slížková et al. 2015, Drdáček a Slížková 2015), nebo disperze nanočástic hydroxidu vápenatého v alkoholu (Dei a Salvadori 2006, Ziegenbalg 2008) jsou prostředky vhodné pro zpevnění degradované historické vápenné omítky. Vápenné kapalné konsolidanty jsou aplikovány na ošetřovaný povrch různými způsoby (nátěrem, postřikem, poléváním) a musejí proniknout do hloubky celé degradované vrstvy. Základem pro provedení prezentované studie byla otázka, zdali je možné během konzervačního zásahu vápennými konsolidanty obnovit hydraulické složky – hydratované křemičitanů a hlinitanů vápenatých (CSH a CAH) – ve zdegradovaném původně hydraulickém vápenném pojivu historických malt. Kromě degradačních produktů pojiva může do pucolánové

reakce vstoupit také část kameniva s obsahem amorfního oxidu křemičitého či hlinitého, a proto se výzkum zaměřil na studium reakce všech složek malt s dodaným hydroxidem vápenatým. Znalost pucolánové aktivity ošetřovaných materiálů může pomoci při volbě zpevňujícího prostředku a pro navržení technologického postupu konzervace historické omítky.

Metody určení pucolánové aktivity jsou založeny buď na stanovení úbytku hydroxidu vápenatého spotřebovaného pucolánovou reakcí ve směsi s pucolánem (přímé metody), nebo na pozorování změny fyzikálních vlastností (nepřímé metody). Pro přímé stanovení obsahu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  jsou nejčastěji využívány titrační metody, rentgenová difrakce a termická analýza (Bakolas et al. 2006, Moropoulou et al. 2004). Fyzikální veličiny sledované pro nepřímé určení pucolánové aktivity jsou především mechanická pevnost, elektrická vodivost či kalorimetrická měření (Donatello et al. 2010, Payá et al. 2001). Většina existujících norem je založena na těchto nepřímých metodách a zabývá se pucolánem jako příměsí do cementu. Postupy jsou poměrně časově i experimentálně náročné (výroba zkušebních těles, konstrukce aparatury izolované od atmosféry okolního prostředí atd.). Metoda určování pucolánové aktivity termickou analýzou se zdá být nejhodnější metodou pro zkoušení vzorků složek malt, protože dokáže postihnout i malé změny, ke kterým dochází při reakci těchto materiálů s vápnem. Další výhodou je, že touto metodou je možné identifikovat a kvantifikovat jak vznikající křemičitany, tak i hlinitany vápenaté, což vede k přesnějším výsledkům než např. vyjádření míry pucolánové aktivity stanovením rozpustného  $\text{SiO}_2$ . Oproti metodám založeným na stanovení obsahu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v reakční směsi chemickou titrací je také výhodou i možnost současného sledování obsahu  $\text{CaCO}_3$ , který signalizuje, zdali nedošlo k nežádoucímu úbytku hydroxidu vlivem karbonatace.

Obecně je známo, hydraulické fáze pojiva stárnutím malty podléhají karbonataci, jejímž výsledkem je jejich přeměna na uhličitán vápenatý a výše zmiňované oxidy křemíku a hliníku. Poslední dvě sloučeniny, oxid křemičitý a oxid hlinitý, jsou pucolánově aktivní látky.

## Testované materiály a použité metody

### *Příprava vzorků*

První zkoumanou skupinou byla pojiva historických malt s velikostí částic menší než 0,125 mm (malta byla malým tlakem podrcena tak, aby došlo k oddělení zrn kameniva od pojiva, poté byla mechanicky rozdrůžená malta přesítována přes síto 0,125 mm). Zrnitostní složka malty obsahující částice menší než 0,125 mm (tzv. podsítné) byla použita pro termickou analýzu, rentgenovou fluorescenci a rentgenovou difrakci (vzorky označené B). Další zkoumanou skupinou byly křemenné písky s různým podílem nekřemenné složky (vzorky A), a poslední skupinou pucolánové materiály, jejichž pucolánová aktivita je vysoce předpokládána nebo již známá (vzorky P) – metakaolin Mefisto K05 (výrobce ČLUZ, Nežerka et al. 2014, Biscontin et al. 2002) a opuka v přírodní formě i tepelně aktivovaná při teplotě 600 °C (lokality Přední Kopanina). Použití opuky jako příměsí při výrobě hydraulického vápna bylo popsáno v literatuře (Příkryl a Štátná 2010). Chemické a mineralogické složení vzorků bylo stanoveno analýzou XRF a XRD – viz **tabulka 8**.

Pro stanovení pucolánové aktivity vybraných materiálů byly připraveny pasty o poměru hmotností pucolán :  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (p.a.) 1:1. Množství přidané vody potřebné k vytvoření pasty nebylo u všech vzorků stejné, poměr voda/suchá směs se pohyboval v rozmezí 0,7 až 1,1.



Připravené pasty byly uloženy v uzavřených plastických nádobkách při 30 °C a relativní vlhkosti 90 %. Po 1, 4, 8, 15, 30, 60, 90, 120, 150 a 180 dnech bylo odebráno z nádoby přibližně 200 mg vzorku, který byl vysušen acetonem a dále sušen 2 hod. ve vakuu. Poté byly vzorky podrobeny TG/DSC. U vzorků ve stáří 180 dní byly také naměřeny XRD difraktogramy.

### Použité metody

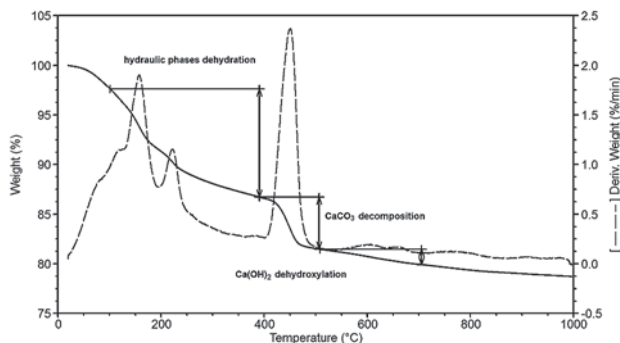
**Rentgenová fluorescence (XRF)** byla použita pro stanovení prvkového složení testovaných materiálů. Rozetřený vzorek byl po smíchání s kyselinou boritou vylisován do tablety a změřen na analytickém přístroji EDXRF X-Supreme 8000 (Oxford Instruments).

**Termická analýza (TG/DTG)** poskytuje možnost detekce a kvantifikace hydraulických produktů vznikajících v průběhu reakce vzorků s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Ve výše uvedených časových intervalech bylo odebráno z reakční nádoby přibližně 200 mg pasty, která byla vysušena acetonem, dále sušena 4 hod. ve vakuu a poté analyzována. TG/DSC analýza byla provedena na přístroji SDT Q600 (TA Instruments) v rozmezí teplot 25–1000 °C. Na analýzu bylo naváženo 20–30 mg vzorku do keramického kelímku, spalování probíhalo v  $\text{N}_2$  atmosféře rychlostí ohřevu 20 °C za min.

**Rentgenová difrakce (XRD)** poskytla informace o mineralogickém složení testovaných složek malty i o výsledných produktech jejich reakce s hydroxidem vápenatým. Difrakční linie práškových vzorků byly naměřeny na difraktometru X'Pert PRO (PANalytical) za použití zdroje záření  $\text{CuK}\alpha$  (napětí 40 kV, proud 30 mA) v transmisním uspořádání.

**TABULKA 8:** Chemicko-mineralogické složení vzorků

Č.	Vzorek	Chemická analýza (% hm.) (RTG fluorescence)					Mineralogické složení (RTG difrakce)
		$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$	
1	písek křemenný Kema	95,7	1,8	0,1	0,1	0,1	křemen
2	písek křemenný Borek	90,1	4,9	0,7	0,5	1,9	křemen, albit, muskovit, mikroklin
3	písek křemenný Zálezlice	60,0	10,4	7,9	2,9	3,4	křemen, albit, mikroklin, muskovit, kordierit
4	písek směsný Vanov	65,0	17,4	3,5	1,5	5,5	křemen, albit, biotit, mikroklin, kordierit
5	opuka Přední Kopanina	60,7	6,5	1,2	13,4	0,6	křemen, kalcit, kaolinit, illit, anatas
6	opuka tepelně aktivovaná 600 °C	63,2	7,4	1,2	12,3	0,7	křemen, kalcit, illit, anatas
7	metakaolin Mefisto K05	52,5	44,4	0,4	0,1	0,2	křemen, korund, anatas
8	pojivo hydraulické vápenné malty 14. století	33,7	5,6	2	28,3	0,5	křemen, kalcit, albit, mikroklin, tridymit
9	pojivo hydraulické vápenné malty 16. století	38,0	7,8	1,6	19,8	0,9	křemen, kalcit, albit, muskovit, anortit
10	pojivo hliněné malty 11. století	55,6	16,9	4,5	4,1	3,9	křemen, kalcit, albit, muskovit, mikroklin

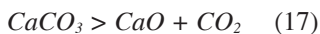


**OBRAZEK 170:** Rozdělení křivky TGA na dílčí teplotní intervaly (ilustrační vzorek – pasta vápno+metakaolin ve stáří 8 dní)

## Výsledky a diskuse

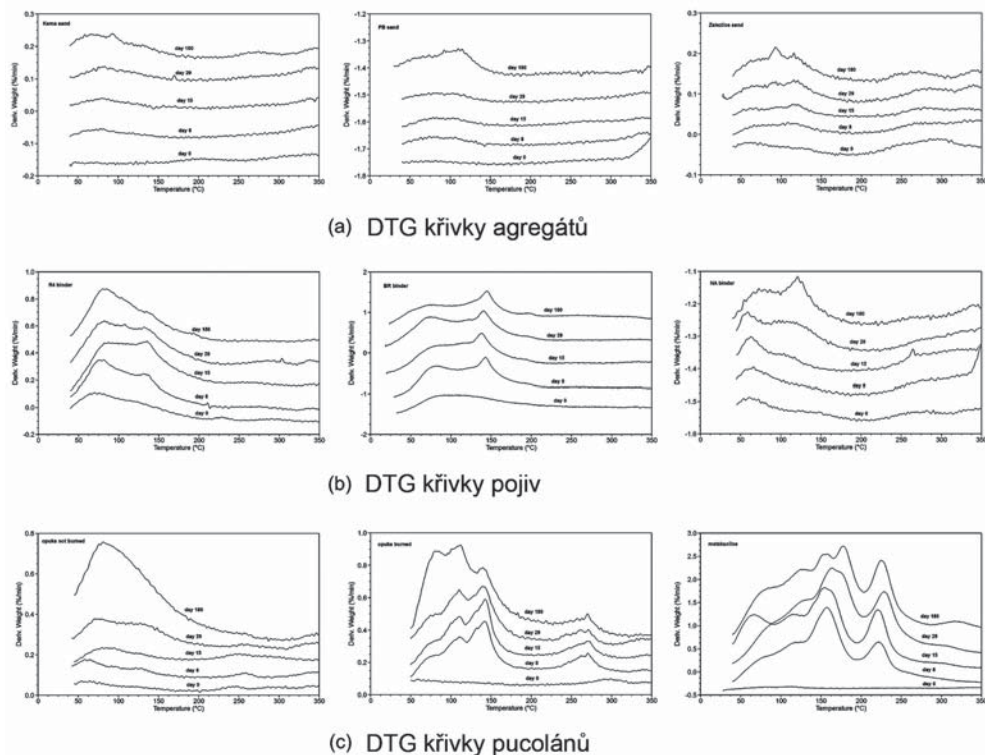
### Termická analýza

Při vyhodnocování pucolánové aktivity vzorků ze záznamů termické analýzy byl celkový hmotnostní úbytek vzorku v důsledku zahřátí rozdělen do dílčích úbytků, jak je znázorněno na **obrázku 170**. Úbytek v intervalu teplot 100–350 °C přísluší dehydrataci hydraulických složek, v intervalu 350–520 °C se úbytkem hmotnosti projevuje dehydroxylace hydroxidu vápenatého a konečně oxid uhličitý uvolněný z rozkladu uhličitánů je příčinou poklesu hmotnosti v rozmezí teplot 520–800 °C. Pomocí těchto úbytků na křivce TG je možné vypočítat kvantitativní zastoupení jednotlivých složek dle rovnic (16) a (17). Pásy na derivační křivce DTG upřesňují rozmezí teplot probíhajících dějů. Tato metodika vychází z předpokladu, že během celého experimentu nedochází ke karbonataci hydroxidu vápenatého, a proto veškerý jeho úbytek z reakční směsi souvisí pouze s jeho spotřebováním v pucolánové reakci. Obsah uhličitánu vápenatého v pastách byl sledován v průběhu celého experimentu.



Přítomnost produktů pucolánové reakce se projeví na křivce DTG vznikem nových pásů příslušejících hydratovaným křemičitanům a hlinitanům vápenatým v rozmezí teplot 100–350 °C. Identifikací produktů pucolánové reakce se zabývali autoři některých publikací (Siddique a Klaus 2009; Frías a Cabrera 2000, 2001; Gameiro et al. 2012; Nunes a Slížková 2014), převážně byly zkoumány vápenné malty s přidávkou metakaolinu. Z těchto publikací vyplývá, že hlavními produkty reakce při teplotě 20 °C jsou CSH (hydratovaný křemičitan vápenatý), C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub> (stratlingit), C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> (hydratovaný hlinitan vápenatý) a C<sub>4</sub>AcH<sub>11</sub> (monokarboaluminát). Všechny uvedené křemičitan, hlinitan či hlinítokřemičitan uvolňují vázanou vodu v intervalu 100–350 °C, proto hmotnostní úbytek v této oblasti můžeme považovat za úměrný stupni hydratace.

Křivky DTG měřené v různém stáří past popisují vývoj hydraulických složek (**obr. 171**). Z grafu nárůstu hydraulických složek i z DTG záznamů jednotlivých vzorků je patrné, že skupina vzorků písků je nejméně reaktivní. Na DTG záznamech písků se v prvních 30 dnech příliš neprojevuje vliv působení hydroxidu vápenatého na zrna písků, v oblasti 100–200 °C dochází



**OBRAZEK 171:** DTG křivky sledovaných vzorků v různém stáří

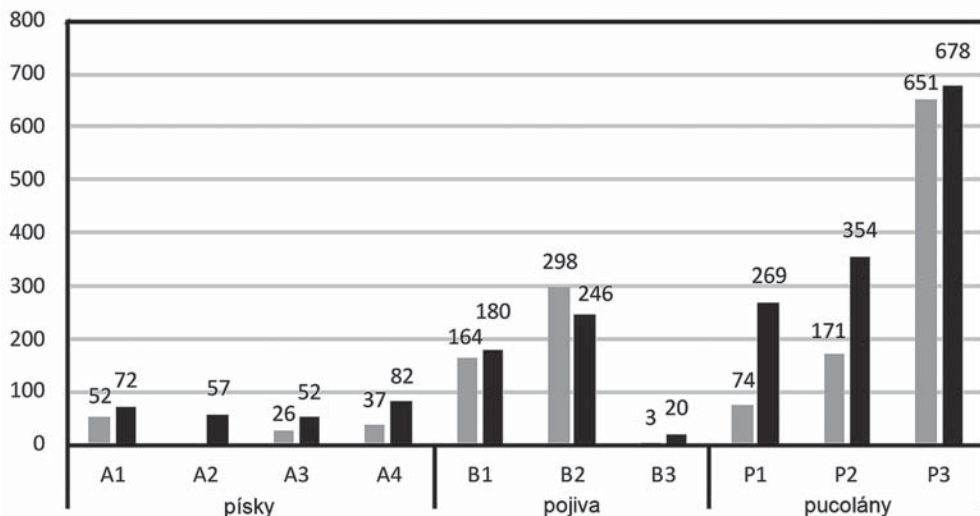
jen k nepatrným změnám. Až na křivkách pořízených po 180 dnech je jasná přítomnost pásů hydraulických fází. Z naměřených hodnot je také patrné, že pojiva reagují s hydroxidem vápenatým již v prvních dnech po přípravě směsi, zatímco písky potřebují k zahájení pucolánové reakce delší kontakt s hydroxidem. Největší pucolánovou aktivitu mají, dle očekávání, metakaolin a opuka. Přepálení opuky mělo vliv na zapojení  $\text{Al}_2\text{O}_3$  do pucolánové reakce, což se na DTG záznamu projevilo větším počtem pásů v rozmezí teplot 100–200 °C. Oproti tomu v záznamu vzorku nepřepálené opuky je v tomto teplotním intervalu patrný jen jeden široký pás, který pravděpodobně souvisí s dehydratací hydratovaných křemičitanů (CSH) vzniklých reakcí hydroxidu vápenatého s reaktivními (amorfními) formami  $\text{SiO}_2$ .

### Stanovení pucolánové aktivity

Z hmotnostních úbytků v rozmezí teplot 350–520 °C na křivkách TG byl stanoven obsah portlanditu ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) v jednotlivých pastách ve stanovených časových intervalech (rovnice 18). Odečtením tohoto obsahu od množství portlanditu v pastě na začátku měření bylo vypočteno množství  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  spotřebované pucolánovou reakcí – pucolánová aktivita (rovnice 19).

$$CH_t = m_{(350-520)} (MM_{CH} / MM_{H_2O}) \quad (18)$$

$$CH_{poz} = CH_{ini} - CH_t \quad (19)$$



**OBRÁZEK 172:** Zjištěná pucolánová aktivita vzorků ve stáří 29 a 180 dní [v mg pucolánu/1 g Ca(OH)<sub>2</sub>]

kde je:

$CH_t$  obsah portlanditu v daném stáří

$CH_{ini}$  počáteční obsah portlanditu

$CH_{poz}$  portlandit spotřebovaný pucolánovou reakcí

$MM_{CH}$  molární hmotnost portlanditu

$MM_{H_2O}$  molární hmotnost vody

Na **obrázku 172** jsou znázorněny hodnoty pucolánové aktivity po 29 a 180 dnech. Získaná data dobře korespondují s hodnotami obsahu hydraulické vody ve vzorcích, potvrzují, že pucolánová aktivita roste v řadě písky – pojiva – příměsi. Zajímavé je zjištění, že vzorky nepřepálené a tepelně aktivované opuky dosahují po 180 dnech srovnatelné hodnoty. Teplota výpalu 600 °C byla zřejmě nízká na úplnou transformaci jílu na amorfní formu, což ukazují i výsledky z RTG difrakce, kterou byla prokázána přítomnost illitu v přepálené opuce. Hodnota pucolánové aktivity pro metakaolin je nižší než hodnota deklarovaná v technickém listu výrobce [1002 mg/1 g Ca(OH)<sub>2</sub>]. Důvodem je nedostatek přidané vody při přípravě pasty, mezi 15. a 29. dnem byla voda spotřebována pucolánovou reakcí a další přísávek vody již nepomohl k tomu, aby reakce mohla proběhnout v plném rozsahu.

### Rentgenová difrakce

Metoda rentgenové difrakce byla použita pro ověření přítomnosti hydraulických složek ve vzorcích past. Tyto produkty pucolánové reakce však mohou mít nízký stupeň krystalinity nebo mít amorfní charakter, proto touto metodou nemusí být detekovány všechny fáze, které jsou patrné na záznamech z termické analýzy. Jak je patrné z **tabulky 9**, ve všech vzorcích (měřeno po 120 dnech) byl nalezen portlandit a kalcit (kromě písku PB). Hydratovaný křemičitan vápenatý (CSH) byl kromě past s přísávkem pucolánových příměsí (opuka, metakaolin) detekován i u vzorků dvou historických malt. Tyto vzorky pravděpodobně obsahovaly oxid křemičitý v reaktivní formě, zřejmě jako

produkt degradace hydraulického pojiva, jehož reakcí s portlanditem vznikl CSH. Přítomnost hydratovaného hlinítkřemičitanu vápenatého (stratlingit) byla prokázána jen v pastě vápno + metakaolin. Monokarboaluminát je v literatuře (Arizzi a Cultrone 2012) popsán jako produkt reakce mezi reaktivním  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a portlanditem v přítomnosti iontů  $\text{CO}_3$ . Vzniká v reakční směsi již v prvních dnech. Monokarboaluminát je označován jako nestabilní fáze, která se může s rostoucím časem transformovat na hydratovaný hlinitan nebo hydrokalumit. Toto tvrzení by vysvětlovalo přítomnost hydrokalumitu v pastě vápno-metakaolin. Výskyt této fáze v pastách s historickými pojivy je pravděpodobně způsoben pucolánovou reakcí některé ze složek malt s portlanditem (Biscotini et al. 2002). Poslední hydraulickou fází detekovanou metodou XRD je ettringit, který vznikl reakcí síranu vápenatého, obsaženého v pojivu malty, s hydratovanými hlinítky.

**TABULKA 9:** Identifikace reakčních produktů pomocí RTG difrakce

Vzorek		Portlandit	Kalcit	CSH	Stratlingit	Monokarboaluminát	Hydrokalumit	Ettringit
1	písek křemenný Kema	+	+			+		
2	písek křemenný Borek	+				+		
3	písek křemenný Zálezlice	+	+			+		
4	písek směsný Vanov	+	+			+		
5	opuka Přední Kopanina	+	+	+				
6	opuka tepelně aktivovaná 600 °C	+	+	+		+		
7	metakaolin Mefisto K05	+	+	+	+	+	+	
8	pojivo hydraulické vápenné malty 14. století	+	+	+		+		
9	pojivo hydraulické vápenné malty 16. století	+	+	+			+	+
10	pojivo hliněné malty 11. století	+	+				+	

portlandit	$\text{Ca}(\text{OH})_2$
monokarboaluminát	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O}$
kalcit	$\text{CaCO}_3$
hydrokalumit	$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{CO}_3(\text{OH})_{12}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$
CSH	$\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$
ettringit	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$
stratlingit	$2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$

## Závěr

Ze získaných výsledků vyplývá, že termická analýza je metoda vhodná pro zkoumání reaktivity složek historických malt s roztokem hydroxidu vápenatého. Hlavní výhodou této metody je možnost určení kvalitativního i kvantitativního zastoupení vznikajících křemičitanů i hlinítků vápenatých, a to jak krystalických, tak i RTG amorfních fází. Během analýzy je možné také sledovat obsah uhličitany vápenatého, a tím určit podíl  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  spotřebovaného karbonatizační reakcí.

RTG difrakční analýza vzorků starých 180 dní potvrdila jedinou vzniklou hydraulickou fází (monokarboaluminát) ve vzorcích písků, zatímco ve vzorcích pojiv byly zjištěny navíc další dvě hydraulické fáze (CSH a hydrokalumit). V souladu s publikovanými údaji byly jako produkty pucolánové reakce metakaolinu s hydroxidem vápenatým prokázány CSH, stratingit a monokarboaluminát.

Termická analýza potvrdila přítomnost fází detekovaných pomocí difrakce.

Současné výsledky ukazují, že pucolánová aktivita jednotlivých složek malty by mohla účinně přispívat ke konsolidačnímu zásahu pomocí vápenných prostředků, a to zejména v případě dlouhodobého ošetřování degradované hydraulické malty. Vápenná malta (připravená ze vzdušného vápna), která se nechá odležet po dobu několika měsíců za nepřístupu vzduchu, může mít lepší mechanické vlastnosti v důsledku přítomnosti hydraulických fází vzniklých reakcí vápenného pojiva s částicemi plniva (písku). Zpevňování historických malt vápennými konsolidanty může vést k obnovení degradovaných hydraulických složek pojiva.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

- Arizzi, A. a G. Cultrone. Aerial lime-based mortars blended with a pozzolanic additive and different admixtures: a mineralogical, textural and physical-mechanical study. *Construction and Building Materials*. 2012, 31, 135–143.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.069>
- Bakolas, A., E. Aggelakopoulou, A. Moropoulou a S. Anagnostopoulou. Evaluation of pozzolanic activity and physico-mechanical characteristics in metakaolin–lime pastes. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2006, 84(1), 157–163.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10973-005-7262-y>
- Biscontin, G., M. P. Birelli a E. Zendri. Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars. *Journal of Cultural Heritage*. 2002, 3(1), 31–37.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2074\(02\)01156-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1296-2074(02)01156-1)
- Cabrera, J. a M. Frías. Mechanism of hydration of the metakaolin–lime–water system. *Cement and Concrete Research*. 2001, 31(2), 177–182.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00456-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00456-7)
- Dei, L. a B. Salvadori. Nanotechnology in cultural heritage conservation: nanometric slaked lime saves architectonic and artistic surfaces from decay. *Journal of Cultural Heritage*. 2006, 7(2), 110–115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2006.02.001>
- Donatello, S., M. Tyrer a C. R. Cheeseman. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites*. 2010, 32(2), 121–127.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008>
- Drdácký, M., F. Fratini, D. Frankeová a Z. Slížková. The Roman mortars used in the construction of the Ponte di Augusto (Narni, Italy) – a comprehensive assessment. *Construction and Building Materials*. 2013, 38, 1117–1128.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.044>

- Drdácký, M. a Z. Slížková. In situ peeling tests for assessing the cohesion and consolidation characteristics of historic plaster and render surfaces. *Studies in Conservation*. 2015, 60(2), 121–130. <http://dx.doi.org/10.1179/2047058413Y.0000000116>
- Frankeová, D., Z. Slížková a M. Drdácký. Characteristics of mortars from ancient bridges. In: Válek, J., J. Hughes a J. Groot. *Historic mortars: Characterisation, assessment and repair*, 7. Dordrecht: Springer, 2012, 165–174. ISBN 978-94-007-4634-3.
- Friás, M. a J. Cabrera. Influence of MK on the reaction kinetics in MK/lime and MK-blended cement systems at 20°C. *Cement Concrete Research*. 2001, 31(4), 519–527. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00465-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00465-8)
- Friás, M. a J. Cabrera. Pore size distribution and degree of hydration of metakaolin–cement pastes. *Cement Concrete Research*. 2000, 30(4), 561–569. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00203-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00203-9)
- Gameiro, A., A. S. Silva, R. Veiga a A. Velosa. Hydration products of lime–metakaolin pastes at ambient temperature with ageing. *Thermochimica Acta*. 2012, 535, 36–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2012.02.013>
- Martirena Hernández, J. F., B. Middendorf, M. Gehrke a H. Budelmann. Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana binders: study of the reaction. *Cement Concrete Research*. 1998, 28(11), 1525–1536. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00130-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00130-6)
- Massazza F. Properties and applications of natural pozzolanas. In: Barnes, P. a J. Bensted. *Structure and Performance of Cements*. CRC Press, 2001, 326–352.
- Moropoulou, A., A. Bakolas a E. Aggelakopoulou. Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. *Thermochimica Acta*. 2004, 420(1-2), 135–140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2003.11.059>
- Najimi, M., J. Sobhani, B. Ahmadi a M. Shekarchi. An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan. *Construction and Building Materials*. 2012, 35, 1023–1033. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038>
- Nežerka, V., Z. Slížková, P. Tesárek, T. Plachý, D. Frankeová a V. Petrářová. Comprehensive study on mechanical properties of lime-based pastes with additions of metakaolin and brick dust. *Cement and Concrete Research*. 2014, 64, 17–29. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.006>
- Nunes, C. L. a Z. Slížková. Hydrophobic lime based mortars with linseed oil: characterization and durability assessment. *Cement and Concrete Research*. 2014, 61-62, 28–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.03.011>
- Oleson, J. P., L. Bottalico, C. Brandon, R. Cucitore, E. Gotti a R. L. Hohlfelder. Reproducing a Roman maritime structure with Vitruvian pozzolanic concrete. *Journal of Roman Archaeology*. 2006, 19, 29–52. <http://dx.doi.org/10.1017/S1047759400006255>
- Payá, J., M. V. Borrachero, J. Monzó, E. Peris-Mora a F. Amahjour. Enhanced conductivity measurement techniques for evaluation of fly ash pozzolanic activity. *Cement and Concrete Research*. 2001, 31(1), 41–49. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00434-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00434-8)
- Přikryl, R. a A. Šťastná. Contribution of clayey–calcareous silicite to the mechanical properties of structural mortared rubble masonry of the medieval Charles Bridge in Prague (Czech Republic). *Engineering Geology*. 2010, 115(3-4), 257–267. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.06.009>

- Sabir, B. B., S. Wild a J. Bai. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement Concrete Composites*. 2001, 23(6), 441–454.  
[http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00092-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00092-5)
- Siddique, R. a J. Klaus. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review. *Applied Clay Science*. 2009, 43(3-4), 392–400.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.007>
- Silva, A. S., A. Gameiro, J. Grilo, R. Veiga a A. Velosa. Long-term behavior of lime–metakaolin pastes at ambient temperature and humid curing condition. *Applied Clay Science*. 2014, 88-89, 49–55. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.12.016>
- Slížková, Z., M. Drdácěk a A. Viani. Consolidation of weak lime mortars by means of saturated solution of calcium hydroxide or barium hydroxide. *Journal of Cultural Heritage*. 2015, 16(4), 452–460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2014.09.003>
- Tavares, M., R. Veiga a A. Fragata. Conservation of old renderings - the consolidation of rendering with loss of cohesion. In: *Book of Abstracts, HMC08 1st Historical Mortars Conference*, Lisbon: LNEC, 2008. (+ CD ROM full paper).
- Vejmelková, E., R. Pernicová, R. Sovják a R. Černý. Properties of innovative renders on lime basis for the renovation of historical buildings. In: Brebbia, C. A. *Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture XI*. 2009, 221–229.  
<http://dx.doi.org/10.2495/STR090201>
- Vitruvius. The ten books on architecture. Morgan, M. H. (trans.). New York: Dover, 1960
- Ziegenbalg, G. Colloidal calcium hydroxide – a new material for consolidation and conservation of carbonatic stones. In: Lukaszewicz, J. a P. Niemcewicz (eds.). *Proceedings of the 11th International Congress on deterioration and conservation of stone*. Torun: Nicolaus Copernicus University Press, 2008, 1109-1115.





# Pokročilé technologie průzkumů historických konstrukcí

Miloš Drdáčký, Jaroslav Lesák, Jan Válek

Při průzkumech historických konstrukcí i památkových a uměleckých objektů je většinou velmi užitečná možnost zobrazení údajů, která nejsou na první pohled rozpoznatelná nebo dokonce nejsou na povrchu viditelná. V této kapitole se proto zaměřujeme na technologie a techniky umožňující vidět ve větší ploše stav historických konstrukcí a jejich materiálů.

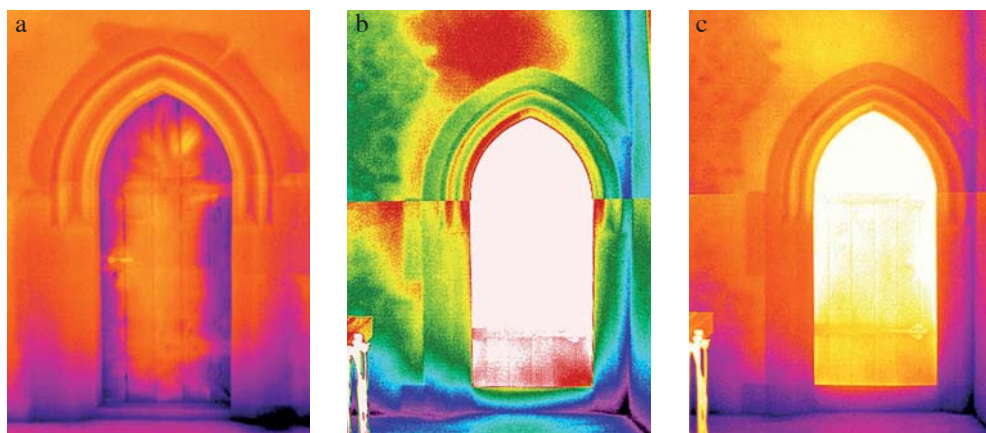
## Termografie

Rozložení povrchových teplot na objektu ukazuje na jeho vnitřní vlastnosti nebo stav. Každý objekt má jistou schopnost odrážet, přijímat, akumulovat, vést a vyzařovat tepelnou energii. Intenzita těchto jevů je závislá na kvalitě povrchu tělesa, na fyzikálních, popřípadě chemických vlastnostech materiálu, na přítomnosti dutin nebo diskontinuit a na vlhkosti nasákových materiálů. Uvedené charakteristiky jsou na většině historických konstrukcí velmi proměnné, a proto můžeme pozorovat na povrchu objektu rozdílné rozložení teplot, ze kterého můžeme odvozovat pravděpodobné vnitřní vlastnosti nebo stav tělesa.

Povrchová teplota tělesa je ovlivněna vedením tepelného toku uvnitř konstrukce – izolanty a pórovité materiály vedou teplo hůře, proto se takové části konstrukce při chladnutí jeví studenější, při zahřívání naopak teplejší. Stejně se projevuje i přítomnost dutin. Studenější jsou obecně i vlhké povrchy vzhledem k jejich ochlazování při odpařování. Tepelná vodivost je závislá na specifické hmotnosti jednotlivých složek konstrukce, a proto jsou při termografii velmi dobře viditelné rozdíly mezi cihlou a maltou, zadržky otvorů a zdivo různého stáří nebo složení, omítkou skrytá kamenná ostění nebo ocelová či železná táhla, kleštiny, skryté betonové prvky apod.

Povrchovou teplotu můžeme měřit kontaktním způsobem, různými čidly a kontaktními teploměry, nebo bezkontaktním způsobem v infračervené oblasti pomocí termovizních kamer. Tento druhý způsob je mnohem efektivnější a v oblasti průzkumů památek se používá asi již třicet let.

Interpretace termogramů však vyžaduje určitou zkušenost a znalost materiálových charakteristik, popisujících zářivost, odrazivost a pohltivost. Hlavním referenčním parametrem je součinitel intenzity zářivosti, který se u stavebních materiálů pohybuje ve velmi úzkém pásmu hodnot mezi 0,85 až 0,95. Z toho plyne, že pro průzkum architektonického dědictví je třeba používat zařízení poskytující termogramy s vysokým rozlišením. Typický přístroj sestává z kamery převádějící infračervené záření na zesílený elektrický signál, dále zpracováváný do obrázků z výrazněných různou úrovní šedi nebo falešným obarvením.



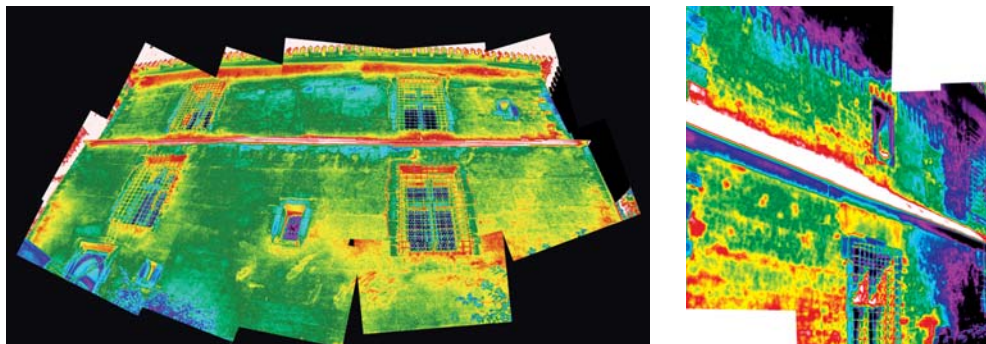
**OBRAZEK 173:** Příklady termogramů ostění dveří hradu Karlštejna v Mariánské věži. (Na obrázku je ukázáno, že naměřené termogramy vyžadují další úpravy dat pro získání kvalitních vizualizací.)

Povrchová teplota objektu samozřejmě nejlépe zobrazuje situaci na povrchu, ale je ovlivněna vlastnostmi a stavem materiálu v hloubce několika centimetrů, přibližně okolo 10 cm, pod povrchem. Rozlišujeme tzv. pasivní termografii, tj. takovou, která využívá přirozených rozdílů teplot mezi objektem a vnějším prostředím pro vznik tepelného toku, ovlivňujícího rozložení povrchových teplot, a aktivní (impulsní) termografií, která může mít ještě různé varianty. Při aktivní termografii je konstrukce lokálně zahřívána a sleduje se proces zahřívání nebo chladnutí (Laurens 1983).

Při vyhodnocování termogramů musíme mít na paměti, že do výsledného rozložení teplot se sčítají všechny parametry, které mohou povrchovou teplotu ovlivnit. Jedná se o tepelné technické charakteristiky přítomných materiálů, vnitřní defekty a dutiny, vlhkost, nerovnoměrné působení okolního prostředí (např. oslunění nebo zastínění a proudění vzduchu okolo objektu). Vlhkost je dále silně závislá na pórovitosti materiálu, jeho chemickém složení a na přítomnosti biofilmu, který obecně většinou vlhkost zvyšuje (Maierhofer a Leipold 2001).

Pro aplikaci je dobré vědět, že existuje prahová hodnota okolo 0,1 °C, která určuje mez, nad kterou naměřený rozdíl mezi povrchovou teplotou omítky a okolí indikuje problémy. V rámci grantového úkolu MK byl v minulých letech proveden dosti podrobný termografický průzkum Mariánské věže hradu Karlštejna. Jeho cílem bylo nalézt skryté stopy po stavebních úpravách a zejména prvky, důležité pro statický návrh probíhajících restaurátorských prací a oprav. Na termogramech je velmi dobře viditelné armování zdiva kamennými prvky pod stávající omítkou (např. **obr. 173a**). Potvrzuje se novost některých ostění gotických dveřních otvorů, neboť jejich kamenné prvky jsou opracovány bez přečnívajících do zdiva zavázaných částí (**obr. 173b**). Na tomto obrázku je zároveň velmi dobře vidět, že při vkládání nového ostění byla nově vyzděna část nadpraží. Na termogramu je dobře viditelná struktura kamenného zdiva včetně rozlišitelné vzdálenosti pracovních spár. Samozřejmě jsou výrazně zaznamenána místa se zvýšenou vlhkostí u podlahy a v koutech místností. Technologické a materiálové vlivy byly dobře rozpoznatelné i na termogramu fasády (**obr. 174**).

Dále bylo pod stropem v kostele identifikováno skutečné umístění železných táhel nad schodištěm do věže (**obr. 175**).



**OBRÁZEK 174:** Termogramy fasád s viditelnou strukturou zdiva pod omítkou, pracovními spárami zdění, doplňováním zdiva, kamennými ostěnými, umístěním táhel apod.

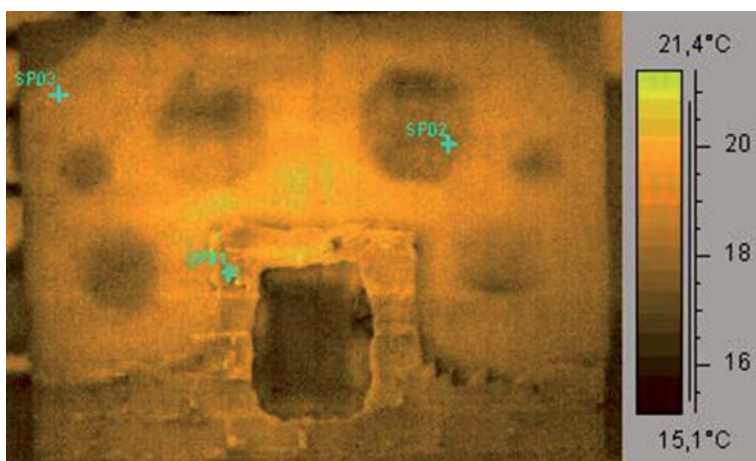


**OBRÁZEK 175:** Na termogramu dobře patrné umístění táhel ve zdivu kostela

Významným oborem aplikace termografie je diagnostika podpovrchových poruch. Analýza procesů oteplování a chladnutí nekovových těles při nebo po zahřívání vnitřním nebo vnějším zdrojem je teoreticky dobře propracována. Ve stavebnictví se většinou aplikace termografie omezovaly na pasivní variantu zjišťování tepelných mostů. Aktivní termografie je vhodná pro zjišťování defektů uvnitř málo vodivých materiálů, a proto byly zkoumány její možnosti při hledání uvolněných povrchových vrstev nebo hlubších podpovrchových defektů.



**OBRÁZEK 176:** Příprava modelové zdi se separačními fóliemi, které zabraňovaly kontaktu omítky se zdivem a tak modelovaly odtržení omítky nebo obkladu od povrchu (vlevo), zeď při omítání (střed) a kombinace omítky s obklady a mozaikou

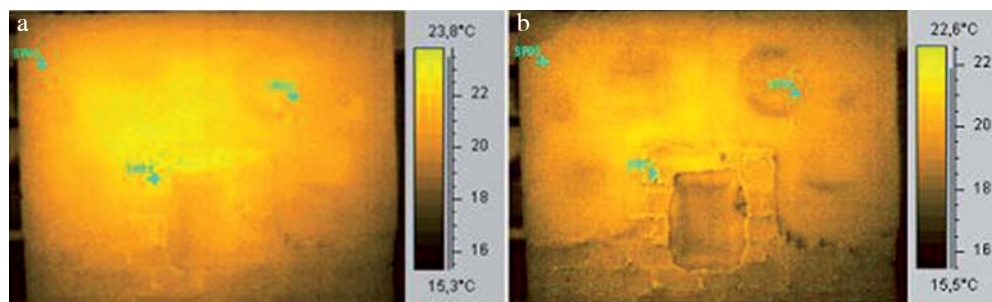


**OBRÁZEK 177:** Rozdělení teplot na vyhřáté zdi. Velmi dobře jsou vidět rozdílné vrstvy materiálu (spáry, lepicí omítka pod přilepenou deskou)

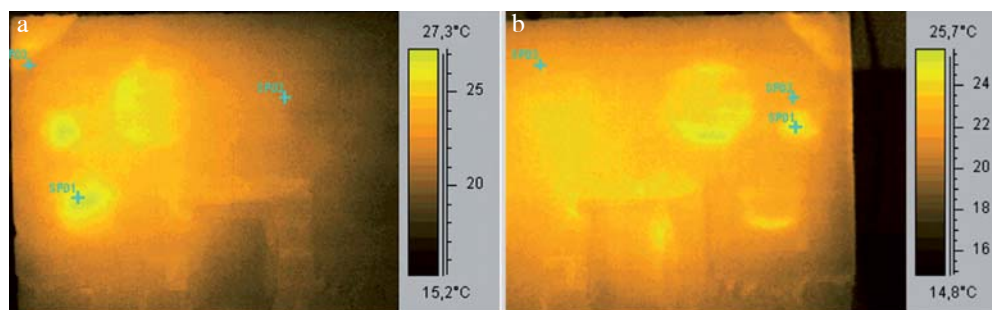
Pro tento výzkum byla pořízena modelová zeď s dobře definovanými defekty (**obr. 176**) a na ní se testovaly různé metody bezkontaktní diagnostiky poruch skrytých pod povrchem.

Při detekci poruch se nejlépe osvědčil postup, při kterém je prohřátá stěna vystavena rychlému chladnutí, např. po teplém dnu je vystavena večernímu chladu. Při chladnutí se velice výrazně projevují nejen podpovrchové defekty, ale většinou je zřetelně vidět i struktura zdiva, maltové spáry a jiné materiálové nehomogenity, **obr. 177** (Drdáček a Lesák 2006).

V tomto případě byla zeď předeřívána na maximální teplotu 24 °C po několik hodin a měření probíhalo při chladnutí. Části omítky, kryjící defekty, chladnou rychleji a projevují se tmavými skvrnami. Je obtížné zvolit okamžik měření pro dosažení maximálního efektu. Většinou se u běžně omítaného zdiva jedná o několik minut až přibližně hodinu. Čas je samozřejmě závislý na rychlosti ochlazování.



**OBRÁZEK 178:** Rozložení teplot na povrchu zdi s defekty přilnavosti omítky při počátku chladnutí (vlevo) a po hodině v laboratorním prostředí cca 20 °C (vpravo)

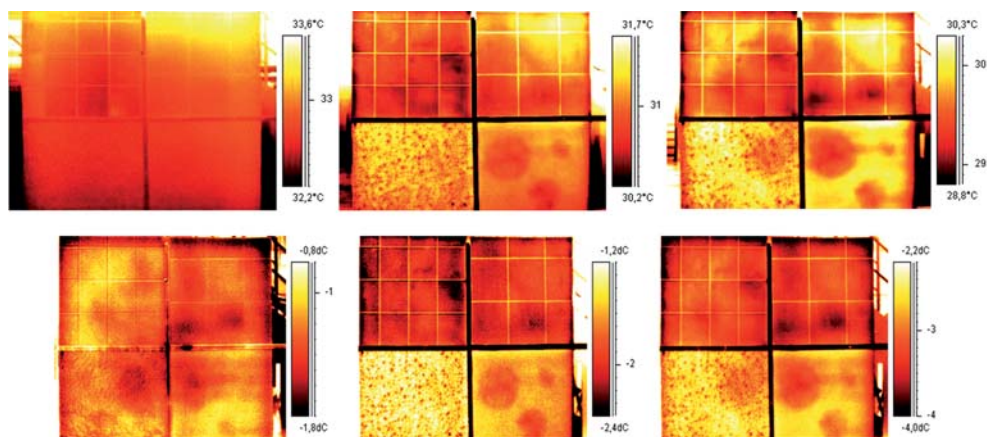


**OBRÁZEK 179:** Rozdělení teplot při zahřívání zdi (a). Na obrázku je vidět, že toto měření je silně ovlivněno úhlem normály povrchu vzhledem ke kameře. Zahřívání části s nastavovanou omítkou (b).

Vytvoření rozdílné povrchové teploty v omítce pevně spojené se zdívkem a omítce odtržené lze získat i lokálním zahříváním povrchu sálajícím zdrojem. To je ukázáno na **obr. 179**, kdy byla modelová zeď ohřívána lampou o výkonu 1000 W po dobu 2–3 minut. Zde se nejdříve zviditelnily trhliny a posléze i defekty. Při vyhodnocování je nutno uvážit, že při zahřívání je zobrazení nejteplejšího místa ovlivněno také odrazem tepla zdroje. Je tak možno kontrolovat, kam zdroj skutečně sálá. Defekty na zahříváné části se jeví teplejší než na nezahříváné, neboť z nich není odváděno teplo dovnitř zdi tak rychle jako z omítky pevně spojené se zdí (**obr. 179a** zachycuje část s vápennou omítkou, **obr. 179b** pak část s cementovou omítkou). Úhel sklonu povrchu silně ovlivňuje měření. Poslední dvojice obrázků ukazuje sekvenční změny obrazu teplot v průběhu chladnutí zdi po celonočním zahřívání.

Vyhřátá zeď na počátku chladnutí je ukázána na **obrázku 178a**. Rozdělení teplot je nevýrazně rozloženo, přesto můžeme rozeznat rozdílné materiály. Další **obrázek 178b** dokumentuje postup chladnutí a zvýrazňování defektů. Poslední fáze z této série byla již ukázána na prvním **obrázku 177**. K metodě je nutno poznamenat, že pořízení kvalitní termovizní kamery je velice nákladné, nicméně aplikace při měření je nenáročná, levná a při vhodné teplotě i neinvazní a bezpečná. Z obrázků je názorně vidět, že i citlivost je velmi dobrá.

U této metody je důležité znát vliv různé kvality a materiálu povrchu na její citlivost. Proto výzkum pokračoval na upravené modelové zdi, opatřené dalšími povrchy. Zároveň se zkoušela druhá varianta vyvolání skokové změny zahřívání zkušebního tělesa. Popisovaný

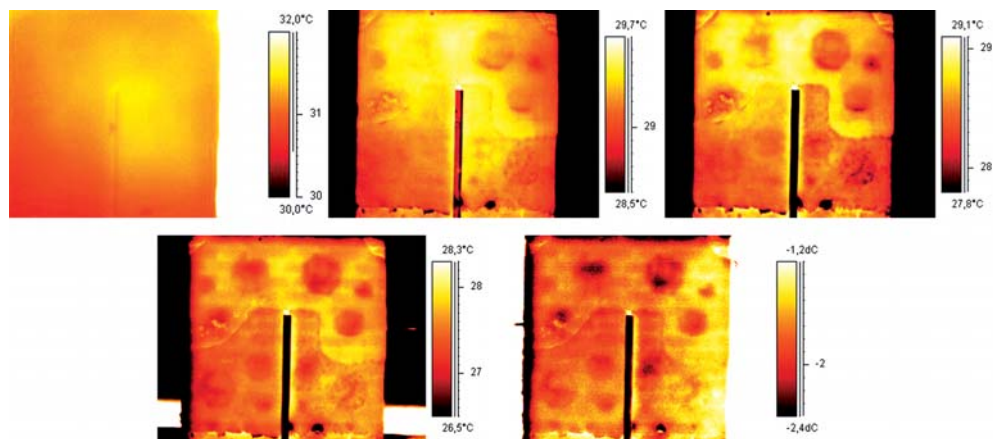


**OBRAZEK 180:** Rozložení povrchových teplot při postupném chladnutí zdi (nahore), rozdíly naměřených povrchových teplot při postupném chladnutí zdi (dolní řada)

experiment probíhal v letních měsících, kdy se denní teploty v laboratoři pohybovaly okolo 33 °C a zeď byla touto okolní teplotou prohřátá i ve večerních hodinách. V té době venkovní teplota klesla na cca 25 °C a bylo možno tohoto přirozeného rozdílu využít pro ochlazení zdi.

Na **obrázku 180** jsou ukázány výsledky měření na straně zdi s dalšími povrchovými vrstvami. Ochlazování probíhalo tak, že vyhřátá zeď byla umístěna v laboratoři před vjezdová vrata a ta byla ve večerních hodinách otevřena. Na zeď začal pronikat studený vzduch a měnil obrazec povrchových teplot. Při popisovaném experimentu bylo zaznamenáno rozložení teplot před zahájením ochlazování a je ukázáno na **obr. 180** vlevo nahoře. Ochlazování začalo ve 21.31 hod., další prezentovaný snímek byl pořízen po 6 minutách a poslední ve 22.14 hod. Snímkování probíhalo v intervalech 3 minut. Při pohledu na zeď vidíme v levé horní části bělinový obklad, pod ním mozaiku z kačírku, v pravé horní části keramický obklad a pod ním vápeno-cementovou omítku. V dolní řadě jsou prezentovány vypočtené rozdíly stavů z předchozího obrázku v pořadí: rozdíl mezi druhým a prvním stavem, mezi posledním a druhým stavem a mezi posledním a prvním stavem. Měření má vysokou citlivost a přesnost určení velikosti, tvaru a umístění defektů přilnavosti omítky.

Druhý líc zdi s původními obrazci defektů a dalšími dvěma typy povrchů byl zkoušen po týdnu po otočení zdi zkoušenou stěnou k vratům laboratoře. Ochlazování začalo ve 20.01, druhý snímek byl pořízen ve 20.04, třetí ve 20.07 a poslední ve 20.55 hod. Rozložení teplot při počátku chladnutí a po tříminutových intervalech je prezentováno na **obr. 181**, kde je i výsledný stav přibližně po hodině a rozdíl mezi posledním a druhým stavem. Při pohledu na zeď vidíme v horní části původní omítkové vrstvy, v dolní části nově pořízené vrstvy sádrové štukové omítky (vlevo) a hliněné omítky s řezankou (vpravo). Po vychladnutí se zvyrazňují černými skvrnami otevřené nespojitosti – trhliny, které nejsou na počátku patrné. Dále je na posledním termogramu velmi dobře vidět i struktura zdva (cihly a spáry) pod omítkou. Měření ruší povrchové defekty, např. v levé horní polovině u středního puchýře světlé skvrnky, které však lze snadno odlišit od hledaných vad odtržené omítky.



**OBRAZEK 181:** Rozložení teplot při chladnutí zdi, snímáno v intervalu 3 minut (horní řada), výsledné rozložení teplot na povrchu zdi (vlevo dole) a rozdíl oproti počátečnímu stavu (vpravo dole)

Aktivní termografie, někdy též nazývaná impulzní termografie, je velmi vhodná pro zjišťování podpovrchových dutin do hloubky několika centimetrů. Měření je závislé především na fyzikálních charakteristikách materiálu povrchové vrstvy i podkladu, dále pak na kvalitě povrchu, zejména jeho odrazivosti. Spolehlivé výsledky lze získat na omítaných površích libovolného typu, pokud nejsou příliš hlazené (umělý kámen). Měření je velmi obtížné na kamenných mozaikách a všech typech obkladů. Výše uvedené příklady však ukazují i zde slušnou citlivost, kromě lesklého bělninového obkladu. Termografie v jakékoliv variantě (pasivní nebo aktivní) je obecně vhodnější pro zjišťování delaminace povrchových vrstev než jiné metody především z hlediska jednoduchosti a rychlosti měření a jeho ceny.

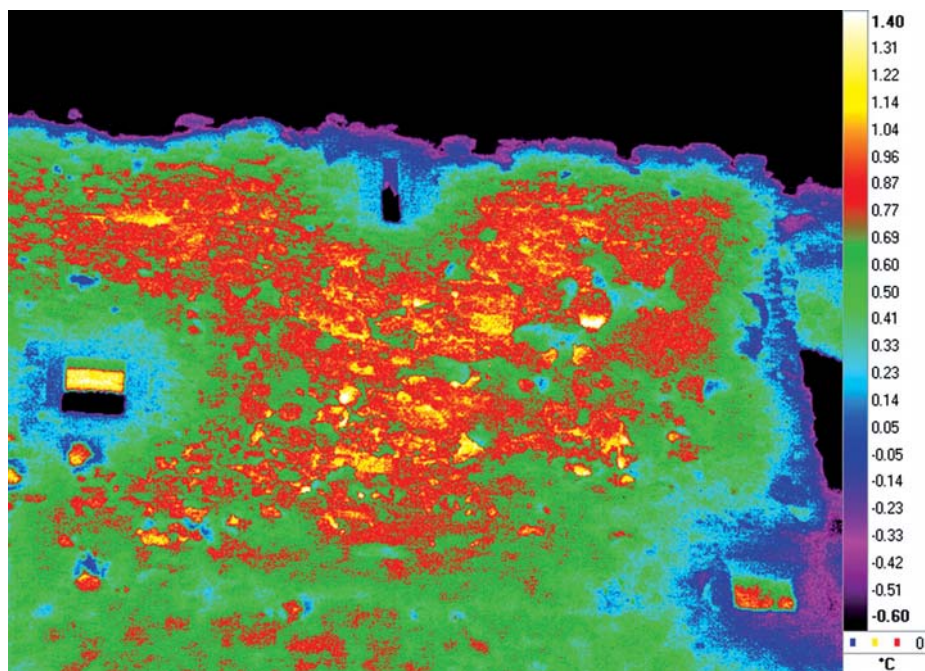
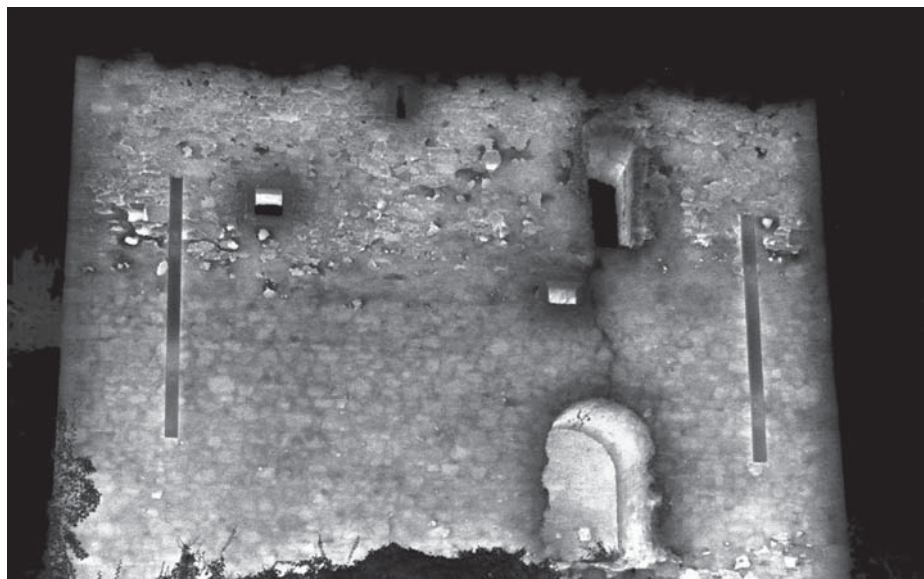
Interpretace měření vyžaduje zkušenost a důsledné pořizování dokumentace povrchové kvality, nejlépe pomocí normální fotografie. Nedostatečně prozkoumaný problém představuje vliv vlhkosti, která může výrazně měnit obraz rozložení teplot (Li et al. 2000).

Využití přirozené fluktuace teplot během dne je vhodný způsob dosažení teplotního rozdílu pro měření. Nicméně, ve venkovním prostředí vyžaduje vhodné počasí a zejména v chladných měsících mohou nastat problémy s realizací takového měření. **Obr. 182** ukazuje příklad měření na zřícenině Hollenburg v Rakousku na začátku zimy, kdy po teplých dnech přišly první ranní mrazy. Druhý den již byla kamenná zeď tak vychlazená, že nebylo možno dosáhnout kvality tohoto snímku. Výsledný snímek je sestaven z devíti záběrů, protože prostorový úhel snímání termokamery je velmi malý a nezabere celý objekt. Dokonalá montáž s vyrovnáním teplot vyžaduje vlastním softwarem podpořenou úpravu dat.

## Radiografie

Nedávný vývoj nových lehkých pulsních rentgenů napájených baterií a průmyslová výroba fosforových desek pro záznam rentgenogramů výrazně zvýšily využitelnost této nedestruktivní metody pro diagnostiku stavebních konstrukcí. Nízkovýkonové rentgeny jsou velmi bezpečné a mají dostatečnou razanci pro vyšetřování dřevěných konstrukcí. Uvedme vybrané možnosti aplikací při výzkumu historických dřevěných staveb a prvků.





**OBRÁZEK 182:** Termogram stěny zříceniny se zviditelněním charakteru zdiva zakrytého omítkou (na-  
hoře), detail měření s barevným zvýrazněním rozdílu teplot (dole)

Elektromagnetické záření známé jako rentgenové záření (též paprsky X) je tvořeno tokem fotonů a vzniká při nárazu elektronů, pohybujících se vysokou rychlostí, na překážku. Při pronikání rentgenových paprsků látkou dochází k řadě interakcí, které ovlivňují

jejich průchod materiálem a záření pohlcují. Zeslabení rentgenového záření závisí na fyzikálně-chemickém složení látky, přibližně na její měrné hmotnosti a na tloušťce prozařovaného materiálu.

Při rentgenové diagnostice je intenzita záření po průchodu tělesem vhodným způsobem zviditelněna a zaznamenána. Tradičně se používá osvit filmu nebo zviditelnění záření na světlélkující matnici. První způsob je velmi pracný, druhý velmi obtížně použitelný při diagnostice staveb, přestože jeho nespornou výhodou je možnost přímého pozorování prozařovaného objektu. Dalšími zobrazovacími technikami jsou počítačová radiografie, využívající připojení na videosystém, a fotografie na polaroidní filmy.

Převratnou techniku přináší fosforové záznamové zařízení, které umožňuje opakovaný záznam a snadnou digitalizaci obrazu. Desku tvoří velmi tenká vrstva fosforových krystalů, vzájemně spojených a nanesených na ohebnou plastovou podložku. Fosforové krystaly pohlcují a uchovávají energii rentgenového záření ve formě skrytého obrazu. Množství pohlcené energie je úměrné intenzitě rentgenového záření, kterému byly krystaly vystaveny. Uložená energie je pak z krystalů uvolňována pomocí ozáření červeným laserem. Krystaly se dostanou do nestabilního stavu a vyzařují modré viditelné světlo při přechodu do základního stabilního stavu. Toto světlo je zaznamenáno skenerem a pomocí jeho programové výbavy převedeno do obrazů, které mohou být dále zpracovávány.

Záznamové desky nejsou při čtení ve skeneru<sup>1</sup> plně smazány a některé krystaly stále zadržují určitou energii. Tato informace může být zcela vymazána vystavením desky působení denního světla. Při několikrátěřinové manipulaci s exponovanou deskou, tj. při jejím vkládání do skeneru, není ovlivněna kvalita rentgenogramu. Po smazání předchozí informace může být záznamová deska znovu opakovaně používána. Fosforová deska se dodává ve dvou rozměrech: 20,3 × 25,4 cm a 20,3 × 43,2 cm s rozlišením 300 DPI a je uložena v plastovém obalu. Obrovskou výhodou fosforové desky je její malá tloušťka a ohebnost, což umožňuje rentgenovat objekty ve velmi stísněných podmínkách, např. trámy těsně probíhající okolo zdí.

Pro ozařování je výhodně používán nízko-výkonový pulzní laser XR200 dodávaný firmou Golden Engineering, Inc. Přístroj má velikost cca 32 cm × 12 cm × 19 cm a váží 5,4 kg. Je schopen produkovat 25 pulzů za vteřinu o délce 60 nanosekund. Velikost zdroje záření je okolo 3 mm a maximální energie fotonů 150 KVP. Rentgen je napájen baterií s kapacitou 4000 pulzů. Obsluha rentgenu je velice jednoduchá. Po vložení nabitě baterie se nastaví počet potřebných pulzů a provede ozáření dálkovým spouštěčem. Rentgenogram je možno získat výše popsáním způsobem na EPIX skeneru nebo na připojeném video systému. Také lze použít Polaroid pro expozici filmu a získat obrázek přibližně během dvou minut.

Typická sestava měření v terénu je uvedena na **obrázku 187**, kde je napravo od vazby rentgenový zářič a na styčnicku krovové vazby je upevněna záznamová deska. Příslušný rentgenový obrázek je uveden na **obr. 187** uprostřed, vlevo pak pseudobarevné zvýraznění hnilobou poškozené krokve. Na obou záznamech jsou dobře viditelné zbytky hřebů z odstraněného bedněního krovu.

<sup>1</sup> Obvykle se používá EPIX skener, který má přibližné rozměry 40 × 50 × 27 cm, váží 15 kg, jeho příkon je max. 100 W a pomocí kabelu USB může být propojen s počítačem, který by měl mít následující minimální konfiguraci: Pentium CPU 1,0 GHz, 256 MB RAM, Display 24-bitový s rozlišením 800 × 600, O.S. Windows 2000 nebo XP a harddisk s minimálně 5 dedikovanými GB.

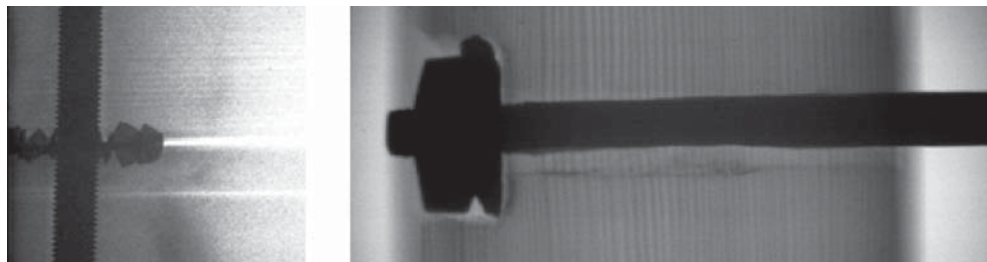
Tradiční rentgenografie užívající film a vysokoenergetický zdroj rentgenových paprsků se používá pro průzkum stavebních konstrukcí již od 2. světové války. Zkoušky betonových konstrukcí pomocí záření gama byly v ÚTAM AV ČR prováděny již v roce 1944, dlouho před aplikacemi v cizině (Hacar a Waitzman 1944) a další radiografické aplikace byly v tehdejší ČSR široce rozvinuty již v polovině padesátých let (Hönig a Zapletal 1982). Užití radiografie v památkové péči je z důvodu bezpečnosti a nákladnosti méně rozšířené. Použití bránilo také to, že klasická zařízení byla velmi těžká a obtížně dopravitelná do prostor historických objektů, kde se vyskytují problémy, které je třeba řešit. V současné době je většina těchto nevýhod odstraněna a jak již bylo řečeno výše, rentgenové paprsky vyzařované z tradičních vysokoenergetických elektromagnetických zdrojů radiace jsou schopny proniknout většinou materiálů užívaných ve stavebnictví. V závislosti na materiálových vlastnostech objektu určeného k inspekci se vytváří fotografie, která odráží hustotu, tloušťku, absorpci energie a chemické vlastnosti materiálu. Současné digitální technologie v reálném čase nebo kvazireálném čase nabízí významné výhody pro hodnocení historických konstrukcí vzhledem k tradičním rentgenovým technikám. V památkové péči se rentgenové metody užívaly sporadicky od sedmdesátých let (Anthony et al. 2003). Příklady využití jsou poučné i pro dnešního čtenáře.

Před rozvojem digitální radioskopie používali výzkumníci pro zkoumání historických konstrukcí vysokoenergetické rentgenové zdroje. Hart (1974) užíval rentgenových paprsků pro analýzu konstrukce tzv. Narbonne House v Salemu v Massachusetts. Cílem průzkumu bylo zjistit přítomnost a uspořádání ztužení stěn, pokud možno odhalit původní okenní rámy a určit, zda některé z rámu tvořily původní obvodovou stěnu. Využil přenosný generátor rentgenových paprsků a kameru Polaroid pro terénní průzkum. Práce úspěšně odhalila uspořádání skrytých konstrukčních ztužidel. Dále tento postup ukázal typ spojovacího materiálu a také to, že dřevo nevykazuje známky poškození. Průzkumem obvodových stěn Hart ukázal, že se nezachovaly žádné původní okenní rámy. Poslední otázka, týkající se původní funkce rámu v obvodových stěnách, nemohla být zodpovězena z důvodu přestavby a omezeného přístupu zařízení ke konstrukci.

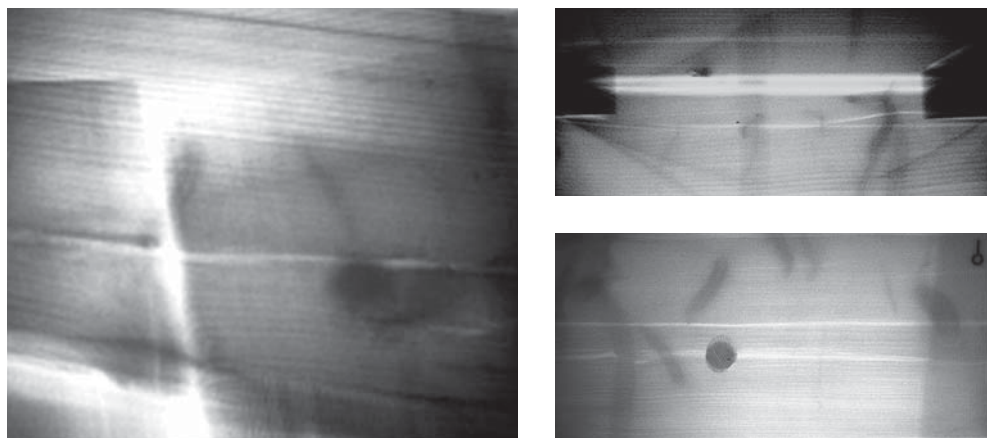
Aplikace rentgenových paprsků při průzkumu tzv. House of Seven Gables byla popsána Wrennem (1976). S využitím práce Davida Harta diskutoval Wrenn přínosy použití rentgenu pro hodnocení stavu dřevěných konstrukcí historických budov. Schopnost určit stav materiálu i stavby bez nutnosti vstupu do konstrukcí byla shledána jako nejvýznamnější výhoda. Nicméně Wrenn poznamenal, že technika je omezena nemožností přímého průchodu rentgenových paprsků objektem s pořízením nerušeného obrazu.

Zájem o stavbu haly typu de l'Ormeova dómu v Monticello podle návrhu Thomase Jeffersona vedla k rentgenovému průzkumu popsanému Harnsbergerem (1981). Pro záznam rentgenových obrazů střechy haly byla použita Polaroid kamera. Přenosný zářič byl umístěn na trojnožce pod stropem haly a přijímač signálu nad střechou haly. Rentgenová inspekce odhalila typ a rozmístění spojovacích prvků, užitých v dřevěných žebrech podporujících kupoli. Průzkum umožnil interpretaci Jeffersonova použití de l'Ormeova inovačního dřevěného rámového systému.

Diskuse užití radiografie v památkové péči je dostupná též v knize Langa a Middletona (1997). Je zde uvedeno několik příkladů aplikací na dřevo, ale i použití radioskopie pro jiné materiály typické pro umělecké a hmotné památky kulturního dědictví ukazuje na silný aplikační potenciál v oblasti dřeva. Např. stereoradiografie poskytující trojrozměrné obrazy objektů je slibná pro mapování konfigurací skrytých styčníků dřevěných konstrukcí a artefaktů (Halmschaw, 1995). Digitální zobrazování v reálném čase pomocí radioskopie se ideálně hodí pro tyto aplikace.



**OBRÁZEK 183:** *Zazubená hmoždinka (vlevo), korodovaný svorník s viditelným otlacením dřeva (vpravo)*



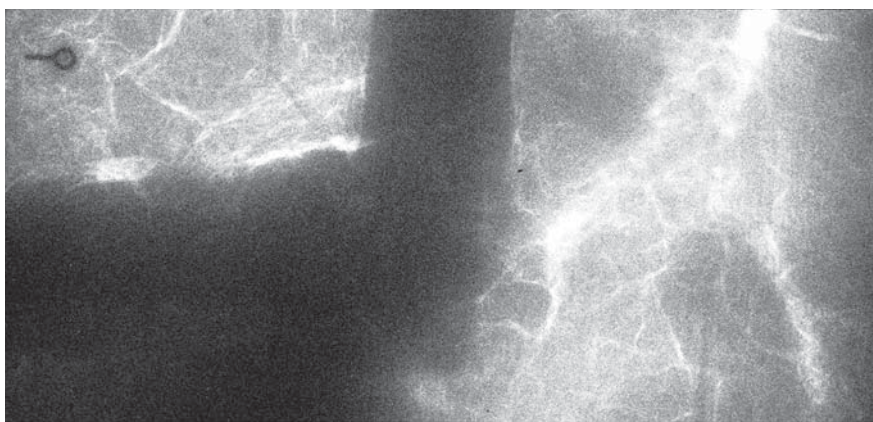
**OBRÁZEK 184:** *Rentgenogram styku sloupku, příčle a krokve rámové vazby ve věži Jakobínce – hrad Rožmberk (vlevo), půdorysný a boční pohled na plátový spoj s dřevěnými kónickými hmoždíky a zajišťovacím kolíkem po porušení styku (viz viditelné trhliny)*

Radiografie může být využita pro určování míst a rozsahu poškození dřeva biologickými škůdci – hmyzem a hnilobou. V rámech historických uměleckých děl byla hledána přítomnost dřevokazných hub a poškození hmyzem (Lang a Middleton, 1997). Tento způsob vyšetřování dosud nebyl využit na dřevěných konstrukcích užitím radioskopie. Úspěšnost tradičního rentgenového zobrazování pro tyto aplikace je příslibem pro digitální radioskopii při plném využití možností a omezení této technologie. V poslední době se rozvoji metody v USA věnuje R. Anthony et al. (1999), který s autory úzce spolupracoval na výzkumu diagnostiky historických dřevěných konstrukcí. V rámci společného česko-amerického projektu zaměřeného na zkoušení historického dřeva a diagnostiku dřevěných konstrukcí byl autory a jejich spolupracovníky proveden rentgenový průzkum několika českých a moravských historických dřevěných objektů a laboratorní testy v ÚTAM AV ČR. Několik typických příkladů slouží k ilustraci možností radiografie v oblasti dřevěných konstrukcí.

Klasickým technickým použitím rentgenu je nedestruktivní kontrola spojovacích prvků a spojů. U dřevěných konstrukcí je snadné zejména zjišťování kovových spojovacích prvků. Rentgenováním můžeme odhalit typy spojovacích prvků a jejich účinnost, deformaci či korozní poškození (**obr. 183**).



**OBRÁZEK 185:** Rentgen styku sloupku a překlada dřevěné zárubně pod nátěry vápnem (Trstenice). Dobře je patrné zapuštění vodorovných dřev roubené stěny do sloupku zárubně (vlevo). Rentgenovaná zárubeň v Čisté (vpravo). Dřevo zárubně i roubenice je skryté pod vrstvami vápenných pačoků.



**OBRÁZEK 186:** Obraz dřevěného rámu zazděného v hliněném zdivu (Čistá)

Rozdílnost hustoty letního a zimního dřeva umožňuje zaznamenat vzájemně se křížící prvky, což se využívá při zkoumání styků (**obr. 184a**) nebo polohy či stavu dřevěných hmoždinek a spojovacích či zajišťovacích kolíků a trnů (**obr. 184b**).

Rentgenování umožňuje sledovat způsob porušení a průběh trhlin uvnitř dřevěných prvků (**obr. 184**). Metoda byla použita pro zkoušky a porovnání chování spojů provedených na základě tradičních tesařských technologií (podkosené plátování, dřevěné hmoždíky a spojovací kolíky) se spoji, užívajícími moderní ocelové spojovací prvky – svorníky se zazubenými hmoždinkami.



**OBRÁZEK 187:** *Uspořádání rentgenového měření v krovu kostela sv. Anny v Praze (vlevo) – na krokvi je snímač záření (černá deska), z druhé strany záříč. Snímky dále ukazují rentgenový záznam snímané krokve (uprostřed) a místa na jiné krokvi s nalezenou hnilobou (vpravo) po barevném zvýraznění intenzit procházejícího záření.*

Velmi významná je možnost studia provedení skrytých tesařských spojů, zejména stavu dlabů a čepů. Pro stavebně historické průzkumy je důležité, že takové studium je možno provádět i bez obnažení dřevěného prvku zakrytého vrstevami vápenných nátěrů nebo omítky či dokonce zazděného (**obr. 185, 186**).

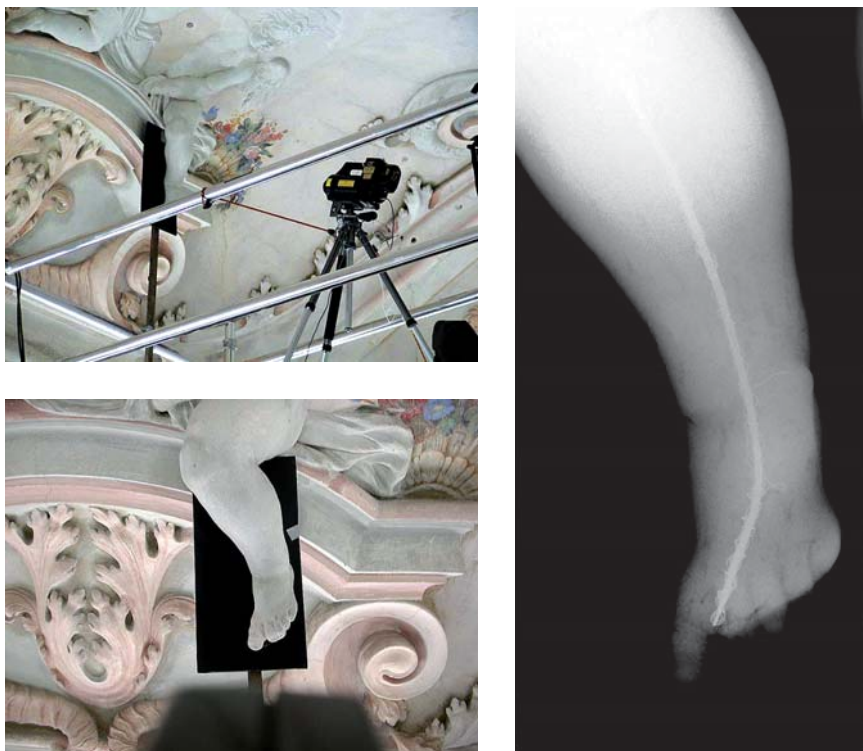
Jednou z nejdůležitějších vlastností této metody je schopnost rozpoznávat rozsah částí narušených hnilobou nebo jinou degradací, vzhledem k výrazné změně hustoty (**obr. 187**).

Byly činěny i pokusy s rentgenováním masivnějších konstrukcí, např. kamenného zdiva o tloušťce 250 mm a kamenných prvků gotického opěráku chrámu Sv. Barbory v Kutné Hoře. Výkonově však tyto bezpečné rentgeny pro podobné úlohy nedostačují. Výkon je dostatečný pro měření menších kamenných nebo betonových plastik či štukové výzdoby (**obr. 188**). Rentgenová diagnostika má široké možnosti využití v oblasti záchrany památek i restaurování. Přenosné rentgeny jsou dostatečně citlivé k odhadu rozsahu poškození i u subtilních konstrukcí, např. podhledových prken, která lze prozařovat i přes vrstvu omítky (**obr. 189**).

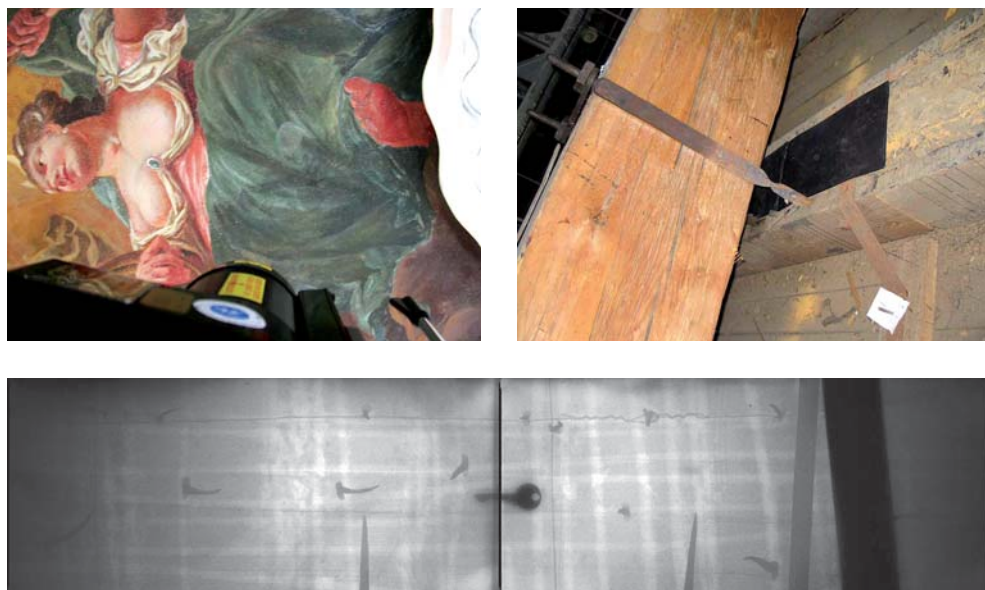
### Dynamická identifikace podpovrchových poruch omítek

Při ztrátě soudržnosti povrchové vrstvy s podkladem se výrazně mění její ohybová tuhost. Odtřžená nebo odchlíplá vrstva („puchýř“ omítky) je mnohem měkčí než vrstva plně lnoucí k podkladu. Tato vlastnost vede k rozdílnému pohybu povrchových vrstev při kmitání objektu. Pevně spojená část sleduje frekvence a rychlosti kmitání celého objektu (tělesa), uvolněná vrstva kmitá s rozdílnou frekvencí i rychlostí. Uvedené projevy jsou měřitelné a využívané při optickém vyšetřování ztráty soudržnosti povrchových vrstev bezkontaktními metodami. Nejzajímavějších výsledků je dosahováno pomocí měření rychlosti kmitání laserovým dopplerovským interferometrem. Toto zařízení může monitorovat povrch objektu z relativně velkých vzdáleností – bez speciálních úprav ze vzdálenosti několika metrů – a poskytuje údaje o rychlosti pohybu povrchu v rozsahu do řádu 1 MHz. Skenování pak usnadňuje měření na větších plochách a přiřazuje k údaji o rychlosti kmitání také údaj o poloze bodu na měřeném objektu. Prostorové dosažitelné rozlišení je pro běžné vzdálenosti možné okolo 1 mm.

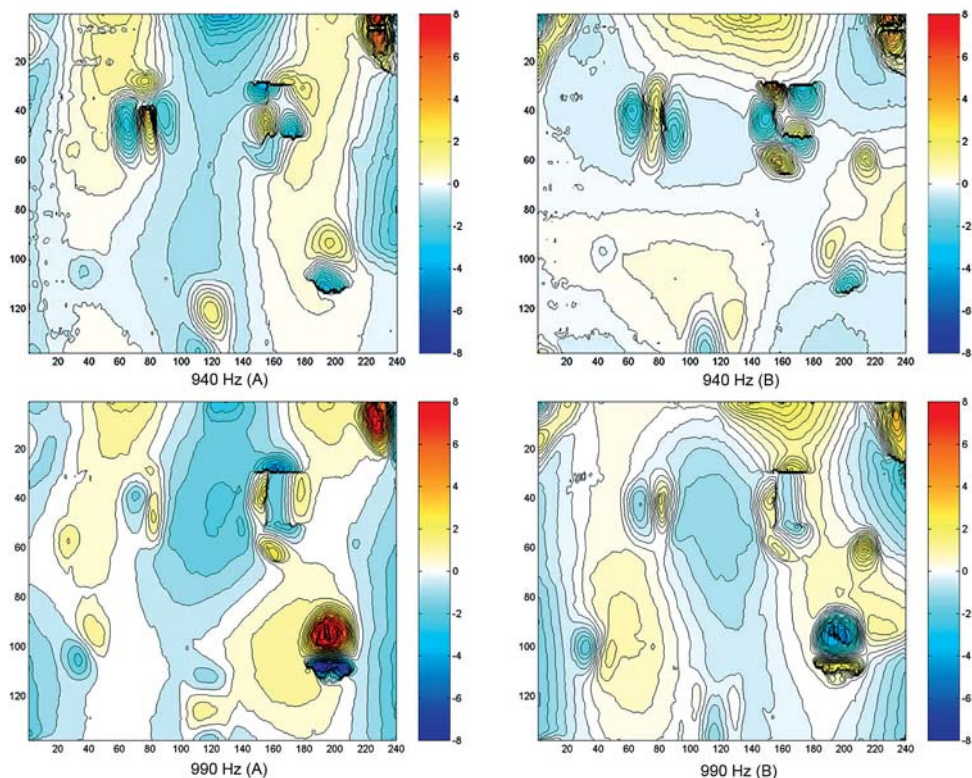
Princip metody spočívá v rozkmitání povrchu zkoumaného objektu a měření rychlostí kmitání jednotlivých bodů povrchu pomocí speciálního skenovacího laserového interferometru.



**OBRÁZEK 188:** Příklad zkoumání způsobu vyztužení nohy andílka na zámku Veltrusy



**OBRÁZEK 189:** Příklad rentgenového snímku malovaného stropu s dobře viditelným vyztužením omítky pletivem, roztečí připevňovacích hřebíků i biodegradací prkna (zámek Veltrusy)



**OBRAZEK 190:** Tvary kmitání povrchové vrstvy omítané stěny s defekty

Pro aplikaci na omítky jsou rozvíjeny dvě varianty, které se zásadně liší pouze způsobem vybudování kmitání měřeného objektu.

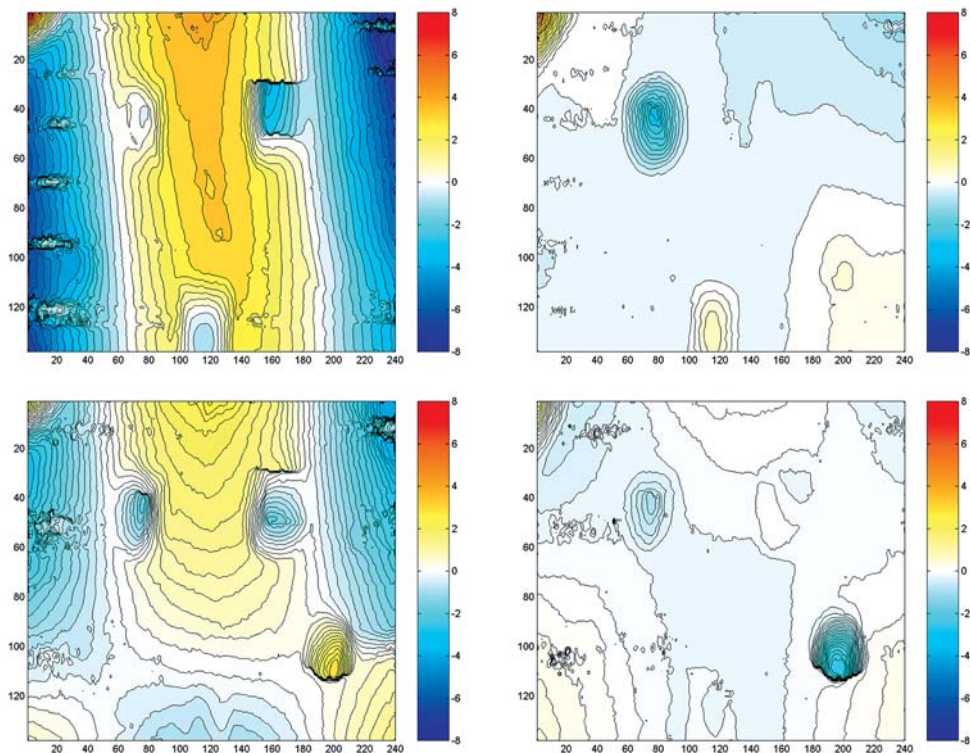
Na univerzitě v Anconě (Itálie) se používá pro buzení akustických budičů. Jedná se o silné reproduktory s usměrněním zvuku pomocí eliptických nebo parabolických reflektorů. Akusticky rozkmitaný povrch je pak opticky proměřován bod po bodu a výsledky zpracovány do mapy rychlostí kmitání povrchu. Frekvenční spektrum vysílaných zvukových signálů se v každém měřeném bodě spojitě mění a hledáme frekvenci, která vyvolá rezonanci defektní části povrchu. Je zřejmé, že tento způsob měření je velmi pomalý, neboť předem neznáme kritické frekvence a musíme proto v každém bodě projít celé rozumné spektrum. Metoda byla vyzkoušena i při měření na reálných konstrukcích (Castellini et al. 1996, 1999).

Na pracovišti autorů byla studována varianta této metody při aplikaci mechanického rozkmitávání stěny s poškozenou omítkou (Drdácký et al. 2001, Drdácký a Lesák 2006). Pozornost byla soustředěna zejména na poznání vlivu fázového posunu na citlivost metody a na studium vlivu různých povrchů a materiálů omítek. Tyto experimenty byly prováděny na výše uvedené zděné cihelné stěně s modelovými defekty.

Obraz kmitání zdi s omítkou byl měřen pomocí skenovacího laserového čidla (kamery), využívajícího Dopplerova jevu.

Reprezentativní výsledky jsou uvedeny na **obrázku 190**. Obrázky označené A a B ukazují tvary kmitání celé soustavy při frekvenci odpovídající maximální amplitudě rychlosti





**OBRÁZEK 191:** Kmitání povrchu vyztužené zdi při frekvencích 270 Hz (nahore) a 370 Hz (vlevo) a fázovém posunu  $90^\circ$  (pravý sloupec)

kmitání, zjištěné většinou v horním rohu cihelné stěny, přičemž tvar B odpovídá fázovému posunu o  $90^\circ$ . Je vidět, že viditelnost defektů je silně závislá na fázi, zejména u menších vad. Detailní měření defektu s výraznými trhlinami (největší vada na vápeno-cementové omítce vpravo dole) ukazuje, že při určitých tvarech kmitání stěny s omítkou a určité fázi se trhliny vůbec neprojeví. To na jedné straně komplikuje měření, na druhé straně dává lepší naději na zjištění defektů.

Při výše popsaných experimentech bylo poměrně snadné rozkmitat stěnu nesoucí omítku. Vznikla proto otázka, jak se situace změní při větší tuhosti zdi. Dále bylo třeba prozkoumat vliv různého povrchu na měření. Modelová zeď byla proto opatřena dalšími vrstvami omítky a obkladů – tvrdší vápennou omítkou se sádrovým štukem, hliněnou omítkou s řezankou, keramickým obkladem, bělninovým obkladem, kamennou mozaikou a vápeno-cementovou omítkou (viz výše). Tyto vrstvy zpevnily cihelnou zeď tak, že nebylo možné dosáhnout jejího rozkmitání ve stejných frekvencích jako v prvním případě. Opět byl zkoumán vliv fáze na detekci defektů. Výsledky jsou uvedeny na **obrázku 191**. Když je porovnáme s **obr. 190**, vidíme, že při podobných frekvencích je možné naměřit podobné efekty, nicméně rychlosti kmitání jsou výrazně menší a některé defekty vůbec nebyly zjištěny.

Metoda měření rozdílného kmitání uvolněných částí omítky na zdivu mechanickým rozkmitáváním nosiče a bezkontaktním měřením pomocí laserového dopplerovského interferometru je časově i finančně náročná a je třeba měřit s různou fází. Její citlivost je silně závislá



**OBRAZEK 192:** *Uspořádání měření při poloautomatickém akustickém trasování (vlevo) a výsledek hledání pod povrchových defektů (plochy se světlými body vpravo)*

na tuhosti nosiče i samotné omítkové vrstvy. Její praktická aplikace je omezená a vhodná spíše pro průzkum delaminace povrchových vrstev na menších objektech, lehkých dřevěných nebo hrázděných stěnách nebo dřevěných „klenbách“, případně na volně stojících cihelných zdech. Varianta, která akusticky budí pouze uvolněné části omítky, je citlivější a má širší uplatnění.

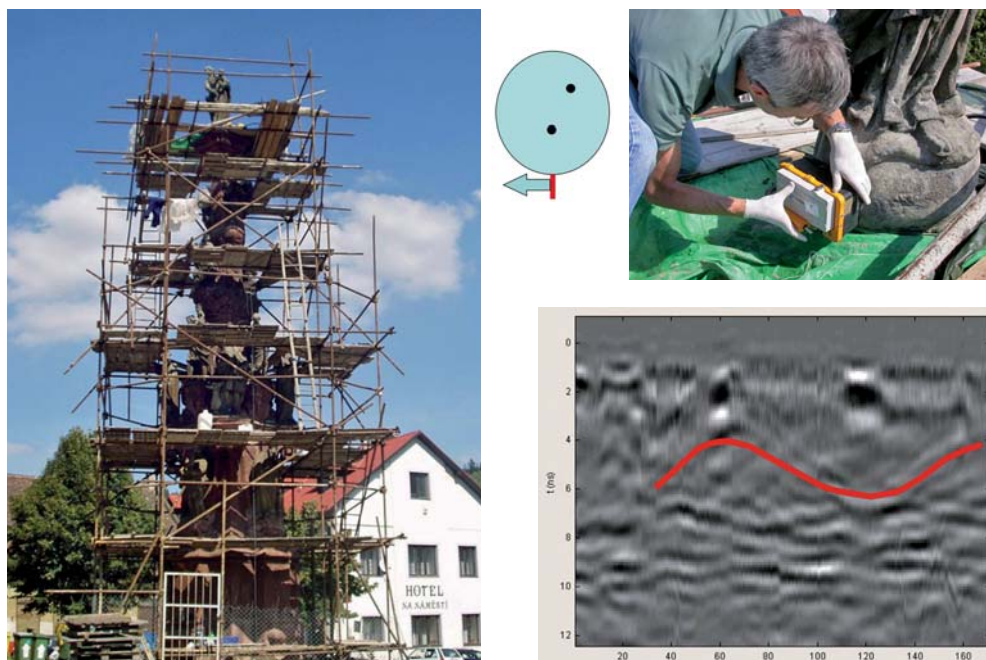
### Poloautomatické akustické trasování

Metoda využívá záznamu a analýzy akustického signálu generovaného poklepem na povrch konstrukce v husté síti bodů. Signál i místa poklepu jsou zaznamenávána videokamerou, což umožňuje automatické vyhodnocení souřadnic měřeného místa a odstraňuje nevýhodu klasického akustického trasování, kdy je třeba změny odezvy zakreslovat na povrch nebo měřit a vynášet do výkresu či fotografie (**obr. 192**). V primitivní variantě se signál rozdílné odezvy může vyhodnocovat operátorem přímo na místě a zaznamenat do zvukového snímku. Složitější vyhodnocení odezvy analýzou zaznamenaných signálů je popsáno v literatuře a doprovozeno podrobně vysvětlujícími obrázky (Drdácký a Lesák 2006, Skłodowski et al. 2013).

### Radar

Metoda je známá pod různými názvy – georadar, GPR (zkratka z angl. Ground Penetrating Radar), mikrovlnný radar, zemní radar a další. Je založena na registraci odražené energie vlnění od anomálie v prostředí, do kterého jsou vlny vysílány. Data jsou většinou analyzována v časové dimenzi. Elektromagnetické vlny prochází i vzduchem na rozdíl např. od ultrazvukového signálu a metoda tudíž poskytuje údaje i po vzniku trhlin nebo dutin. Název pochází z první aplikace při archeologických průzkumech v roce 1975 (Conyers a Goodman 1997). Dnes radarová diagnostika patří mezi důležité metody nedestruktivního průzkumu zděných konstrukcí a podloží (Maierhofer et al. 2001).

Georadar je přístroj využívající radarový signál k průzkumu a následnému zobrazování vnitřní struktury pod zkoumaným povrchem. Je to geofyzikální metoda, kterou lze využít pro celou škálu nedestruktivních průzkumných úkolů od zakládání staveb, archeologii po detailní průzkum pod povrchových defektů staveb. Základním principem měření je pulzní (< 1 ns) vysílání elektromagnetických vln, které prochází daným prostředím (zkoumaným materiálem). V inženýrských aplikacích se využívá frekvencí v rozsahu od 300 MHz do 2,5 GHz.

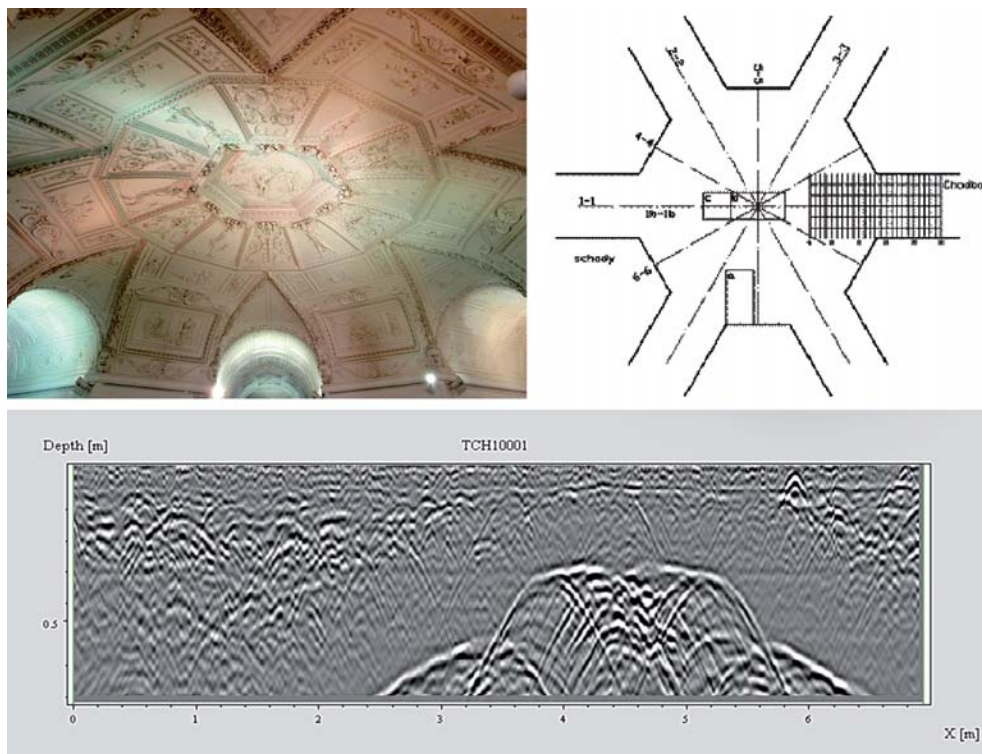


OBRÁZEK 193: Příklad hledání spojovacích trnů v mariánském sloupu

Odražené složky jsou anténou zpětně přijímány a vyhodnocovány. Odražený paprsek se mění, pokud prochází prostředím, kde se mění permitivita (např. rozhraní kámen–vzduch) a vodivost (např. přítomnost železných spojovacích prvků). Měřeným parametrem je čas. Pokud je známa rychlost šíření vln v daném materiálu, pak lze určit hloubku, kde dochází ke změně či odrazu signálu. Při měření se nejčastěji využívá pohybu antény po přímce v rovině povrchu. Pokud je v materiálu předmět (popř. dutina, nehomogenita atd.), od kterého se odráží vlny, pak při přibližování antény dochází ke zkracování vzdálenosti určující jeho hloubku a při oddalování následně k prodlužování této vzdálenosti. V radarogramech vytvářejí tyto odrazy hyperboly. Pro následnou interpretaci a lokalizaci nálezů je nutné znát pozici antény během měření. Posuv antény je zaznamenáván např. kolečkem, které měří lineární vzdálenost od počátečního bodu. Měření většinou probíhá v předem navržené rastrové síti.

Anténa je v kontaktu s povrchem zkoumané konstrukce, po kterém se pohybuje a vysílá elektromagnetické vlny v jednotlivých pulzech. Vyslaný signál se částečně odráží na rozhraní materiálů s rozdílnými dielektrickými konstantami ( $\epsilon$ ) a částečně prochází dál. Odražený signál je zachycen anténou. Ve většině případů je vysílač i přijímač umístěn do jednoho obalu, zjednodušeně nazývaného anténa.

Pro zobrazování odraženého signálu je zásadní jeho intenzita v závislosti na čase (tzv. A-snímek, A-scan). Zaznamenaný A snímek v různých pozicích antény vytváří obraz zvaný radarogram neboli též B-snímek. Intenzita přijímaného signálu je zde převedena na stupně šedi, popř. je zobrazena barevnou škálou. Signál může být dále upravován a filtrován pro upřesnění počátku povrchu nebo odstranění šumů. Počítačově lze souběžně B-snímky převést na trojrozměrné modely a vytvořit tak příčné C-snímky.



**OBRAZEK 194:** Radarový průzkum skladby klenutého stropu v hlavním sále letohrádku Hvězda

Aplikaci uvedme na několika příkladech. **Obrázek 193** demonstruje diagnostiku polohy kovových trnů, spojujících globus pod sochou Panny Marie se spodní částí sloupu (Kácov). Vpravo nahoře je vidět anténu, kterou operátor v tomto případě posouvá po obvodě globu, pod ním je příklad radarogramu s identifikací polohy trnů (čepů).

Další příklad ukazuje použití georadaru pro zjištění tloušťky vrstev klenuté stropní konstrukce letohrádku Hvězda – podlahovou skladbu, násypy i tloušťku klenby (**obr. 194**).

V této kapitole byly stručně představeny nejdůležitější současné nedestruktivní diagnostické metody, které mají významný aplikační potenciál při záchraně památek a jejich restaurování. Terénní práce s nimi je většinou jednoduchá a rychlá, nicméně zpracování naměřených dat často vyžaduje speciální znalosti, počítače i software a většinou i značnou dávku zkušenosti při interpretaci výsledků.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI DF11P010-VV027 a projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

- Anthony, R., M. Drdáký, I. Jirovský a B. Kasal. Rentgenová diagnostika dřevěných historických konstrukcí. In: *Stavebné materiály a skúšobníctvo*. Košice: Orgware/BERG TU Košice: 2003, 138-140. ISBN 80-7099-991-8.
- Anthony, R. W., A. K. Pandey a C. G. Arnette. Integrating nondestructive evaluation tools for the inspection of timber structures. In: *Proceedings of 11th international Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Madison (WI): USDA, 1999.
- Castellini, P., E. Esposito, N. Paone a E. P. Tomasini. Non-invasive measurements of damage of frescoes paintings and icon by Laser Scanning Vibrometer: experimental results on artificial samples using different types of structural exciters. In: *6th World conference on NDT and Microanalysis in Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage*. Roma: AIPnD, 1999, 185–198.
- Castellini, P., N. Paone a E. P. Tomasini. The laser doppler vibrometer as an instrument for non-intrusive diagnostic of works of art: application to Fresco Painting. *Optics and Lasers in Engineering*. 1996, 25(4-5), 227-246. [http://dx.doi.org/10.1016/0143-8166\(95\)00073-9](http://dx.doi.org/10.1016/0143-8166(95)00073-9)
- Conyers, L. a D. Goodman. *Ground-penetrating radar*. London: Sage Publications, 1997.
- Drdáký, M., J. Lesák, D. Michoinová, J. Svoboda a S. Urushadze. Contact-less methods for identification of cohesion loss in lime mortar renders. *Experimentální analýza napětí 2001*. Praha: České vysoké učení technické, 2001, 41-46.
- Drdáký, M., I. Jirovský a J. Lesák. *Nedestruktivní průzkum zděných a dřevěných konstrukcí Mariánské věže na hradě Karlštejně*. Zpráva ÚTAM AV ČR, Praha: ÚTAM AV ČR, 2003.
- Drdáký, M. a J. Lesák. Non-invasive survey of detachment of historic rendering, In: Fort, R., M. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras a C. Vazquez-Calvo (eds.). *Heritage, Weathering and Conservation*, London: Taylor and Francis, 2006, 591-597. ISBN 0-415-41272-2
- Hacar, B. a K. Waitzman. Vyšetřování stavebních hmot a konstrukcí paprsky gama. *Technický obzor*, 1944, 52(15,16).
- Halmshaw, R. *Industrial Radiography*. London: Chapman and Hall, 1995.
- Harnsberger, D. In Delorme's Manner. *APT Bulletin*. 1981, 13(4), 2-8.
- Hart, D. X-ray analysis of the Narbonne House. *APT Bulletin*. 1974, 6(1), 78-98. <http://dx.doi.org/10.2307/1493413>
- Hart, D. *X-ray Examination of Historic Structures*. Washington: U.S. Department of the Interior, Heritage Conservation and Recreation Service, 1975.
- Hönig, A. a V. Zapletal. *Nedestruktivní zkušebnictví*. Neprodejná skripta pro PGS: Technické znalectví. Brno: VUT Brno, 1982.
- Lang, J. a A. Middleton. *Radiography of Cultural Material*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.
- Laurens, D. *Thermographie infrarouge appliquée a des bâtiments anciens*. In: IABSE Symposium Venezia 1983. Strengthening of Building Structures – Diagnosis and Therapy, Final Report, IABSE Reports, 1983, 46, 117-121.
- Li, Z., W. Yao, S. Lee, Ch. Lee a Z. Yang, Z. Application of infrared thermography technique in building finis evaluation. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2000, 19(1), 11-19. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1006612023656>

- Maierhofer, C., A. Brink, M. Rölling a H. Wiggenhauser. Detection of shallow voids in concrete structures with impuls thermography and radar, *NDT & E International*. 2003, 36(4), 257-263. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00063-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00063-4)
- Maierhofer, C. a S. Leipold. Radar investigations of masonry structures. *NDT & E International*. 2001, 34(2), 139-147. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00038-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00038-4)
- Maldague, X. P. V. *Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography*. London: Springer, 1993.
- Skłodowski, R., M. Drdácý a M. Skłodowski. Identifying subsurface detachment defects by acoustic tracing. *NDT & E International*. 2013, 56, 56-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.02.002>
- Wrenn, G. Questions of preservation and a new X-ray investigative technique. In: *Preservation and conservation: principles and practices. Proceedings of the North American Regional Conference*. Williamsburg (VA), 1976.

# Zkoušení konsolidačních efektů na maltách a horninách

Miloš Drdácký

Konsolidace hornin a malt představuje jednu z nejsložitějších restaurátorských technologií a zásah, který významně ovlivňuje materiálové kvality historického objektu. Památková věda se snaží neustále produkovat nové a nové konsolidační prostředky, které jsou na trhu velmi žádané. Nicméně jejich zavedení do konzervátorské praxe vyžaduje pečlivé vyšetření jejich dopadů na historický materiál a památky z hlediska jejich trvanlivosti a souladu s potřebami a pravidly památkové péče.

Stejně tak zkoušení a hodnocení těchto dopadů na kulturní dědictví patří mezi nelehké úlohy, které většinou nemají ambice postihnout všechny možné vlivy nebo měřit absolutní hodnoty požadovaných parametrů, protože relativní údaje obvykle stačí pro přijetí konečných rozhodnutí. Ideálně by měly být zkoumány dopady konsolidantů na skutečných materiálech ve skutečných podmínkách jejich aplikace a budoucího působení. Místo toho jsou většinou testy prováděny v laboratořích s omezeným množstvím doplňkových testů v terénu. Jedním z důvodů je i to, že nejsou k dispozici vhodná zkušební zařízení a postupy pro přesné určení řady charakteristik *in situ*. Optimální rozsah zkoušek je pak obvykle omezen na studii nejkritičtějších efektů, které by mohly být v rozporu s požadavky kompatibility zásahu s ohledem na historický materiál a jeho stav i podmínky působení. Zkoušení tak většinou zahrnuje určování mechanických a jiných fyzikálních charakteristik konsolidací ovlivněných.

Tabasso a Simon (2006) publikovali kritický přehled zkušebních metod pro hodnocení vlastností hornin (kamene) před a po konzervačním zásahu, kde čtenář může najít užitečné informace o rozmanitých standardních i nestandardních postupech. Zkoušení hornin a vyhodnocování konzervačních zásahů včetně doporučení pro kritéria kompatibility bylo podrobně zkoumáno zejména v Německu (Sasse a Snethlage 1996, Snethlage a Pfanner 2013), kde také vznikla řada inovačních myšlenek. Na druhé straně bylo publikováno poměrně málo úspěšných a spolehlivých přístupů zkoušení konsolidačních efektů na maltách. Rozmanitost problémů plynoucí z různosti materiálů a ze široké škály forem jejich zvětvávání vyžaduje kreativní přístup k fyzickému modelování a zkoušení konsolidačních efektů. V této kapitole jsou prezentovány některé univerzální případy, zatímco další může čtenář nalézt v ukázkách případových studií.

Příprava programu hodnocení vlivů konsolidace musí uvážit i to, že zkoušení na původních historických materiálech není obvykle možné, neboť není dovoleno poškodit ošetřovanou památku a odebrat větší množství zkušebního materiálu. Z tohoto důvodu jsou konsolidační efekty typicky zkoušeny na modelových materiálech nebo výjimečně na originálním materiálu, získaném z prvků, které musely být vyměněny a nahrazeny novými z důvodu ztráty jejich další

funkční či estetické způsobilosti. Nicméně ani takový materiál nemusí být dostatečně reprezentativní pro širší studium vlivů konsolidačního zásahu kvůli značné variabilitě vlastností.

Různé normy doporučují zkoušet konsolidační vlivy na horniny na vzorcích kamenů uměle zestárlých (např. italská NORMAL 1985) a pro umělé zvětvávání byla vyvinuta řada technik, např. cyklické zmrazování a tání, cyklické zahřívání nebo krystalizace solí. Pro účely porovnávacích zkoušek různých receptur jsou tyto přípravy většinou zbytečné a lze oprávněně použít zjednodušený přístup zkoušení na vhodných modelových materiálech, což navíc zaručuje lepší homogenitu substrátu a tím i spolehlivější výsledky.

Cílem zkoušení vlivů konsolidace je dosažení srovnatelných dat s minimem chyb a zde jsou potřebné přiměřeně homogenní vzorky s minimální variabilitou rozhodujících parametrů. U hornin jsou základní série zkoušek prováděny přednostně na zdravém materiálu, pokud možno vytěženém z původních historických zdrojů. Kámen lze více či méně snadno řezat pro výrobu zkušebních těles na rozdíl od malt. Pro jejich zkoušení je snazší a tudíž používanější vyrábět zkušební tělesa z čerstvých směsí s modelovými vlastnostmi nebo z prosté směsi agregátu jejím zhutněním (dusáním).

Dalším specifickým problémem, který je třeba řešit, je schopnost zkoumaného substrátu absorbovat impregnační látku. V každém případě je hloubka penetrace konsolidantu jedním z velmi kritických parametrů zkoušky a významně ovlivňuje plánování experimentů. Hloubka penetrace konsolidační látky typicky dosahuje hodnot od několika milimetrů do několika centimetrů v závislosti na velikosti a propojení pórů ve vztahu k velikosti částic nebo molekul této látky.

Zkušební program kombinuje destruktivní i nedestruktivní testy. Pro snížení vlivu variability substrátu je žádoucí zkoušet jednotlivé parametry na pokud možno identických tělesech, což musí být zajištěno pečlivým plánováním pořadí zkoušek. Nelze zapomenout na čas potřebný k průběhu chemických reakcí (zrání) jak u substrátů, tak u konsolidačních látek. Obecně procedura testování začíná nedestruktivními zkouškami a pokračuje destruktivními mechanickými zkouškami, po kterých stále ještě máme většinou k dispozici úlomky použitelné k dalším destruktivním nebo nedestruktivním zkouškám. Příklady jsou uvedeny níže.

## Zkušební tělesa pro materiálové zkoušky

Pro zkoušení vlivů konsolidace na kámen jsou doporučovány tenké kruhové desky (Wittmann a Prim 1983), jejichž hlavní výhodou byla možnost přípravy z jádrových vývrtů, odebraných z reálných objektů. Zkoušení vyžaduje speciální přípravek pro podepření desek a jejich zatěžování (**obr. 195**). Typický poloměr kruhové podpory je 18 mm a zatěžovací kružnice 6,5 mm (Bourges 2006) nebo v přiměřeně modifikovaných rozměrech pro vzorky o průměru 80 mm (Frühwirt 2015). Pro extenzivní laboratorní zkoušky konsolidantů nejsou válcová tělesa praktická a zkoušení tenkých pravoúhlých destiček je mnohem efektivnější – **obr. 196** (Drdáček a Slížková 2008a), jak bude ukázáno později.<sup>1</sup>

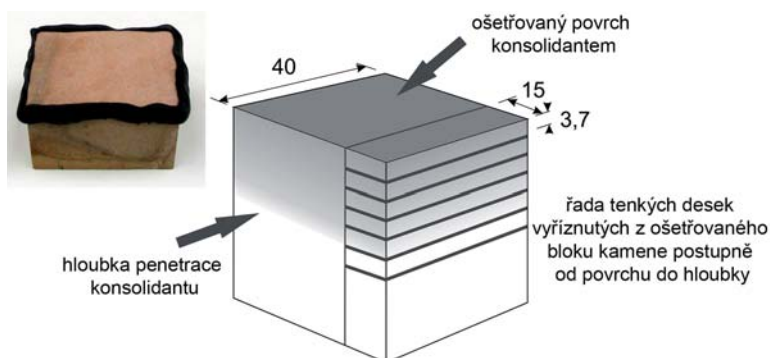
Zkušební tělesa jsou řezána jako tenké destičky z kvádrů. Vlastnosti kvádrů jsou před zkouškou proměřeny ultrazvukem. Kvádr je impregnován aplikací konsolidantu na jedné stěně, např. způsobem podle **obr. 196**, a po vyzrání konsolidantu je obvykle zjišťována

<sup>1</sup> Kruhová deska zatěžovaná mezikružím v analogii čtyřbodového ohybu při zkouškách trámečků je namáhána čistým momentem a ve výsledku zohledňuje i u hornin častou anisotropii. To samozřejmě pravoúhlá destička nepostihuje.





**OBRAZEK 195:** Příklad úpravy zatěžovacího zařízení pro zkoušení kruhových desek

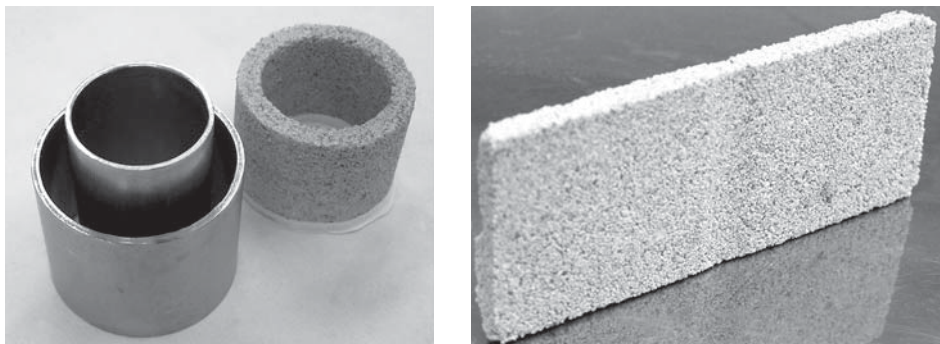


**Obrazek 196:** Princip přípravy vzorků pro zkoušení konsolidace na kvádrech

hloubka penetrace měřením rychlostí průchodu ultrazvukového signálu napříč kvádrem, kolmo na směr penetrace. Následně je kvádr rozdělen na dvě části – z jedné jsou nařezány tenké destičky o rozměrech cca 15–20 × 40 mm<sup>2</sup> pro řadu fyzikálních zkoušek a druhá je připravena pro případnou výrobu těles ke zkouškám v tlaku.

Řezání tenkých destiček umožňuje studovat také vzorky odebrané ze stávajících konstrukcí a staveb, včetně zkoušení vlivu jejich povrchové degradace zvětráváním (Drdácký et al. 2015), což je mnohem spolehlivější a má vyšší vypovídací hodnotu v popisu změn parametrů kamene než jakékoliv jiné metody. Tlakové zkoušky na horninách pro zjišťování vlivu konsolidace nejsou příliš často používány kvůli obtížím s plnou a rovnoměrnou impregnací celého objemu tělesa i jejich většinou nízké informační kapacitě.

Zkoušení konsolidačních vlivů na maltách nemůže využít výše zmíněný postup, protože spolehlivé řezání tenkých destiček je u tohoto materiálu prakticky nemožné. Pokud nechceme



**OBRÁZEK 197:** Tenkostěnné maltové vzorky pro zkoušení konsolidačních vlivů

ztratit výhodu tenkostěnného vzorku, spočívající zejména v jeho rovnoměrné a plné impregnaci, musíme vyrábět zkušební tělesa z maltových směsí jejich formováním v plastickém stavu. Tenké desky pro tahové zkoušky jsou dusány do ploché formy, tenkostěnná trubková tělesa pro tlakové zkoušky jsou vyráběna dusáním do formy ve tvaru mezikruží nebo mohou být připravena jako kvádřové bloky – zde ovšem riskujeme výše zmíněné problémy s nedokonalou impregnací (**obr. 197**).

Tenké krátké roury mohou být snadno impregnovány s využitím gravitace, jako v případě destiček, pokud je umístíme na otáčivou podporu (viz **obr. 154** v kapitole „Zpevňování omítek vápennou vodou“). Formování vzorků ze speciálních směsí umožňuje navrhnout a vyrábět zkušební tělesa z materiálů různých kvalit, imitující skutečné substráty. Například ve výše uvedené kapitole byla využita chudá maltová směs, připravená v poměru 1:9 – vápenné pojivo ku písku – (Dráček a Slížková 2012). Taková malta pak ještě zvyšuje citlivost pozorování konsolidačních a zesilujících vlivů impregnace. U tahového vzorku může být na **obr. 197** patrné ztenčení vypuštěno kvůli zjednodušení výroby. Tělesa pro ohybové zkoušky nejsou v tomto případě potřeba, neboť kombinace vzorků zkoušených v tlaku a tahu je pro popis mechanických vlastností dostatečná.

Degradované malty nebo dokonce kámen lze modelovat i prostým zhuťnutím drti z agregátu o vhodném rozložení velikostních frakcí jeho zrn. Hlavní výhodou tohoto materiálu je zkrácení přípravy vzorků vyloučením času potřebného pro zrání pojiva, pokud není dusaná směs lehce zpevňována např. vápnem, dále pak jeho vysoká otevřená porozita umožňuje velmi dobrou penetraci a, podobně jako u chudé malty, velmi nízká koheze výrazně zvyšuje demonstraci konsolidačních efektů. Jedním z nejlepších příkladů využití tohoto modelového materiálu je práce Price (1984), kde je také uvedena sofistikovaná procedura aplikace konsolidační látky. Příprava těles z drti nebo ze zhuťnutého písku je relativně snadná a tento modelový materiál je vhodný pro rychlé zkoušení během vývoje nových konsolidačních produktů.<sup>1</sup> Nicméně zkušební tělesa jsou velmi křehká a musí se s nimi zacházet velmi šetrně při dopravě a manipulaci. Důležitým rozhodnutím je výběr stupně zhuťnutí suché směsi, ze které můžeme vyrobít širokou škálu modelových materiálů – od velmi křehkých až po kámen, pokud zvolíme vibrolisování. Pro zkoušení konsolidantů jsou přirozeně preferovány a užitečné materiály křehčí. Zde není třeba mít tenkostěnná zkušební tělesa a běžně se pro tlakové

<sup>1</sup> Byly např. využívány autorem pro pilotní zkoušky při vývoji produktů CaLoSiL.

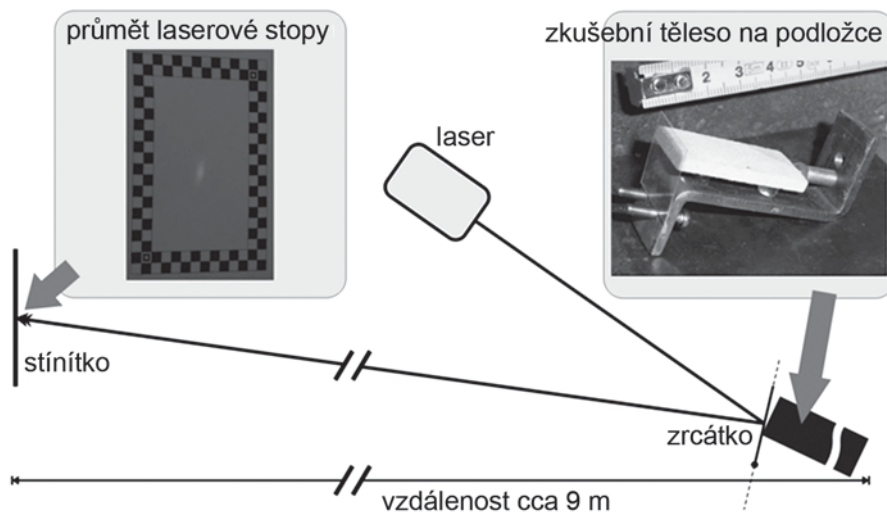
zkoušky připravují standardní krychle ( $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$ ), pro ohybové zkoušky trámečky redukované velikosti ( $20 \times 20 \times 120 \text{ mm}^3$ ). Dají se vyrobiť i tenké destičky pro tahové zkoušky a pro ohybové zkoušky může být využita i metoda protézování, popsaná v první kapitole této knihy (Drdáček 2011).

## Laboratorní zkoušení vlivu konsolidace na kámen

Vliv konsolidace je zkoumán sekvencí testů na připravených blocích a tenkých destičkách (viz výše). Studium materiálových změn je důležité, protože významně ovlivňují kompatibilitu a trvanlivost restaurátorských zásahů. Sleduje se hloubka penetrace, teplotní a vlhkostní roztažnost – hygrická i hydrická, pevnosti materiálu, obrusnost, modul pružnosti, paropropustnost, mikrostruktura (porozita, distribuce a propojení pórů) a hustota. U historických materiálů je důležitá i změna barvy či textury na viditelném povrchu, rychlost přijímání vody i celková absorpce, úhel smáčivosti, čas potřebný k saturaci vodou i rychlost vysychání, ale tyto parametry je většinou třeba zkoušet na větším tělese, než je tenká destička. Sekvence zkoušek začíná nedestruktivními testy, mezi které patří zejména měření barevnosti, UZ měření hloubky penetrace (rychlosti průchodu UZ signálu), případně zjišťování dynamického modulu pružnosti. Na nařezaných destičkách se měří dilatační vlastnosti. Poté jsou destičky zatěžovány třífobovým ohybem do porušení zlomením v laboratorním prostředí  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  a 65 % RH. Během zatěžování je měřen průhyb destičky pod působící silou a z naměřených dat je vyhodnocován modul pružnosti. Zlomky destiček po zkoušce jsou využity pro měření paropropustnosti metodou suchého nebo mokrého kelímku, dále pro analýzu pórovitosti. Tento sled zkoušek zajišťuje, že jsou všechny parametry zjišťovány na identickém zkušebním tělese, což výrazně zlepšuje spolehlivost korelací a statistických analýz. Navíc data ze souboru destiček, které jsou odebrány podél hloubkového profilu, poskytují přímo údaje o hloubce penetrace a změně dopadů konsolidace na objekt směrem do hloubky od povrchu.

Zvláštní pozornost je třeba věnovat hodnocení dilatačních vlastností. Pro měření teplotní roztažnosti lze využít komerční dilatometr, ale šířka destičky musí být zmenšena podle velikosti komory pro vložení vzorku, což komplikuje, až znemožňuje další výše popsaný postup. Při zachování šířky destičky však můžeme použít levnou laboratorní náhradu měření teplotní roztažnosti, vyvinutou v ÚTAM (Drdáček a Slížková 2008a). Při zkoušce se měří velmi subtilní změny rozměrů, které jsou menší než nepravidelnosti tvaru i povrchu tělesa. Proto musí měření proběhnout bez manipulace se vzorkem. U některých hornin, např. u pískovců, totiž typická zrna ukotvená v matici mají průměr kolem 0,1 mm. Měřená dilatace však dosahuje řádu několika mikrometrů, takže jedinou možností měření změny délky je kontinuální sledování relativního prodloužení nebo zkrácení vzorku při změně teploty.

Změny délky malé kamenné destičky (cca  $15 \times 40 \times 3 \text{ mm}^3$ ) se měří při chladnutí z předehřátého stavu na teplotu laboratoře nebo u zkoušky hygrické dilatace ze saturovaného stavu do stavu rovnovážné vlhkosti v podmínkách laboratoře. V obou případech je zkušební těleso položeno na jednoduchou podložku, zajišťující stabilní polohu a umožňující dilataci volného konce (**obr. 198**). Změna délky je registrována jako změna polohy odrazu laserového paprsku od kyvně uloženého a pružinkami k destičce přitlačovaného zrcátka, které délková změna destičky naklání (otáčí kolem jeho podpory). Tento velmi malý pohyb je optickou pákou násoben a promítán na stínítko, kde je změna automaticky zaznamenávána periodickým



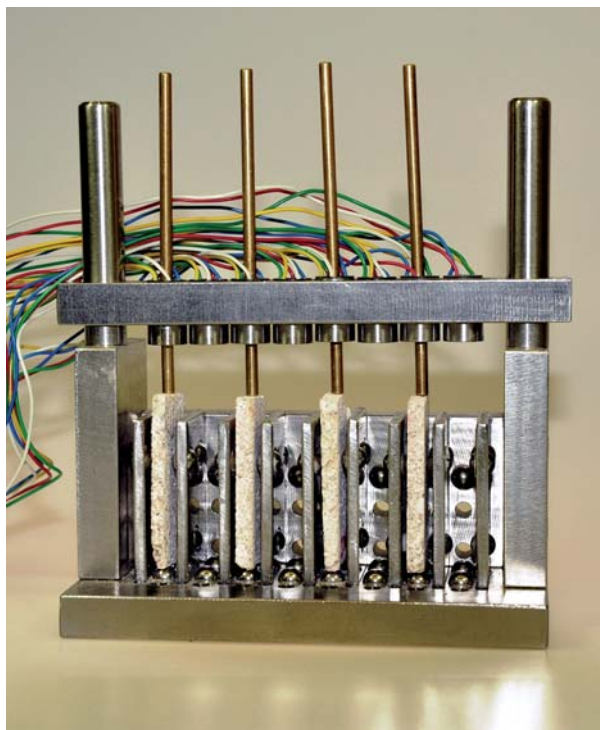
**OBRAZEK 198:** Jednoduchá laboratorní sestava pro měření teplotní a vlhkostní dilatace (návrh a obrázek J. Valach)

snímáním digitálním fotoaparátem s rozlišením jednoho pixelu, což odpovídá posunu skvrny na stínítku o velikosti 0,06 mm. Zároveň je termokamerou sledována změna teploty povrchu destičky. Při vyhodnocování jsou obě měření časově synchronizována a spojeny údaje z měření změny délky s údaji z teplotních (vlhkostních) záznamů pomocí speciálně vyvinutého softwarového nástroje. Poloha laserového odrazu na stínítku je definována těžištěm světlých bodů, vážených jejich intenzitou. Teplotní změna je typicky zaznamenávána v intervalech 10 sekund po dobu deseti minut, což odpovídá teplotnímu intervalu 20 až 80 °C. Ze snímaných termogramů jsou vypočteny průměrné teploty, protože během přirozeného chladnutí vzniká na skloněné destičce teplotní gradient s rozsahem několika stupňů Celsia.

Pro měření vlhkostních dilatačních parametrů je účinnější využít přímého měření elektrickými snímači deformací na vzorcích, umístěných v nádobě s možností zaplavení vodou nebo udržování definované relativní vlhkosti vzduchu. Jedno takové zařízení, které umožňuje testovat až 8 destiček najednou, znázorňuje **obr. 199**. Zařízení vyvinul Ing. P. Zíma a umožňuje zkoušet tělesa různých tvarů, protože přepážky mezi vzorky jsou vyjímatelné a posuvný příčník, nesoucí LVDT snímače, je navržen pro délky od min. 25 do 100 mm. Změnu délky měří LVDT snímače s rozsahem do 1 mm a proces bobtnání je spolu s časem ukládán do paměti měřicí ústředny.

Měření je velmi jemné, a když je nádoba s rámem zaplavována, vznikají vztlakové síly, které mohou pohnout destičkami a ovlivnit měření. Proto se doporučuje fixovat bodově destičky ke dnu nádoby a pomalu napouštět nádobu vodou odspodu nahoru.

Po zkouškách dilatace mohou být zahájeny destruktivní testy. Na malých vzorcích (15 × 40–50 × 3,7 mm<sup>3</sup>) se typicky zkouší ohybová pevnost a Youngův modul pružnosti. Destičky jsou řezány po vyzrání konsolidantu postupně od povrchu dovnitř vzorku. Vzdálenosti řezů jsou praktické v roztečích 5 mm, což obvykle dává destičky přibližně 3,7 mm tlusté (průřez 1,3 mm). Tělesa jsou zkoušena většinou tříbodovým ohybem po 24 hodinách vysoušení



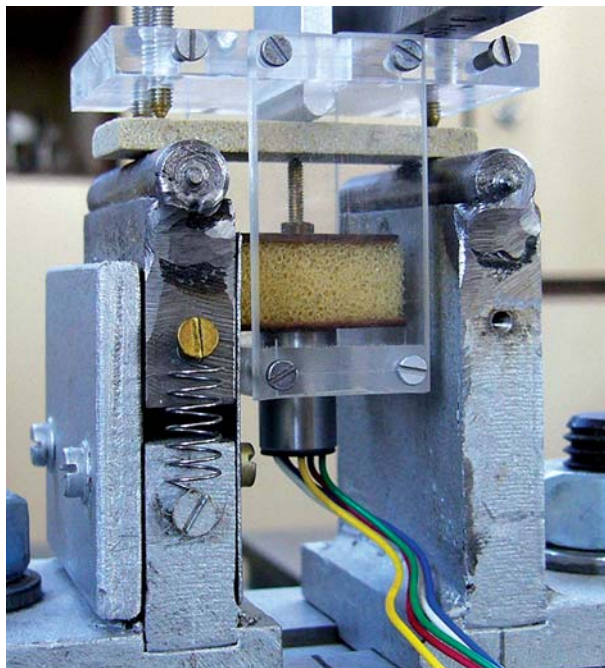
**OBRAZEK 199:** *Rám pro současné měření hydrického/hygrického dilatačního koeficientu až u osmi vzorků (Foto P. Zíma)*

při teplotě 60 °C a po 12 hodinách temperování v laboratorním prostředí. Během zatěžování se měří průhyb pod břemenem pomocí snímače LVDT a ukládá se do měřicí ústředny k dalšímu zpracování (**obr. 200**).

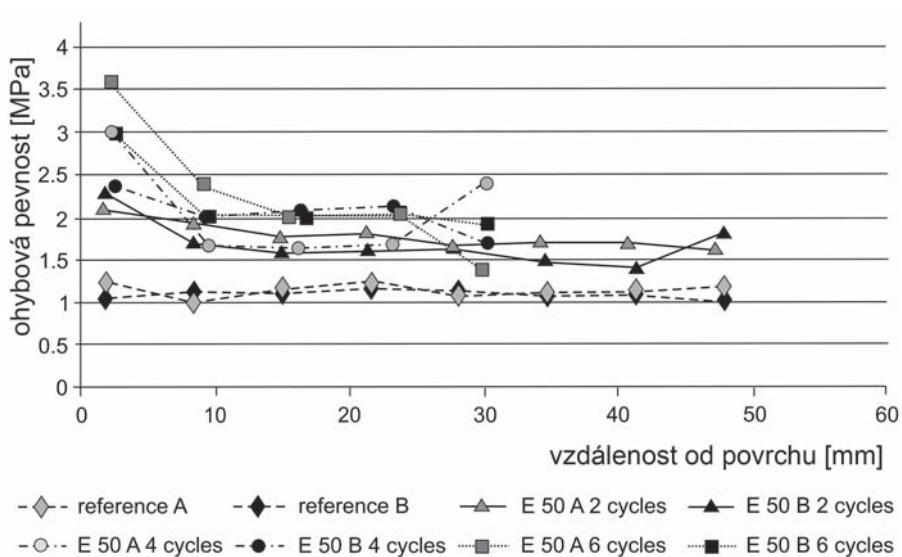
Typické výsledky zkoušek ukazuje **obr. 201**, kde je dobře patrný nárůst ohybové pevnosti maastrichtského vápence po aplikaci vápenného nanosolu CaLoSiL E50 (Slížková a Frankeová 2012). Hloubka penetrace, i když nepravidelná, a změna ohybové pevnosti jsou dobře patrné. Maastrichtský kámen je používán jako vhodný materiál pro testování kvůli své nízké pevnosti a vysoké porozitě. Hloubka penetrace může být zjišťována i pomocí jiných materiálových charakteristik, např. měřením koheze při zkoušce obrusem (Sassoni et al. 2015).

Poloviny tenkých desek, vzniklé zlomením při ohybové zkoušce, jsou dostatečně dlouhé pro zkoušení paropropustnosti, např. užitím metody mokrého kelímku v řízených laboratorních podmínkách (45 % RH a 25 °C). Při této metodě se měří ztráta vody výparem v uzavřeném kelímku se 100% relativní vlhkostí průchodem přes membránu, vytvořenou tenkou kamennou deskou. Paropropustnost se pak vypočítá ze ztráty hmotnosti a ze známé velikosti plochy kamenného víčka (**obr. 202**). Je možné samozřejmě použít i variantu suchého kelímku.

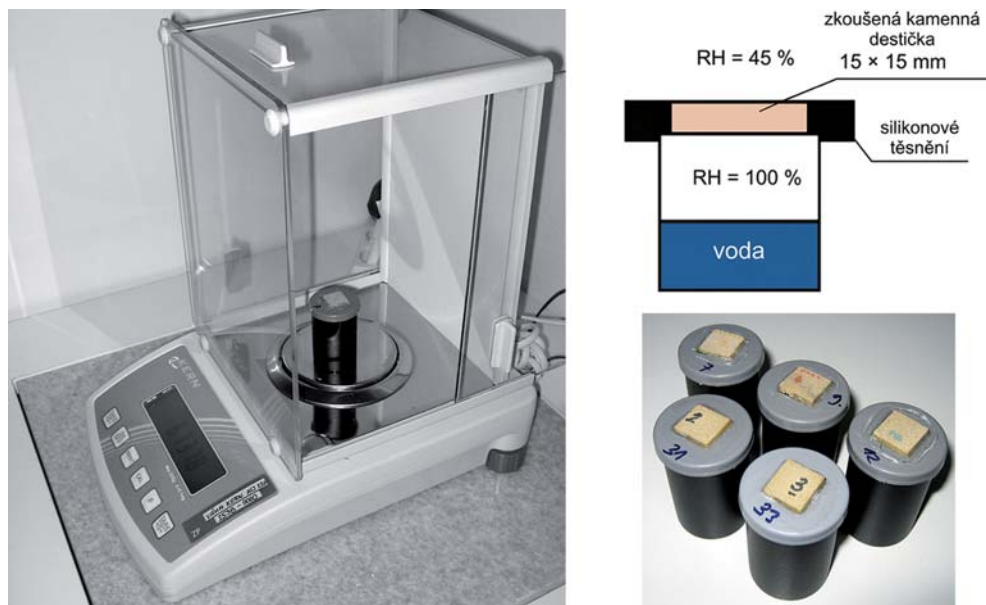
Další nedestruktivní i destruktivní zkoušky, např. měření porozity, lze provádět na zlomených částech tenkých destiček. Výše popsaný sled zkoušek na stejném vzorku snižuje při korelacích chyby plynoucí z velké rozdílnosti materiálových charakteristik hornin, které jsou značně nehomogenní a jejich vlastnosti se mohou měnit i v relativně malém objemu.



**OBRÁZEK 200:** Uspořádání ohybové zkoušky tenké kamenné destičky. Přípravek z plexiskla je držákem senzoru pro měření průhybu.



**OBRÁZEK 201:** Ohybová pevnost tenkých desek z mastrichtského vápence – neošetřené vzorky (označené jako referenční) a ošetřené napouštěním nanosolu CaLoSiL E50 aplikací ve 2, 4 nebo 6 opakováních (cyklech)



**OBRÁZEK 202:** Princip a uspořádání zkoušky paropropustnosti pomocí metody mokrého kelímku (jako kelímky jsou využity použité obaly z kinofilmů, do jejichž víček jsou vyříznuta okénka pro vlepění kamenných čtvercových destiček!)

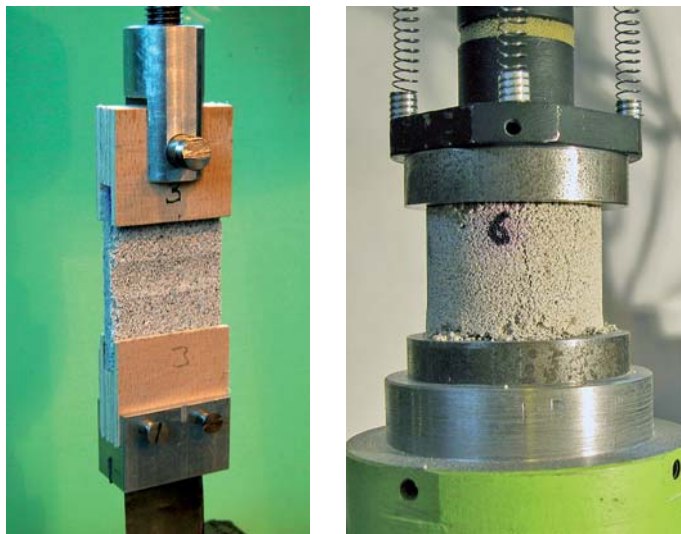
## Laboratorní zkoušky konsolidačních vlivů na maltách

Výhody zkoušení tenkých těles potvrzené při testování hornin podporovaly myšlenku přijetí podobných postupů i pro zkoušení malt. Základní motivací byly dále negativní zkušenosti Clifforda Price (1984), získané při zkouškách účinnosti vápenné vody a hovořící o špatně měřitelném efektu. Proto autor navrhl tenkostěnné vzorky, provedené z málo pevné maltové směsi v očekávání eliminace problémů s plnou a rovnoměrnou penetrací a zároveň zvýšení měřitelnosti efektu konsolidace. Tato očekávání se naplnila, a proto dnes doporučujeme testovat konsolidační látky na tenkých deskách při tahovém zatížení a na krátkých tenkostěnných rourách při tlakovém zatížení (**obr. 203**).

Destičky pro tahové zkoušky jsou opatřeny koncovkami z překližky pro možnost upevnění speciálních čelistí, umožňujících rychlou výměnu a zároveň zajišťujících perfektní souosost systému, která je nutná pro vyloučení vzniku excentricity zatížení a parazitních ohybových momentů.

Krátké tenkostěnné maltové trubky jsou zatěžovány ve směru své osy tlakem. Pro ověření metodiky byly dosažené tlakové pevnosti porovnány s pevnostmi získanými na souboru maltových kvádrů ze stejně chudé malty (písek:pojivo = 9:1). Průměrná tlaková pevnost neošetřených maltových rour byla 0,260 MPa, zatímco měřené pevnosti na nízkých kvádrech dosahovaly průměrné hodnoty 0,549 MPa, což odpovídá standardní krychlené pevnosti 0,365 MPa po korekci na nízkou štiřlost vzorku (Drďáček 2011).

<sup>1</sup> Těsnost použitého lepidla byla zkoušena vlepěním kontrolní hliníkové destičky a měřením ve stejném režimu jako ostatní vzorky.



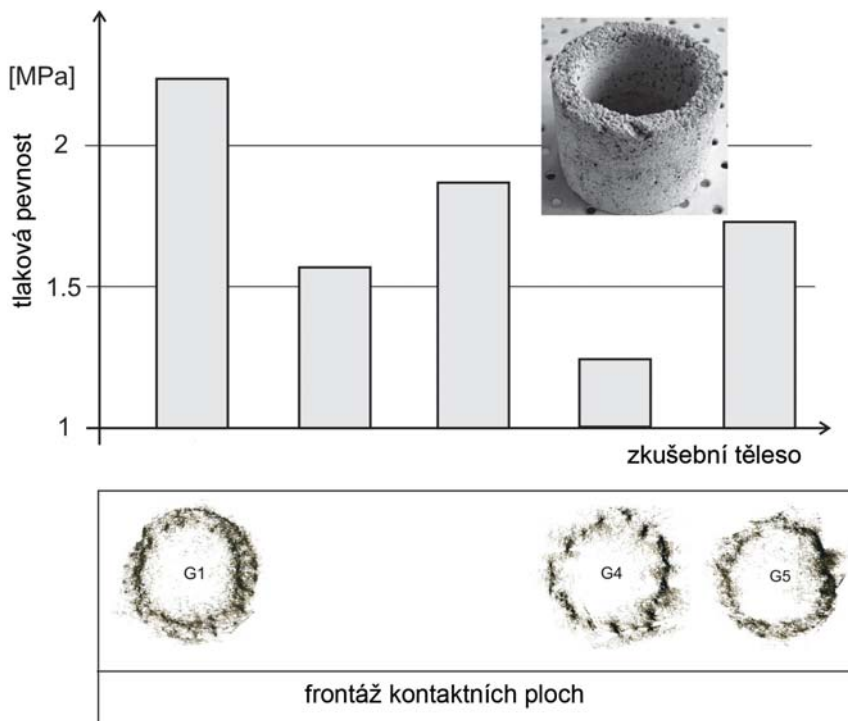
**OBRAZEK 203:** *Uspořádání tahové (vlevo) a tlakové zkoušky (vpravo) (Foto M. Drdácý, P. Zíma)*

Tento model chudé malty nebyl navržen, aby imitoval rozpadající se degradovanou maltu, protože zkušební tělesa byla velmi dobře zhutněna, což se o rozpadavé maltě říci nedá. „Nakypření“ při pískovatění malt je vlastnost, která se běžně nezkoumá, přestože je jednou ze základních podmínek úspěšnosti konsolidace impregnací. Nicméně i tato malta je velmi citlivá na způsob ošetření při zrání, které se obvykle provádí šetrným postřikem destilovanou vodou. U tenkostěnných trubek postřik může způsobit erozi kontaktní plochy pro přenos zatížení, což se odráží v dosažených pevnostech (**obr. 204**). Tento vliv byl detailně studován pomocí techniky otisku kontaktní plochy a porovnáním imperfekcí s dosahovanými pevnostmi. Podle očekávání bylo nejvyšších pevností dosahováno u vzorků s dokonalou kontaktní plochou. Nicméně zarovnávaní dosedacích ploch, tzv. „koncevání“, nezlepšilo výrazně variabilitu výsledků zkoušek s nižšími pevnostmi, i když absolutní hodnoty pevností se u koncevaných těles lehce zvýšily. Proto není nutné koncevání provádět, neboť podstava zůstává perfektní i při postřiku, který by měl být velmi jemný.

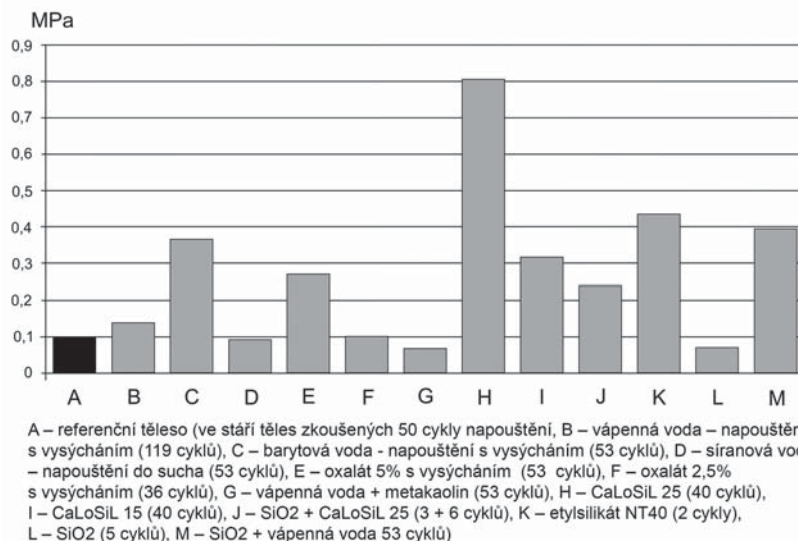
Výše uvedená metodika byla verifikována i pro jiné materiály včetně hliněných malt. Při výzkumu nanovápna byla metodika využita pro komparativní testy vlivu různých konsolidačních prostředků na vápenné nebo hliněné malty (Drdácý a Slížková 2012, Slížková et al. 2014). Jeden ilustrativní příklad je uveden na **obr. 205**.

Využití ohybových zkoušek pro studium efektivnosti konsolidačních zásahů není příliš užitečné, zejména pokud se používají standardní velikosti ohýbaných trámečků. Pro zlepšení dosažení použitelných výsledků by neměla velikost trámečku překročit průřez  $20 \times 20 \text{ mm}^2$  a délka by v takovém případě měla dosahovat min. 120 mm.





**Obrázek 204:** Vliv kvality kontaktních ploch pro přenos tlakové síly na dosažené pevnosti



**OBRÁZEK 205:** Porovnání vlivů různých konsolidačních zásahů na tahovou pevnost chudé vápenné malty (vápno:písek – 1:9)



**OBRÁZEK 206:** *Uspořádání zkoušky ohybem na protézovaném vzorku (vlevo), tlakové zkoušky (střed) a tahové zkoušky (vpravo) na tělesech ze zhutněného písku nebo kamenné drti (Foto M. Drdáčký, P. Zíma)*

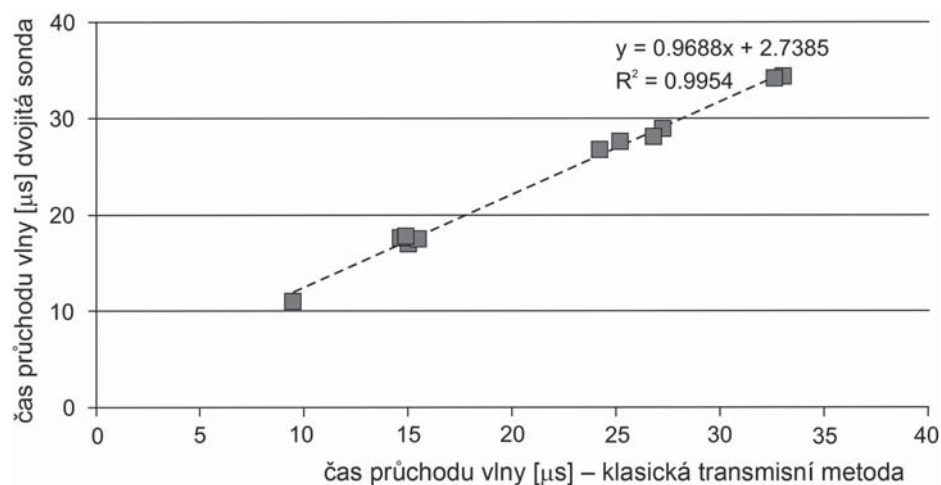
### Laboratorní zkoušky konsolidace na zhutněném písku nebo drti

Jak již bylo napsáno výše, jsou zhutněný písek nebo kamenná drť výhodným modelovým materiálem. Na vzorcích z nich vyrobených mohou být prováděny téměř všechny typy zkoušek. Nicméně materiál je velmi křehký a obtížně se z něj vyrábí standardní trámečky. Proto jsou pro ohybové zkoušky preferovány dlouhé trámečky o průřezu  $20 \times 20 \text{ mm}^2$ , které jsou připraveny technikou protézování. Střední část je ze zhutněného písku a přilepené konce tvoří dřevěné protézy (**obr. 206**). Nekonsolidovaný materiál často nevydrží manipulaci a vzorky se zlomí před vyzkoušením. Zde může technika protézování zachránit takové zlomky původních zkušebních těles pro další zkoušky. Pro tlakové zkoušky se užívají standardní zkušební krychle používané pro zkoušení malt o rozměrech  $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$  (**obr. 206**). Tělesa ze zhutněného písku mohou být zkoušena i v tahu při použití destiček obvykle 10 mm tlustých a 40 mm širokých.

Zhutněný písek nebo drť díky svému dobrému zhutnění při nízké kohezi vykazuje nejzřetelnější konsolidační efekty, které velmi dobře korelují s kvalitou konsolidační látky. Jako příklad uveďme výsledky zkoušek na tělesech připravených ze zhutněné směsi písku, mramorového prachu a vody. Tento modelový materiál velmi dobře ukázal kapacitu konsolidačního efektu nanovápenných prostředků typu CaLoSiL. Výchozí hodnoty pevnosti v tlaku jsou 0,12 MPa, v ohybu a tahu pouze průměrně 0,07 MPa. Impregnační nanovápnem byly tyto pevnosti výrazně zvýšeny a dosáhly následujících hodnot. Tlaková pevnost se zvýšila s přípravkem CaLoSiL IP25 po 5 napouštěcích cyklech o +1717 % a po deseti cyklech o +3994 %, s CaLoSiL E25 po 5 cyklech o +2875 % a po 10 cyklech o +4695 %. Zvýšení pevností v ohybu představovalo pro CaLoSiL IP25 po 5 napouštěcích cyklech o +507 % a po deseti cyklech o +692 %, s CaLoSiL E25 po 5 cyklech o +635 % a po 10 cyklech o +1041 %. Konsolidační přípravky zlepšily i pevnosti v tahu pro CaLoSiL IP25

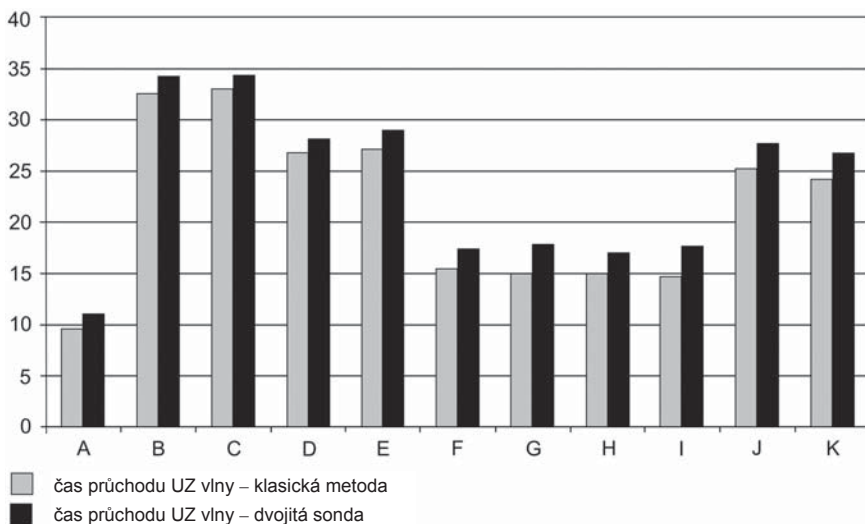


**OBRÁZEK 207:** Přenosná ultrazvuková dvojitá sonda pro měření materiálových vlastností v hloubkovém profilu a hodnocení hloubky penetrace v povrchové vrstvě mezi dvěma vyvrtanými otvory (Foto J. Valach)



**OBRÁZEK 208:** Porovnání časů průchodu UZ vlny [μs] získaných klasickou technikou transmisního modu UZ měření a dvojitou sondou pro pískovec (aditivní časová konstanta – 2,7385 μs – je specifická pro danou sondu a může být snadno odečtena z výsledků pro získání správných dat)

po 5 napouštěcích cyklech o +1270 % a po deseti cyklech o +2782 %, s CaLoSiL E25 po 5 cyklech o +1348 % a po 10 cyklech o +3025 %. V daném případě výsledky ukazují, že nano vápno CaLoSiL v ethanolu dává lepší zesílení než CaLoSiL v isopropanolu.



**Obrázek 209:** Porovnání časů průchodu UZ vlny [μs] získaných klasickou technikou transmisního modu UZ měření a dvojitou sondou pro různé materiály: A – ocelový válec; B – smrkový hranol – napříč vláken; C – smrkový hranol – napříč vláken; D – suchá opuka; E – vodou nasycená opuka; F – suchý pískovec; G – vodou nasycený pískovec; H – suchý pískovec; I – vodou nasycený pískovec; J – suchá cihla; K – vodou nasycená cihla. (Aditivní časová konstanta – 2,7385 μs – z předchozího obrázku vysvětluje časové rozdíly)

## Terénní zkoušky konsolidačních dopadů na kámen a maltu

Pro zkoušení konsolidačních efektů na reálných konstrukcích a stavbách lze používat pouze nedestruktivní nebo velmi šetrně destruktivní (polo-destruktivní) metody. Obvykle se požaduje ukázat a dokázat konsolidační efekt kvantitativně a zde se neobejdeme bez některého typu zkoušení mechanických vlastností. Metody terénních zkoušek popsáné v některé z předchozích kapitol, zejména odlučovací test (Scotch tape), patří mezi techniky dobře použitelné a jejich popis zde neopakujeme.

Jedna speciální metoda byla vyvinuta firmou Geotron ve spolupráci s autory v rámci projektu Stonecore pro ultrazvukové měření průchozího signálu podél hloubkového profilu (**obr. 207**). Přístroj tvoří dvě sondy – vysílač ultrazvukového signálu a přijímač – které se vkládají do otvorů o průměru 20 mm, vyvrtaných do povrchové vrstvy zkoumaného prvku ve vzdálenosti do 100 mm od sebe a hloubky 60 mm. Zařízení je navrženo tak, že umožňuje reprodukovatelná vkládání sond do vyvrtaných otvorů, aby se daly provádět série měření pro výzkum materiálových změn.

Zařízení je přenosné a plně kompatibilní s ultrazvukovými laboratorními přístroji, takže operátor může využívat všech dříve získaných znalostí a dovedností při vyhodnocování dat. Přístroj je robustní a výborně přizpůsoben obtížným podmínkám práce v terénu. Poskytuje dříve nedosažitelnou možnost měřit v terénu na skutečných objektech vlastnosti materiálů v průchozím modu ultrazvukového signálu do několika centimetrů pod povrch. Studie provedená J. Valachem potvrdila vynikající soulad mezi výsledky, získanými klasickým UZ měřením a novým přístrojem na pískovci (**obr. 208**) i na dalších typických stavebních materiálech (**obr. 209**).

Kapitola ukazuje základní možnosti spolehlivého a dostatečně komplexního zkoušení vlivů konsolidačních látek, které by mělo být provedeno při zavádění nových produktů na trh a je užitečné i pro výběr optimálního konzervačního zásahu. V práci restaurátora se vyskytuje řada úloh, které si žádají návrh dalších speciálních postupů, které činí tuto oblast památkové vědy živou a trvale zajímavou.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“ a v rámci společného evropského projektu STONECORE.

## Použitá literatura

- Bourges, A. *Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural environment*. Dissertation. München: Fakultät für Geowissenschaften der Ludwigs-Maximilians-Universität, 2006.
- Drdácký, M. Non-standard testing of mechanical characteristics of historic mortars. *International Journal of Architectural Heritage*. 2011, 5(4-5), 383-394.  
<http://dx.doi.org/10.1080/15583051003717788>
- Drdácký, M., D. Frankeová a Z. Slížková. Ancient sandstone condition assessment in relation to degradation, cleaning and consolidation phenomena. In: *EGU General Assembly 2015*. Wien: European Geoscience Union, 2015.
- Drdácký, M. a Z. Slížková. Lime-water consolidation effects on poor lime mortars. *APT Bulletin*. 2012, 43(1), 31-36.
- Drdácký, M. a Z. Slížková. Mechanical characteristics of historical mortars from tests on small-sample non-standard specimens. *Material Science and Applied Chemistry (Materiálzinātne un lietišķā ķīmija)*. 2008, 17, 20–29. ISSN 1407-7353.
- Drdácký, M. F. a Z. Slížková. Performance of glauconitic sandstone treated with ethylsilicate consolidation agents. In: Lukaszewicz, J. a P. Niemcewicz (eds.). *Proceedings of the 11th International Congress on deterioration and conservation of stone*. Torun: Nicolaus Copernicus University Press, 2008, 1205-1212.
- Frühwirt, T. *Biaxial flexural strength test device* [online]. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg [cit. 27.04.2015].  
Dostupné z: <https://tu-freiberg.de/fakult3/gt/feme/labor/la-weit.en.html>
- NORMAL 20/85. *Conservazione dei materiali lapidei: manutenzione ordinaria e straordinaria*. Rome: Istituto Centrale per il Restauro (ICR), 1985.
- Price, C. A.: The consolidation of limestone using a lime poultice and limewater. In: *Studies in Conservation*. 1984, 29(Supp.1) 160-162.  
<http://dx.doi.org/10.1179/sic.1984.29.Supplement-1.160>
- Sasse, H. R. a R. Sneathlage. Evaluation of stone consolidation treatments. *Science and Technology for Cultural Heritage*, 1996, 5(1), 85-92.
- Sassoni E., G. Graziani a E. Franzoni. An innovative phosphate-based consolidant for limestone. Part 1: Effectiveness and compatibility in comparison with ethyl silicate. *Construction and Building Materials*. 2016, 102(1), 918-930.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.026>

- Slížková, Z., M. Drdácý a A. Viani. Consolidation of weak lime mortars by means of saturated solution of calcium hydroxide or barium hydroxide. *Journal of Cultural Heritage*. 2015, 16(4), 452-460. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2014.09.003>
- Slížková Z. a D. Frankeová. Consolidation of porous limestone with nanolime laboratory study. In: *12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*. New York: Columbia University, 2012. <http://iscs.icomos.org/pdf-files/NewYorkConf/slizfran.pdf>
- Snethlage, R. a M. Pfanner. *Leitfaden Steinkonservierung*. Stuttgart: Fraunhofer, 2013.
- Tabasso, L. M. a S. Simon. Testing methods and criteria for the selection/evaluation of products for the conservation of porous building materials. *Reviews in Conservation*. 2006, 7, 67-82.
- Wittmann, F. H. a P. Prim. Mesures de l'effet consolidant d'un produit de traitement. *Matériaux et Constructions*. 1983, 16(4), 235-242. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02473688>

# Modelování účinků prostředí v klimatickém větrném tunelu

**Stanislav Pospíšil, Miloš Drdáký**

Aerodynamické a zvláště klimatické větrné tunely s modelovanou mezní atmosférickou vrstvou představují v současné době velmi pokročilý nástroj ke zkoumání klimatických vlivů na stavební konstrukce, a to buď jednotlivě, nebo v synergickém režimu. Experimentální zařízení tohoto typu je v Evropě ojedinělé a je využíváno pro studium vlivu kombinovaných klimatických faktorů působících v reálných podmínkách. Tunel je zaměřen především na testování stavebních konstrukcí, konstrukčních prvků a dopravních prostředků. Zatímco působení jednotlivých klimatických parametrů, jako teploty, slunečního záření, srážek, vlhkosti, sněhu, mlhy na různé materiály izolovaně, je poměrně dobře popsáno, efekty způsobené větrem v kombinaci s působením dalších klimatických faktorů nejsou dostatečně prozkoumány. Jedinečnost větrného klimatického tunelu spočívá v možnosti experimentálního odzkoušení vlivu větru na sledované konstrukce jak izolovaně, tak v kombinaci s dalšími klimatickými parametry. Ve světě takových zařízení existuje jen málo, což je pochopitelně dáno i mnohdy velkými náklady na jejich vybudování, udržování a provoz. Uvádíme stručnou charakteristiku jednoho z nich, patrně největšího:

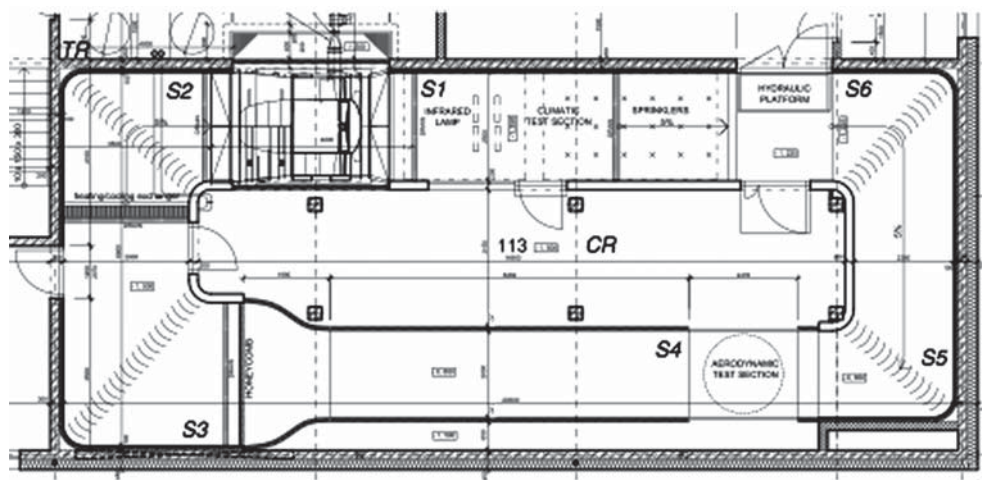
## Klimatický tunel CSTB

Větrný tunel ve francouzském městě Nantes se jménem Jules Verne provozuje laboratoř Centre Scientifique et Technique du Batiment (CSTB). Využití tunelu je mnohačetné v základním i aplikovaném výzkumu a klade si za cíl rozvíjet fyzikální znalosti a chápání vlivu větru a dalších klimatických parametrů na budovy, fasády budov, konstrukční detaily, průmyslové výrobky a také vozidla.

Hlavní vlastnost zařízení je možnost simulovat a plně kontrolovat kombinace klimatických parametrů, provádět zkoušky celých konstrukcí nebo modelů, což je často jediným relevantním experimentálním postupem. Tunel obsahuje dva okruhy s cílem nabídnout co nejširší škálu možností simulace:

Vnější okruh, zvaný též dynamický, umožňuje reprodukci prostorové a časové evoluce přírodního větru až do rychlosti 100 km/h (proud může být modelován společně s deštěm až do 250 mm/h) nebo písečné bouře (koncentrace písku může dosáhnout až 10 g/m<sup>3</sup> v průřezu 10 m<sup>2</sup>). Nejvyšší rychlost proudění vzduchu je pak 280 km/h. Celkový výkon ventilátoru je účtyhodných 3200 kW.

Vnitřní okruh, zvaný také termální, může reprodukovat tepelné prostředí od -25 °C až +50 °C a relativní vlhkost od 30 do 100 % ve zkušební komoře, jejíž průřez je 70 m<sup>2</sup>.



**OBRAZEK 210:** Půdorysné prováděcí vyobrazení tunelu v suterénu jedné z budov CET. V rozích tunelu jsou umístěny usměrňovací lopatky. Tunel je vybaven klimatickými a aerodynamickými prvky, jež za předpokladů splnění hlavních podobnostních kritérií vytvářejí dostatečně realistický obraz proudění vzduchu v atmosféře.

Maximální rychlost proudění vzduchu je možné nastavit v rozmezí od 90 km/h až do 140 km/h. V jednotce je možné i zasněžování, k čemuž se používají silná sněžová děla s kapacitou 15 cm/h na 200 m<sup>2</sup> podlahy zkušební komory. Kvalita sněhu se dá upravit podle obsahu vody. Je možné reprodukovat i ostatní klimatické parametry jako mráz, mlhu, krupobití a sluneční záření.

### Klimatický tunel CET

V České republice se pracovišti Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR podařilo vytvořit podmínky pro stavbu klimatického tunelu v Telči. Tunel byl vybudován v letech 2011–2012 v rámci výstavby Centra excelence Telč (CET) a otevřen v lednu 2013, nese jméno významného českého fyzika Vincence (Čeňka) Strouhala. Tunel je uzavřený ovál; část, která je základem pro klimatickou sekci, je vestavěna do suterénu přímo, druhou tvoří vestavěný ocelový tubus (v něm se především provádí aerodynamická měření) (**obr. 210**).

Základním vybavením tunelu je 200kW ventilátor, který vyrábí vítr o rychlosti až 180 km/h. Tunel je dále vybaven mechanickými, horko-drátkovými i optickými snímači a vysoce vyvinutým systémem optického zobrazování proudu s využitím trasovacích částic. Tunel je též opatřen simulátory klimatických vlivů, tedy především tepelným výměníkem pro simulaci cyklických teplot s minimální prostorovou hodnotou  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V této části se provádějí zejména experimenty týkající se výzkumu v oblasti inženýrských problémů ve stavebnictví, architektuře, památkové péči a v jiných oblastech, kde se sledují účinky větru spolu s dalšími faktory, jako jsou mráz, sálavé teplo a déšť (**obr. 211**). Klimatická část je obdélníkového průřezu 2,5 × 3,9 m s délkou 9,0 m (**obr. 212**). V této části je možné dosáhnout rychlosti větru až 18 m/s (v závislosti na poloze vertikálně pohyblivém stropu a pohyblivé klapky). Intenzita deště spolu s velikostí kapek je regulována tak, aby byly simulovány podmínky odpovídající mrholení nebo hustému dešti. K dispozici je rovněž radiální systém se čtyřmi infračervenými





**OBRÁZEK 211:** Příklad námrazy na úseku mostního lana vytvořené v klimatické části klimatického větrného tunelu CET. Problematika kmitání lan s námrazou nebo vlivem kombinace větru a deště je velmi významná s ohledem na celkovou bezpečnost a spolehlivost konstrukcí s lanovými prvky



**OBRÁZEK 212:** Klimatická komora s 200kW ventilátorem. Komora je připravena pro uchycení vzorků do otvorů v podlaze. Pohyblivý strop umožňuje operativní manipulaci s vodními tryskami či se sálavými lampami.

lampami s celkovým výkonem 8 kW a maximálním úhlem 60°. Výkon je regulován v plném rozsahu, a v případě potřeby je možné využít jen jednu lampu.

V aerodynamické části tunelu se řeší problémy především spojené s určováním zatížení konstrukcí od větru, které se s velkou přesností modeluje na menších replikách vysokých budov, stadionů nebo mostů, dále se studuje vliv proudění vzduchu na dynamickou stabilitu konstrukcí a zkoumá vliv proudění větru v zástavbě či v otevřeném terénu s cílem stanovit rozptyl škodlivin nebo analyzovat komfort chodců. Řeší se i problémy aeroelastické odezvy konstrukce,

difuze, rozptylu znečišťujících látek, vlivu proudění na tepelné ztráty budov a větrání a účinků větru na dopravní systémy. Pracovní prostor aerodynamické sekce je obdélníkového průřezu 1,9 (šířka) × 1,8 m (výška). Celková délka aerodynamické části je 11,0 m, včetně části pro vývoj turbulentní mezní vrstvy. Simulace mezní vrstvy atmosféry s požadovanými charakteristikami vychází z použití prvků, jako jsou mříže, výměnné generátory turbulence, bariéry a podlahové desky s různou drsností. Rozsah rychlosti větru v prázdné pracovní sekci je 0,2–33 m/s.

### ***Vybavení používaná při experimentech***

Experimentální činnost v aerodynamických a klimatických tunelech vyžaduje velmi pokročilé měřicí zařízení a vyhodnocovací metody. Současný technologický vývoj již nabízí přístroje, jejichž použití bylo před 20 lety nepředstavitelné, či neexistovaly. V CETu existuje velmi pokročilé vybavení, skládající se z následujících přístrojů:

- *CTA (Constant Temperature Anemometry)* – drátková anemometrie měření rychlosti a turbulence v 1, 2 nebo 3rozměrném proudění vzduchu.
- *PIV (Particle Image Velocimetry)* – neinvazivní metoda založená na laserovém osvětlování a kamerovém snímání proudu. Využívá se k měření obtékání konstrukcí, turbulence apod.
- *DEWETRON* – moderní systém určený ke sběru dat za současného multikanálového vzorkování. Využívá 24bitový A/D převodník s anti-aliasingem a umožňuje zpracování signálů. Zařízení je použitelné jak pro analogový, tak pro digitální signál s pokročilými metodami zpracování.
- *Traverse System Dantec* – pomocný nástroj pro přesné skalární a vektorové mapování proudového pole založené na měření tlaku a složek rychlosti větru.
- *Tlakový Scanner Scanivalve* – k měření hodnot tlaku za přímého měření na povrchu modelu, rychlé vzorkování.
- *Environmentální měření* – termo-kamery, anemometry, termo-anemometry, teploměry, termo-vlhkoměry, tlakové senzory, laserový snímač velikosti kapiček.
- *Pětivotrová sonda* – slouží k získání skalárních a vektorových vlastností složitých proudových polí, měření třísložkové rychlosti větru.

## **PŘÍKLADY EXPERIMENTŮ V KLIMATICKÝCH TUNELECH**

### **Studie expozice vápencových fiál chrámu sv. Barbory**

Během čtyřdenní expozice gotických fiál z kutnohorského chrámu sv. Barbory ve větrném tunelu byl experimentálně ověřován efekt vodoodpudivé úpravy povrchu kamene (hydrofobizace), efekt větru ve spojení s deštěm na průnik srážkové vody do struktury kamene a proměření teplotních a vlhkostních změn v různých partiích kamenného prvku v závislosti na měnícím se klimatu vnějšího prostředí. Experiment se uskutečnil v klimatickém větrném tunelu „Jules Verne“ v Nantes (Francie) (Pospíšil et al. 2006).

Exponovány byly dvě fiály z kutnohorského vápence, které byly během restaurování chrámu sejmuty z důvodu havarijního stavu a nahrazeny kopiemi. Oba prvky pocházejí z jižní strany chrámu, z míst prvního a druhého opěrného pilíře (**obr. 213**).

Příčinou poškození kamenných prvků jsou korozní a erozní procesy. Vzhledem k souvislosti mezi umístěním prvků (na jižní fasádě) a mírou jejich poškození můžeme konstatovat,

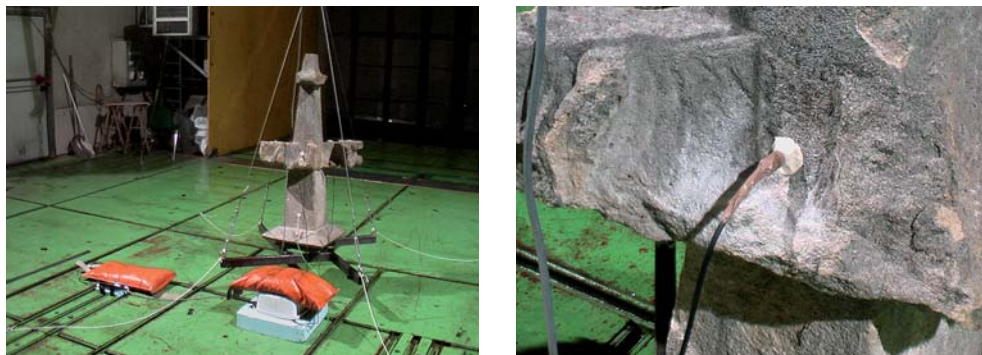


**OBRÁZEK 213:** *Fiály z kutnohorského vápence, které byly během restaurování chrámu sejmuty*

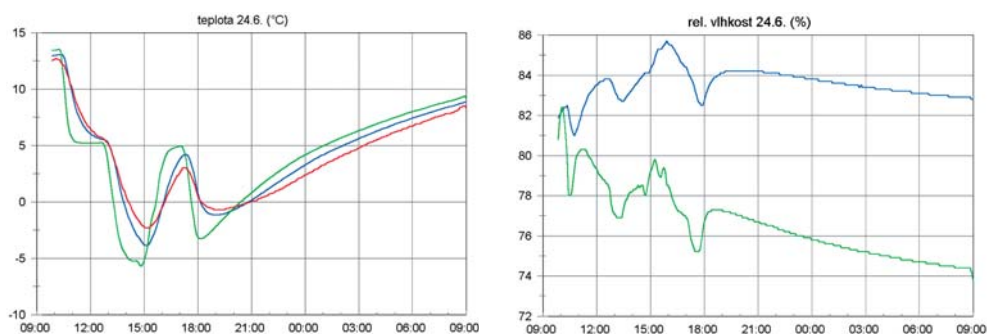
že mezi dominantní degradační procesy patří s největší pravděpodobností tepelné namáhání materiálu. V důsledku reaktivity materiálu s oxidy síry a oxidem uhličitým v ovzduší můžeme za další z příčin degradace materiálu označit úbytek nebo transformaci uhličitánových složek horniny a v důsledku chemických přeměn materiálu v povrchových vrstvách i lokální změny jeho fyzikálních vlastností. Chemická koroze kamene je vedle kvality ovzduší ovlivňována zejména přítomností vody jako reakčního i transportního média. Průnik vody do materiálu, vysychání, mechanické poškození horniny mrazem, krystalizací novotvořených minerálů nebo prudkými teplotními a vlhkostními změnami okolního prostředí jsou z hlediska degradace konkrétního materiálu stěžejní otázky, které považujeme za důležité studovat v reálných i simulovaných podmínkách. Aerodynamický klimatický tunel poskytl příležitost získat nové informace, které mohou být využity pro kvalitnější způsob ochrany historicky i výtvarně cenného materiálu.

### ***Popis experimentu, metodika***

Jedna ze dvou fiál byla před započítím experimentu konsolidována postupem, který byl reprezentativní pro restaurování chrámu sv. Barbory, které v té době probíhalo: kámen byl restaurátory očištěn, lokálně ošetřen zpevňovacím prostředkem, poškozená místa a praskliny byly vytmeleny anorganickým tmelem na bázi bílého cementu nebo hmotou pojenou esterem kyseliny křemičité, na závěr byl povrch celoplošně ošetřen hydrofobizačním organo-křemičitým prostředkem. Druhá fiála byla pro experiment ponechána jako srovnávací vzorek v původním stavu bez jakýchkoli konzervačních zásahů.



**OBRÁZEK 214:** Zavěšení fiály na váhu ve zkušebním prostoru klimatického tunelu a příklad umístění teplotního a vlhkosního čidla



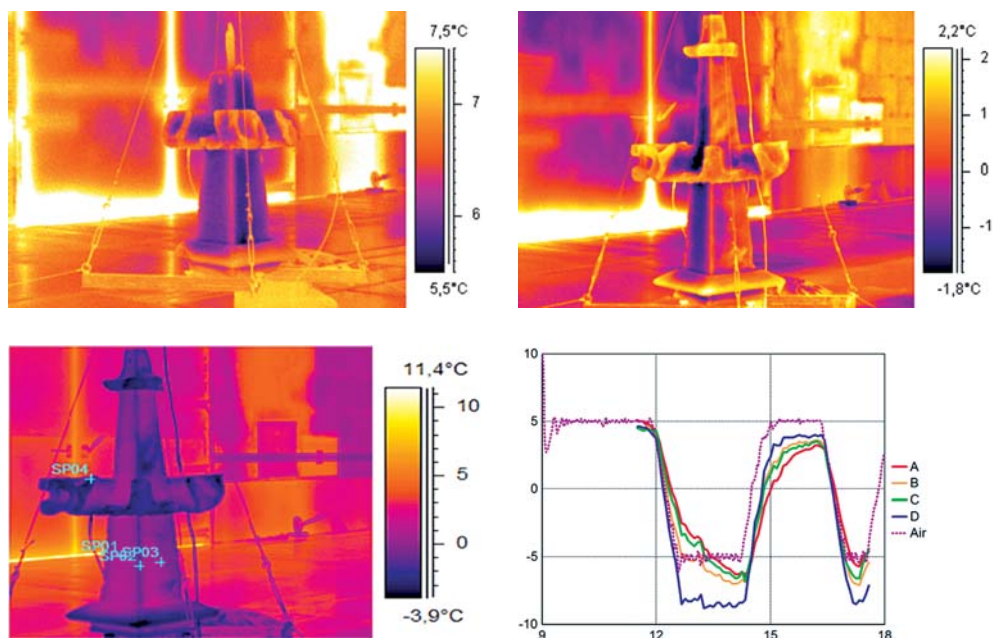
**OBRÁZEK 215:** Hodnoty teploty (vlevo) a vlhkosti (pravý graf) získané během cyklovacího experimentu v rozmezích  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  teploty okolního vzduchu

V průběhu expozice každé fiály v tunelu byly kontinuálně měřeny a zaznamenávány vlhkost a teplota uvnitř materiálu pomocí jednoho teplotního (termočlánek NiCr) a dvou teplotně-vlhkostních čidel (**obr. 214**). Byly použity kombinované senzory Ahlborn FHA 6461, které obsahují kapacitní vlhkosní čidlo v rozsahu 0–100 % R.H. s přesností 2 % R.H. a teplotní čidlo Ntc typu N s přesností 0,1 °C v rozsahu  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  až  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Jeden senzor byl umístěn do křížové kytky a byly jím sledovány teplotně-vlhkostní parametry v subtilní partii fiály, několik centimetrů pod povrchem. Zbýlé senzory byly umístěny na centrální jehlan fiál a proměřovaly sledované charakteristiky v místech několik centimetrů pod čelně exponovaným povrchem fiál. Teplota a vlhkost v kameni byla snímána a ukládána. Změny povrchové teploty materiálů v závislosti na změnách okolního klimatu byly sledovány také infračervenou (IR) kamerou.

Hmotnost obou kamenných prvků byla v průběhu experimentu zjišťována pomocí závěsné váhy. Pro snadnou orientaci byla čelní – ke směru deště kolmo orientovaná – strana fiál označena červenou značkou.

### **Režim klimatických parametrů prostředí**

Fiály nebyly před experimentem vysušeny za zvýšené teploty, byly pouze přirozeně vyschlé s obsahem rovnovážné vlhkosti odpovídající teplotě a vlhkosti okolního prostředí. Před



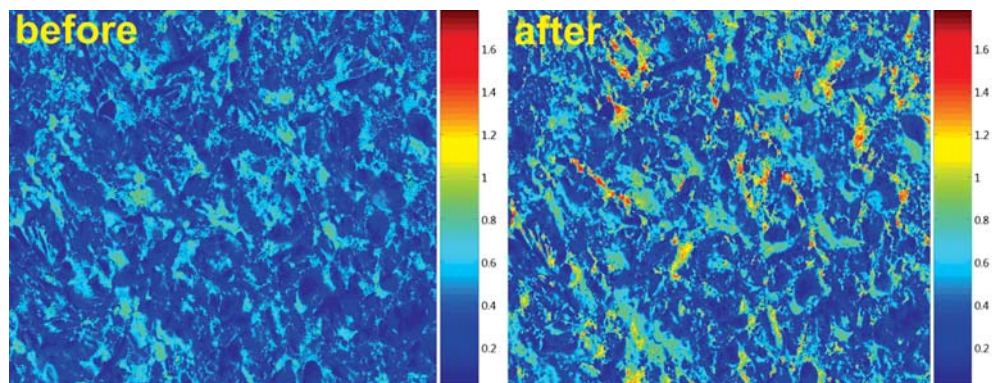
**OBRÁZEK 216:** Sledování změny povrchové teploty materiálu v závislosti na okolním klimatu pomocí termovize. Tmavé části jsou chladnější, ovívané větrem. Graf zobrazuje teplotní rozdíly na smáčeném a suchém povrchu.



**OBRÁZEK 217:** Metodika použití fosforeskující přísady v dešťových kapkách a vizualizace smáčení deštěm. Vlevo – hydrofobizovaná fiála, vítr 10 m/s, vpravo – fiála bez ošetření, vítr 10 m/s. Světlá barva značí plochy, které jsou intenzivně smáčené deštěm.

experimentem byly uloženy v hale při teplotě 18 °C a relativní vlhkosti 90%. Z hmotnostních změn byla vypočtena vlhkost materiálu v čase vážení a vyjádřena v % hmotnostních.

Bylo zjištěno, že i nasákavost neošetřené fiály měřená Karstenovými trubicemi je velmi nízká. Po 18 minutách byl zjištěn koeficient vodní absorpce  $w = 0,93 \text{ kg/m}^2$  hod. Uzavřením povrchu kamene a minimální nasákavostí povrchové vrstvy fiál lze vysvětlit proti očekávání



**OBRAZEK 218:** Praktická ukázka poškození vzorku povrchu fiály před (vlevo) a po (vpravo) umělém smáčení. Barevná stupnice označuje vzdálenost povrchu od referenční roviny v milimetrech

poměrně malý hmotnostní přírůstek neošetřené fiály po dešti při experimentu ve větrném tunelu a poměrně malý rozdíl v hmotnostních přírůstcích ošetřené a neošetřené fiály v důsledku deště. Povrch neošetřené fiály byl však na rozdíl od hydrofobizované fiály dobře smáčivý vodou.

Některé výsledky jsou zobrazeny na demonstračních obrázcích a grafech (**obr. 215–218**).

Účinky hydrofobní ochranné impregnace materiálu jsou přehledně vypsány v **tabulce 10**. Údaje o množství absorbované vody jednoznačně ukazují vhodnost zvolené metody.

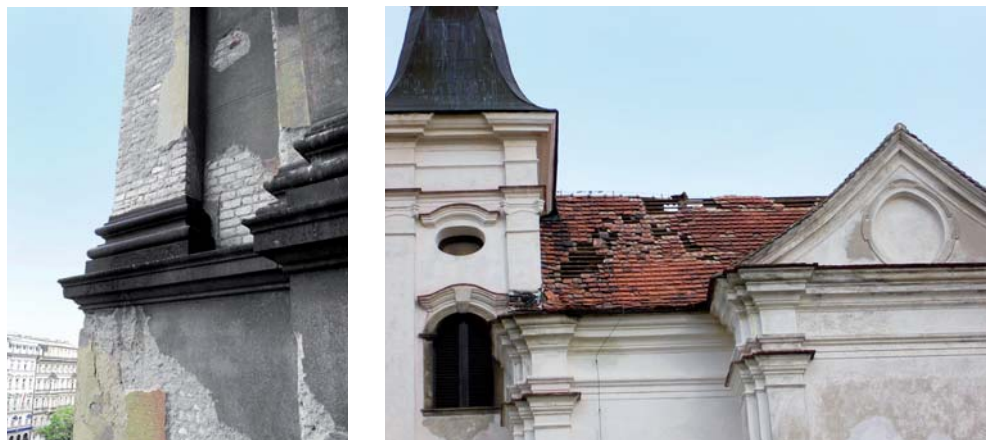
**TABULKA 10:** Shrnutí účinnosti hydrofobního ošetření

Rychlost větru 10 m/s	Množství absorbované vody (hmotnost v % suchého vzorku)	
	Bez impregnace	Hydrofobní impregnace
Trvání deště		
60 min.	0,92	0,20
+135 min.	1,86	0,82
+60 min.		0,93
+60 min.		0,98

## Numerická a experimentální studie proudění, poškození a depozice znečištění na stavbách kulturního dědictví

Vítr primárně způsobuje tlakové zatížení a může být příčinou mechanického poškození konstrukcí. Za vyšších rychlostí větru, např. při vichřicích, jsou škody způsobené tímto zatížením skutečným problémem v celé Evropě a přináší prakticky největší finanční ztráty vyjádříme-li je v pojistných výdajích. V průběhu devadesátých let se například vyskytlo osm velkých vichřic, které způsobily rozsáhlé škody v nejméně 10 zemích. Celková ztráta v jednom roce byla odhadnuta na 20 miliard eur.

Účinky větru na konstrukce jsou velmi rozličné. I za normálních podmínek může proudění větru kolem budov vést k jednorázovému poškození nebo ke kumulativním škodám (**obr. 219**). Poznáním chování větru v okolí konstrukce, podpořené experimentálním výzkumem v aerodynamickém tunelu, je možné škody podstatně omezit. Nejen při silných větrných bouřích dochází k poškození staveb, každý rok je v Evropě značný počet budov a staveb



**OBRÁZEK 219:** Vlevo – poškození fasády historického objektu od vlivu synergického působení větru, hnaného deště a usazování chemických zplodin. Vpravo – „drobné“ poškození střechy od větru

poškozen v důsledku relativně mírných vichřic. Vysoké škody způsobené větrem představují těžkou finanční zátěž na národní hospodářství obecně, ale také na podniky a veřejnost, která musí platit za opravy.

Mezi škody je potřebné zařadit i vady způsobené procesy depozic škodlivých zplodin na fasádách historických budov a na objektech kulturního dědictví. Tyto nezpůsobují jen estetické „poškození“, usazováním chemicky škodlivých látek dochází k chemickým procesům, které jsou katalyzovány rovněž vlivem vlhkosti a deště. Proudění kolem objektů podstatně ovlivňuje ukládání znečišťujících látek, biologickou korozi, cykly vysychání a smáčení, jakož i mechanické opotřebení napadených ploch. Vítr transportuje do materiálu vodu, soli, prach a plyny, nebo přímo způsobuje mechanické poškození.

Vzhledem k výše uvedeným synergickým účinkům mohou být náklady na opravy a údržbu zvláště vysoké v případě historických objektů.

### ***Metodika, popis experimentů***

Ke studiu větru se v současnosti využívá i numerických metod. Analýza a efektivní návrhy opatření ke zmírnění dopadů účinků větru jsou mnohdy závislé na vhodné kombinaci experimentální analýzy v aerodynamickém tunelu a numerických modelů. Analýza proudění kolem budovy a identifikace nebezpečných míst na konstrukci je obecně velmi náročný úkol i pro konstrukce s relativně jednoduchým geometrickým tvarem. Numerické řešení závisí na mnoha parametrech, k nejvýznamnějším z nich patří vektor rychlosti větru a rozměry konstrukce. Uvádíme zde studii, která reprezentuje výsledky numerické analýzy repliky typické historické věže srovnávané s měřeními v aerodynamickém tunelu (**obr. 221**). Takováto validace numerických modelů aerodynamickými experimenty je velmi důležitá z hlediska věrohodnosti matematických modelů proudění a podnětů k jejich dalším úpravám. **Obrázek 222** ukazuje příklad simulace proudění v počítači. Pochopení proudění ukáže na nejvíce ohrožená místa na konstrukci z hlediska mechanického i chemického poškození.



**OBRÁZEK 220:** *Gotická věž s ostrými hranami slouží jako vzor věže pro numerický výpočet i pro experimentální model. Uprostřed - balsový model umístěný v aerodynamickém tunelu. Vpravo - detail věžičky s drobným otvorem ke snímání tlaku. Tlaky na povrchu modelu jsou přenášeny hadičkami až ke snímačům, umístěným obvykle uvnitř modelu či pod měřicím prostorem.*

### **Modelování proudění vzduchu kolem věže**

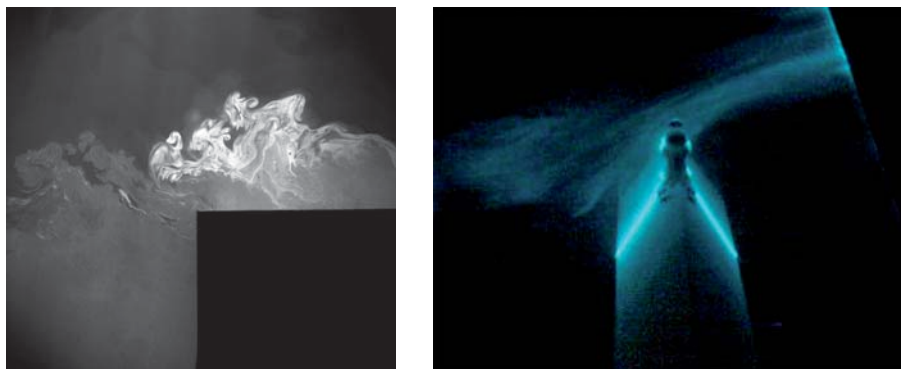
Bylo vybráno několik typických tvarů historických střech a konstrukcí, především starých městských věží. Počítačový model proudění vzduchu kolem těchto typických věžových staveb včetně konkrétních a nejvíce ohrožených detailů byl vytvořen ve dvourozměrném i třírozměrném prostoru. Model je založen na předpokladu ustáleného proudění s nízkou flukuační složkou (Pospíšil et al. 2007).

Fyzický model věže Týnského chrámu ze Staroměstského náměstí v Praze byl vytvořen v měřítku 1:25. Měřicí systém se skládal z 16 citlivých nízkotlakých snímačů. Ty odcítají tlaky prostřednictvím systému malých trubek a hadiček, vedoucích vzduch ze speciálně vrtaných miniaturních otvorů na povrchu modelu (**obr. 220**).

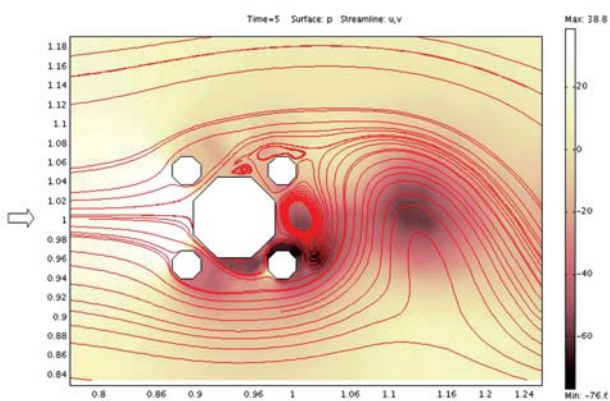
Výsledky analýzy ukazují významné změny charakteru proudnic a rozložení tlaku. Tmavé a světlé oblasti odpovídají nízkým a vysokým rychlostem proudu a tudíž vysokým, respektive nízkým tlakům. Takto lze identifikovat například oblasti se sáním vzduchu, což je kritické zejména pro skládanou střešní krytinu, která odolává lépe tlaku. Dalším modelovaným případem byla analýza rozložení tlaků větru na historické věži a střeše a její změny v důsledku odlišného uspořádání geometrie střechy a též v závislosti na přítomnosti menších věžiček. Přítomnost věží zřejmě ovlivňuje rozložení zatížení větrem. Obecně lze říci, že vznikají zóny s vysokým tlakem a sáním. V některých případech zapřičiňuje přítomnost věžiček vznik nízkého tlaku kvůli vzniku takzvaného zpětného proudění. Výsledky porovnání numerického a experimentálního řešení v ustáleném stavu jsou na **obrázku 223**.

Tento příklad demonstruje použitelnost numerické simulace z kvalitativního hlediska a navíc ukazuje, které numerické postupy mohou být vhodné pro modelování fyzikálního jevu a přitom poskytují spolehlivé kvantitativní výsledky (Yates et al. 2009).

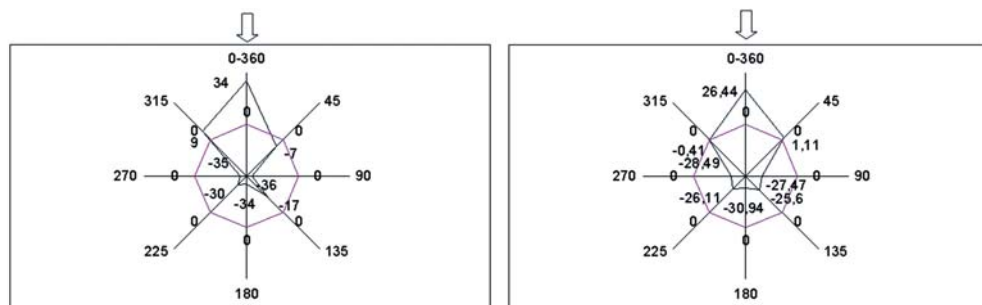




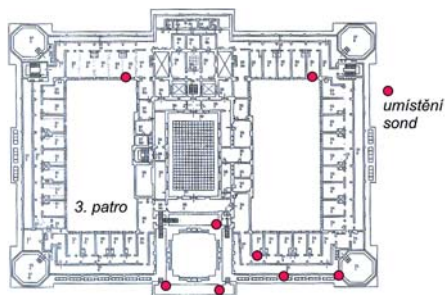
**OBRÁZEK 221:** Vizualizace proudů v okolí hrany objektu (tmavý čtverec) rozptýlenou mlhou (vlevo), kouřem a zkoumáním proudnic metodou laserového zobrazování částic (vpravo)



**OBRÁZEK 222:** Vlevo – sledování proudění vzduchu kolem věže pomocí kouře. Vpravo – výsledek numerické simulace proudění vzduchu kolem vrcholu staré historické věže s věžičkami. Tmavá barva představuje nižší rychlost.



**OBRÁZEK 223:** Porovnání experimentálních hodnot středního tlaku (vlevo) s numerickými výsledky (vpravo) v jednom z vodorovných řezů střešní částí věže



**OBRAZEK 224:** Pohled na průčelí muzea (vlevo) s patrnými stopami po silném znečištění a plánec rozmístění sběrných terčů ve skutečnosti (vpravo)

### Měření depozice škodlivin

Šíření zplodin a jejich depozice na stavbách jsou silně ovlivňovány klimatickými a povětrnostními podmínkami. Ty lze do jisté míry realizovat v klimatickém tunelu a sledovat usazování částic v modelovém měřítku.

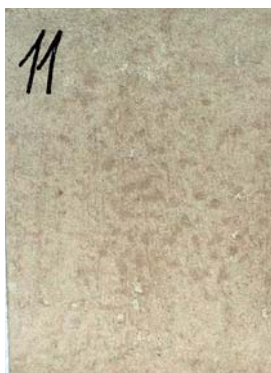
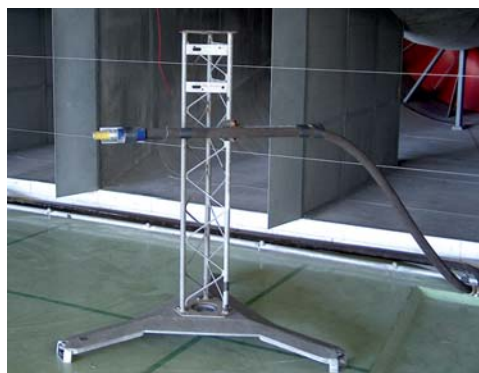
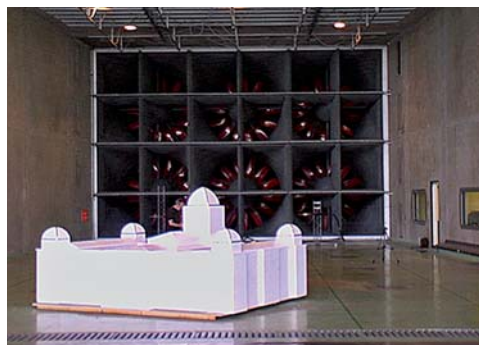
Vliv proudění vzduchu kolem budovy Národního muzea na špinění jeho fasády byl modelově zkoumán v klimatickém větrném tunelu „Jules Verne“ v CSTB Nantes (Francie). Pro zkoušky byly postaveny dva modely budovy – jeden v měřítku 1:40 a druhý v měřítku 1:80. Cílem měření bylo provést zrychlenou studii vlivu směru větru na usazování prachu na fasádě a vlivu geometrie objektu. Na experimentu spolupracovali pracovníci ÚTAM AV ČR a SVÚOM Praha. Na **obrázku 224** je pohled na hlavní průčelí budovy Národního muzea a plánec rozmístění filtračních čidel na skutečné budově.

Při zkoušce byl ve vzdušném proudu rozptýlován modelový prach, který měl částice o velikosti okolo 80 mikronů, tvořené směsí oxidu křemíku a hliníku s nízkým obsahem  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a  $\text{CaO}$ . Prach byl do vzdušného proudu vháněn čtyřmi tryskami se stlačeným vzduchem, které byly umístěny na těžkých sloupech v blízkosti tunelových větráků. Koncentrace prachu byla určena minimální hodnotou, závislou na rychlosti větru tak, aby bylo dosaženo rovnoměrného rozptýlení prachu kolem modelu budovy. Oba modely byly umístěny ve střední části tunelu a menší model stál před větším modelem ve vzdálenosti neovlivňující proudění kolem velkého modelu. Před zkouškou s prachem byla provedena vizualizace proudění kolem modelů klasickým způsobem pomocí kouře.

V jednotlivých modelových situacích byly použity následující charakteristiky:

- Sekvence 1: směr větru – západ, rychlost 5 m/s, koncentrace 0,41 g/m<sup>3</sup>, 15 min.
- Sekvence 2: směr větru – západ, rychlost 5 m/s, koncentrace 0,44 g/m<sup>3</sup>, 15 min.
- Sekvence 3: směr větru – západ, rychlost 10 m/s, koncentrace 0,2 g/m<sup>3</sup>, 15 min.
- Sekvence 4: směr větru – západ, rychlost 10 m/s, koncentrace 0,2 g/m<sup>3</sup>, 15 min.
- Sekvence 5: směr větru – jihozápad, rychlost 5 m/s, koncentrace 0,37 g/m<sup>3</sup>, 10 min.
- Sekvence 6: směr větru – jihozápad, rychlost 10 m/s, koncentrace 0,19 g/m<sup>3</sup>, 10 min.

Prach byl zachycován na modelu dvěma způsoby. Nejprve pomocí celulózovo-křemičitých destiček o rozměru 100 × 150 mm, které byly jednostranně potřeny lékárnickou vazelinou pro zvýšení lepivosti (**obr. 225**). Destičky byly na model upevněny pomocí suchých zipů, aby mohly být pro jednotlivá měření vyměňovány. Před zkouškou byly zvaženy i s vazelinou



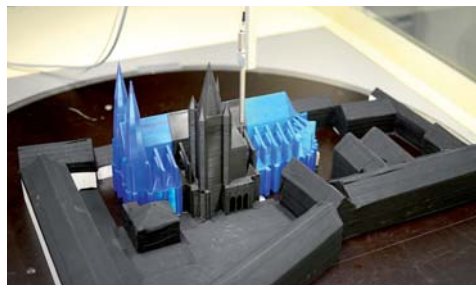
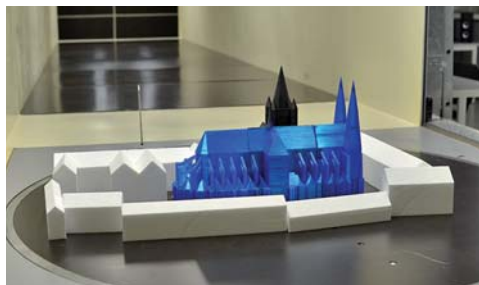
**OBRÁZEK 225:** Umístění modelů muzea v aerodynamickém tunelu, ve kterém je možné provádět rozptylové zkoušky. K rozptylu je využívána možnost otevření aerodynamického tunelu do venkovního prostoru a vstříkování prachových částic (vlevo dole) do prostoru za silnými ventilátory. Volba prachových částic vychází z modelových zákonů, které respektují měřítko, rychlost větru, hustotu a další relevantní parametry. K zachytávání prachu na modelu budovy byly použity destičky s adhesivním povrchem.

a úchytkami v plastovém sáčku, do kterého byly po expozici prachem opět po opatrném sejmutí vloženy a posléze opět zváženy ve SVÚOM Praha<sup>1</sup>. Desky byly porovnány i vzhledově pomocí spektrofotometrického měření změny odstínu. Vedle tohoto měření bylo fotograficky dokumentováno znečištění celého povrchu modelů po natření bezbarvou vazelínou. Stav modelů byl zaznamenáván i na videu a fotograficky.

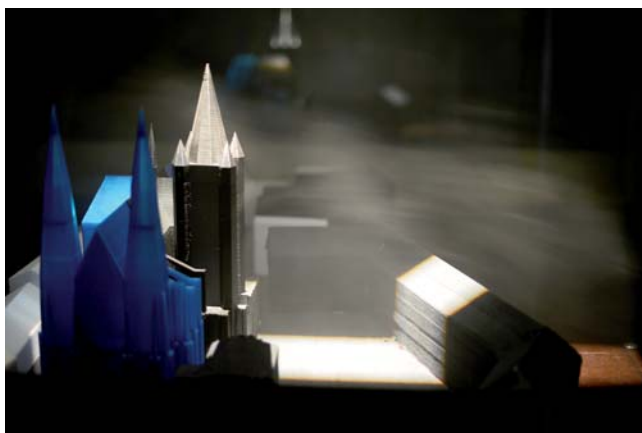
Na dalších obrázcích je vyobrazeno umístění modelu muzea v aerodynamickém tunelu, ve kterém je možné provádět rozptylové zkoušky.

Při experimentech byla zjištěna dobrá korelace mezi měřením na skutečné budově a měřením na modelech při zachování určitých modelových podmínek a při velmi krátkých intervalech působení simulovaných povětrnostních faktorů. To prakticky vylučuje možnost úspěšně modelovat integrální poškození dlouhodobými testy. Měření na skutečné budově probíhalo v rámci projektu MULTIASSESS, podporovaného Evropskou komisí, kdy byl na několika místech Národního muzea sledován stav znečištění ovzduší a usazování polutantů.

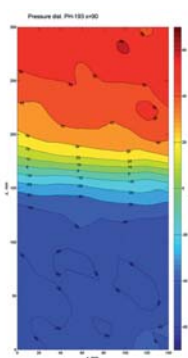
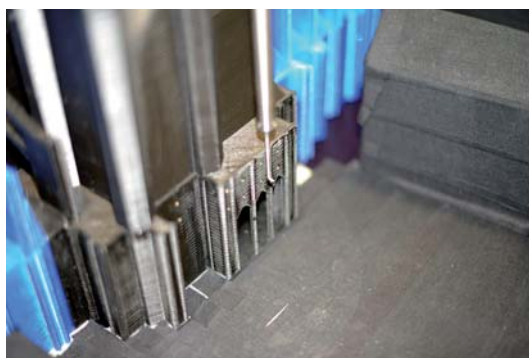
<sup>1</sup> Dagmar Knotková, Kateřina Kreislová: Povrchové znečištění složitých architektonických forem vyvolané znečištěním ovzduší, Zpráva SVÚOM, 35 s., listopad 2004.



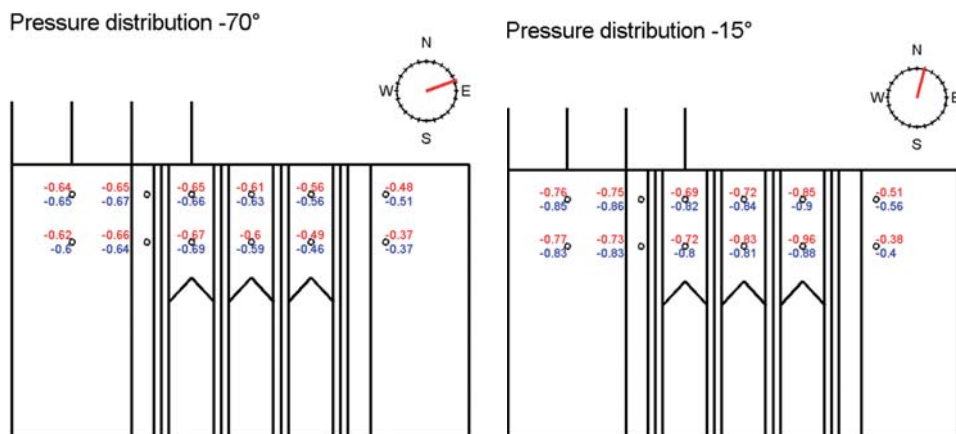
**OBRÁZEK 226:** Model katedrály s okolní zástavbou Pražského hradu umístěný v aerodynamickém tunelu. Černá část katedrály je s mozaikou a tlakovými snímači. Před modelem (směrem do obrázku) je umístěna Prandtlůva trubice měřící rychlost větru.



**OBRÁZEK 227:** Vizualizace proudění v blízkém okolí vzácné mozaiky Posledního soudu na katedrále sv. Víta na Pražském hradě. Otočný stůl umožňuje měření tlaků na modelu ze všech možných směrů větru a tudíž jeho komplexní analýzu.



**OBRÁZEK 228:** Detail modelu s umístěnými tlakovými odběry (vlevo). Rozložení rychlosti větru na nádvoří katedrály (vpravo). Střední rychlost větru na nádvoří byla zjišťována s použitím metodiky konstantní termické anemometrie (CTA).



**OBRAZEK 229:** *Tlaky v jednotlivých bodech mozaiky pro dva směry větru 70° severovýchodně (vlevo) a -15° (vpravo) severovýchodně*

## Studie expozice mozaiky Posledního soudu v klimatickém tunelu

Mozaika Posledního soudu na katedrále sv. Víta Pražského hradu je vystavena celoročnímu působení větru v kombinaci s hnaným deštěm a střídáním teplot. Všechny tyto faktory včetně teplotních cyklů ovlivňují povrch mozaiky, přičemž jejich synergické působení se může vzájemně zesilovat. Byl postaven model katedrály s okolím a byly vytvořeny modelové podmínky, které simulují větrnou zátěž místa s mozaikou. Cílem studie a zkoušek bylo:

- vytvořit mezní vrstvu proudění odpovídající místním podmínkám;
- stanovit charakteristiky proudového pole v okolí mozaiky;
- stanovit tlakové poměry přímo na mozaice v závislosti na směru větru.

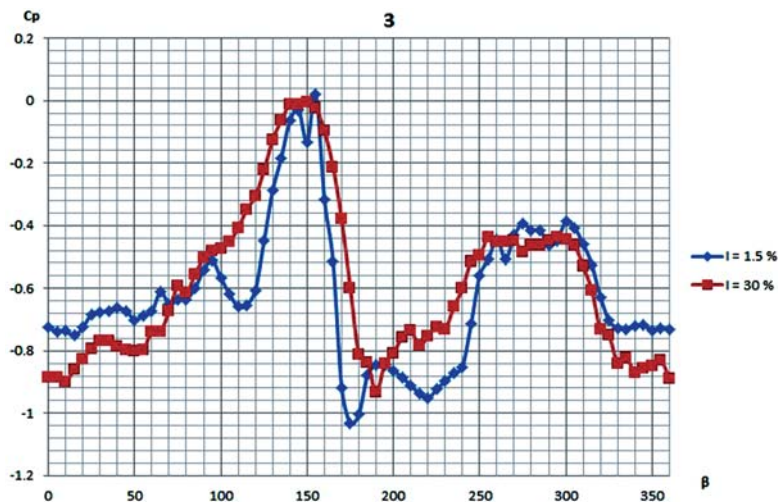
V aerodynamické části tunelu byla vytvořena mezní vrstva proudění, která respektuje okolní (hustou) zástavbu v okolí Pražského hradu. Intenzita turbulence se pohybuje okolo 28 %. Dále byl vytvořen výškově závislý rychlostní profil větrného proudění, který odpovídá podmínkám v reálném terénu.

### Model katedrály

Model Svatovítské katedrály v měřítku 1:200 byl vyroben po částech na 3D tiskárně převedením digitalizovaných geodetických dat do formátu STL. Jde o největší měřítko modelu, který je ještě možné do klimatického tunelu umístit, mají-li být experimentálně zjišťovány zvláštnosti vzdušného proudění na nádvoří v okolí katedrály v závislosti na převládajícím směru větru. Tvorba modelu na 3D tiskárně nabízí nebývale výhodný poměr mezi dosažitelným detailem modelu a náklady na pracovníka tvořícího model. Pohled na vývoj modelu nabízí **obrázek 226**. Model samotné katedrály byl doplněn o modely okolních budov.

### Testy v tunelu, vizualizace proudu, získané výsledky

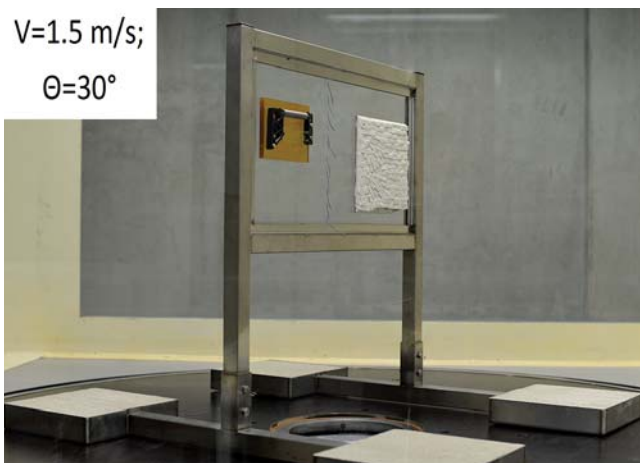
Analýza proudění spočívala v měření rychlosti větru na úrovni nádvoří a mozaiky a také v měření tlaků přímo na mozaice. Toto standardní měření bylo doplněno o vizualizaci proudu v okolí místa mozaiky, která identifikuje místa s opakovanými vírovými nárazy a tedy silnější expozicí větru s deštěm (**obr. 227**).



**OBRÁZEK 230:** Tlaky větru ve vybraném bodě na mozaice v závislosti na směru proudy. Negativní hodnoty za určitého natočení představují sání větru v daném místě, které může způsobit například „odtrhávání“ pojiva mezi dílky mozaiky apod.



$V=1.5 \text{ m/s};$   
 $\Theta=30^\circ$



**OBRÁZEK 231:** Panel s mozaikou umístěný v klimatickém tunelu. Na tomto zkušební prvku byla zkoušena rezistence dílků a pojiva proti větru s hnaným deštěm. Intenzita deště byla měřena laserovým srážkoměrem. Byla též zkoumána varianta, kdy je část mozaiky vystavena negativním tlakům, tedy sání v kombinaci s deštěm.

Další **obrázek 228** ilustruje detail modelu s rozmístěním tlakových senzorů, právě na úrovni měřítkové mozaiky. Model byl pootáčen po 15°, což umožnilo sledovat změnu tlaků s ohledem na proudění větru. Barevně je vyznačen rychlostní profil a ve spodní části obrázku je naznačeno proudové pole s proudnicemi, které ukazují, kde je nejvíce atakované místo od větru. Je zřejmé, že se vytvářejí víry, které mohou způsobovat záporné tlaky na mozaice. To je zřejmé i z **obrázku 229**, na kterém jsou vyznačeny tlakové koeficienty  $C_p$  (maximální hodnota je  $C_p = 1$ ) vyjadřující bezrozměrné charakteristiky, kterými je třeba násobit rychlost větru v daném místě a čase, abychom dostali skutečný tlak, nebo popřípadě sání v daném místě. **Obrázek 229** ukazuje tlaky v jednotlivých místech mozaiky (z celkového počtu 12). Na **obrázku 230** jsou uvedeny tlaky na vybrané *měřítkové sondě, tedy v místě na mozaice* v závislosti na směru větru. Sonda odpovídá určitému místu na skutečné mozaice, které lze určit z měřítka.

Měření je vstupní informací pro kvalifikované odhady a porovnání s reálným prouděním dle informací ČMHÚ. Vyhodnocení údajů z klimatického tunelu je posléze obvykle zaměřeno na odhad expoziční doby mozaiky v průběhu jednoho roku nebo více let a na extrapolaci a odhadu extrémních hodnot.

Ukázalo se, že mozaika je významně zatížena i negativními tlaky, tedy sáním, které působí jinak než přímé tlaky. To je důležitý poznatek především z hlediska expozice na hnaný déšť. Z tohoto důvodu byl do klimatické sekce umístěn zkušební panel zaměřený na analýzu velikosti a působení negativních tlaků působících na mozaiku a především na pojivo (**obr. 231**).

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI „Technologie údržby a konzervace mozaiky Posledního soudu a metody restaurování-konzervování středověkého a archeologického skla“ DF12 P01 OVV 017, dále podpory evropského projektu CULTSTRAT a projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

- Pospíšil, S., M. Drdáký, Z. Slížková, D. Knotková a P. Delpach. Surface degradation of complex architectural form due to atmospheric pollution. In: Fort, R., M. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras a C. Vazquez-Calvo (eds.). *Heritage, Weathering and Conservation*, London: Taylor and Francis, 2006, 447-452. ISBN 0-415-41272-2.
- Pospíšil, S., M. Drdáký, Z. Slížková, J. Lesák a D. Knotková. Wind tunnel modelling in conservation. In: Drdáký M. a M. Chapuis (eds.). *Safeguarded Cultural Heritage: understanding and viability for enlarged Europe*. Praha: ITAM, 2007, 397-408. ISBN 978-80-86246-29-1.
- Yates, T., M. Drdáký, S. Pospíšil a T. Grñtoft. Risk assessment and management strategies at local level, Chapter 8. In: Watt, J., J. Tidblad, V. Kucera a R. Hamilton (eds.). *The effects of air pollution on cultural heritage*. Boston: Springer, 2009, 215-267. ISBN 978-0-387-84892-1.

# Oprava vápenců umělým kamenem – postup při návrhu doplňků pro sochařská díla a prvky architektury

**Renata Tišlová**

Doplňování chybějícího materiálu 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 (**obr. 232**). Druhé hledisko je materiálové; z jeho pohledu je cílem opravy 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 poréznych 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. Na rozdíl od syntetických pojiv se také většinou nemusí řešit jejich stálost a odolnost vůči působení světla a vlhkosti a jejich zpracovatelské vlastnosti. Texturu originálního porézneho substrátu lze dobře adjustovat vůči originálu modifikací plniva, kterým může být např. rozdrčená hornina nebo kamenivo o přesné distribuci odpovídající mineralogické skladby, 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 přidávkem hydraulických pojiv. Příkladem může být časté použití směsí vápna s bílým cementem nebo přirozeně hydraulickým vápnem. Běžnou praxí je i využívání tzv. hotových průmyslových směsí. I když nabídka těchto materiálů je v současné době velká a složení těchto směsí je přizpůsobeno nárokům památkové péče, nelze tyto produkty plošně doporučit bez předchozích zkušeností, podrobnější materiálové analýzy a testování fyzikálně-mechanických vlastností po vytvrnutí.

## Výběr opravné směsi/umělého kamene pro objekty s památkovou hodnotou

Při opravě/rekonstrukci historických objektů jsou uplatňovány odlišné principy obnovy než při opravě staveb. Oprava historických objektů je koncipována dle zcela odlišných principů založených na maximální reflexi originálu nesoucí historickou hodnotu i kvality, které je nutné v maximální míře dochovat v nepozměněné podobě. Jednotným cílem zásahu/opravy/doplnění je snaha prodloužit životnost památky, a to provedením zásahu, který prodlouží jeho životnost, ochrání jej, avšak v minimální možné míře zasáhne do jeho materiálové i estetické





**OBRÁZEK 232:** Rekonstrukce v umělém kameni, kutnohorský vápenec. Horní kašna, Kutná Hora. Stav v průběhu restaurování v roce 2015. (Foto: V. Douša. Archiv FR UPCE, Litomyšl)

podstaty. Z tohoto hlediska je možným řešením opravy i „nic neprovádět“ nebo „konzervovat“ ve stávající podobě. Oba zmíněné přístupy znamenají pro objekt zachování ve stávajícím stadiu degradace, ochrana však spočívá v úpravě podmínek, které vyvolávají poškození objektu (např. zastřešením, transfer památky do depozitu apod.), případně minimalistickou intervencí do objektu zajišťujícího charakteru.

Při komponování opravné směsi umělého kamene pro stavební, sochařská nebo architektonická díla je základním kritériem kompatibilita s originálem chápána v širokém kontextu hodnot objektu (viz v textu dále). Tyto hodnoty je v obecné rovině nutné chápat rovnocenně, i když v reálných podmínkách je závažnost dílčích hledisek nezbytně vážit individuálně vzhledem k objektu, jeho stavu, umístění i pojetí obnovy. Při technickém pojetí kompatibility se při výběru opravné směsi umělého kamene vychází 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“<sup>1</sup>. Z tohoto hlediska je rozhodující složení opravné směsi, neboť určuje vlastnosti umělého kamene, které by měly být maximálně podobné materiálu tmelené horniny. Při jejím výběru je však nutné reflektovat stav tmeleného substrátu, který se, pokud je podklad zvětralý, může výrazně lišit od vlastností nepoškozené horniny. V takovém případě je nutné skladbu umělého kamene přizpůsobit jeho aktuálnímu stavu. Pro trvanlivost opravy jsou v neposlední řadě nezbytné také další požadavky, které rozhodují o kvalitě provedení opravy. Tyto požadavky zahrnují zejména splnění aplikačních požadavků a nároků na praktické provedení opravy. Nutné je vzít v úvahu také podmínky, ve kterých bude opravená památka dále fungovat. Z tohoto hlediska nás zajímá zejména účinek atmosférických vlivů prostředí na vyzrání minerální

<sup>1</sup> Informace na <http://www.icomos.cz/images/dokumenty/benatska-charta.pdf>.

opravné směsi i její dlouhodobé chování a odolnost v daných podmínkách expozice (Groot et al., 2005, van Hees 1999). Tento požadavek tak např. vylučuje použití dolomitického vápna nebo sádry ve vlhkém prostředí či prostředí se zdrojem vlhkosti. Zároveň částečně limituje užití opravných směsí na bázi bílého vzdušného vápna v exteriéru, které mají v silně znečištěných podmínkách atmosféry omezenou trvanlivost.

## Základní kritéria při výběru opravného materiálu

Mezi nejdůležitější kritéria při opravě hornin patří bezesporu požadavek na zachování hodnot památky a její **autenticity**, a to v mnoha dílčích ohledech (např. požadavek na formu, provedení, techniky a umělecko-řemeslné tradice, materiály aj.). Kromě těchto hodnot je neméně důležité i hledisko, které souvisí s pojetím opravy (**konceptuální požadavek**) ve vztahu k originálu. Oprava by měla být vždy šetrná vůči originálu, v ideálním případě provedená materiály, které lze odstranit, příp. opravit v rámci budoucího zásahu (požadavek na odstranitelnost). Nedílnou součástí tohoto požadavku je i hodnocení vlivu opravy na stav a vlastnosti originálu, často velmi poškozeného; materiál použitý pro opravu by neměl negativně ovlivnit stav objektu a indukovat nová poškození. Tento „soulad“ však může nastat pouze v případě, že se opravná malta v daných podmínkách chová podobně jako originál. Stanovení vlastností originálu je v tomto případě nezbytné včetně popisu jeho stavu, míry poškození, příp. změny vlastností po jeho restaurování (konsolidaci); jeho charakteristika dílčím způsobem vymezí vlastnosti opravného materiálu.

Kromě uvedených požadavků je při provedení opravy vždy nutné myslet na funkci objektu, který má být opraven (**funkční požadavek**). Funkčnost musí být uvažována jednak z pohledu samotného objektu, avšak také v rámci ostatních materiálů, které jej utváří v souvislostech objektu nebo jeho dílčí části. Toto hledisko například zahrnuje požadavek na trvanlivost opravy v daných podmínkách (agresivní atmosféra, soli, klima, vztlínající vlhkost). Z těchto důvodů se často přistupuje k použití moderních stavebních materiálů nebo prefabrikovaných směsí se standardizovanými vlastnostmi, které zajistí provedení opravy a splní její funkční nároky. Dalším příkladem je provedení opravy, které sleduje ochranou funkci (oprava ochraňuje originální horninu i materiály, které jsou součástí památky, a tak brání jejich poškození). Dobré fungování opravy a originálu je založeno na shodě v jejich materiálových vlastnostech (**technické hledisko/požadavky**). Kompatibilita je tak hodnocena na základě shody ve složení a vybraných vlastnostech, které popisují stav a chování originálu i doplnku v různých podmínkách (mikrostruktura, porozita, nasákavost vodou, pevnost, elasticita, teplotní roztažnost aj.). Její pojetí je však možné rozšířit i na požadavky při zpracování opravné směsi (zpracovatelnost, aplikační podmínky, dosažení požadovaného výtvarného efektu), vliv podmínek na zrání aj. Návrh složení opravného materiálu však nutně souvisí také s koncepcí obnovy i reflexí současné praxe založené na rozvoji nových materiálů pro obnovu, které nelze paušálně z použití historických materiálů vyloučit.

Z popisu výše uvedených hledisek je zřejmé, že při obnově kamenných památek je nutné uvažovat v širokém kontextu dané památky. Bezesporu hlavním východiskem je snaha „blížit se originálu“, kterou je nutné uvažovat v široké škále hodnot opravovaného objektu. Hodnocení opravy na bázi jednoho hlediska, v současné době často prováděné pouze na úrovni porovnání materiálových charakteristik nebo naopak zpracovatelských vlastností s použitím materiálů, se kterými „je zkušenost“, avšak bez reflexe originálu, je nepřesné a zcela mimo pochopení dané problematiky.

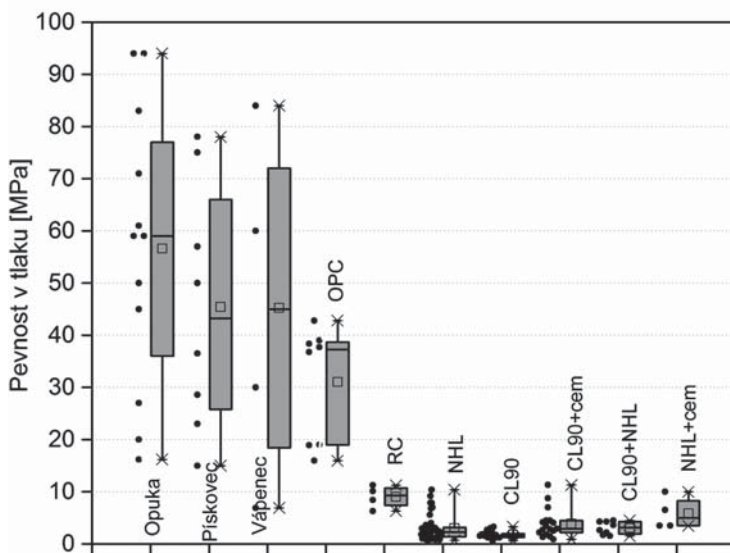
## Požadavky na materiálové vlastnosti umělého kamene

Při doplňování hornin by mělo složení opravné směsi vycházet ze složení doplňované horniny, jehož charakterizaci je možné provést na základě podrobné analýzy. V případě hornin však na rozdíl od historických malt či omítek nastává značný problém navrhnout opravnou směs tak, aby zcela reflektovala složení originálu. Typickým příkladem je návrh umělého kamene na křemičité typy pískovců (např. maletínský, mšenský, královédvorský pískovec aj.), pro které ideální opravná směs, která by obsahovala pouze křemičité složky, neexistuje. U tohoto typu hornin, které jsou někdy extrémně pevné a houževnaté, se proto přistupuje k používání cementových doplňků s využitím křemičitého kameniva, díky kterému se vlastnosti doplňku mohou porovnávat s těmito typy hornin. Opačným příkladem, kdy je složení originální horniny možné při návrhu opravné směsi reflektovat, je např. kutnohorský vápenec. Tato hornina představuje porézní typ vápence biogenního původu, který kromě kalcitu obsahuje znečišťující příměsi křemičitého původu – křemen, glaukonit, živce (Ďoubal 2015). Pro opravu památek z tohoto typu horniny jsou dobré zkušenosti s využitím minerálních směsí na bázi přirozeně hydraulického vápna (NHL), které se mineralogicky velice podobá skladbě horniny (obsahuje kalcit, křemičitany vápenaté). Pro zlepšení plastických vlastností směsí se v praxi často využívá ve směsi se vzdušným vápnem. K docílení maximální shody s tmeleným substrátem horniny se jako kamenivo užívají drtě originální horniny, která ovlivňuje estetické vlastnosti i podobné chování tmelu hornin v atmosférických podmínkách.

Jak již bylo naznačeno, má při koncipování opravné směsi umělého kamene na minerální bázi určující vliv typ pojiva a použitého kameniva (Bochen a Labus 2013, Pavía a Treacy 2006). Ve skupině minerálních typů umělého kamene, který se pro doplňování hornin používá, jsou směsi na bázi vzdušného vápna méně pevné oproti hydraulickým pojivům (hydraulickým vápnům, cementům), avšak vyznačují se vyšší propustností pro vodu, vodní páru i elasticitu. **Tabulka 11** uvádí porozitu a nasákavost tuzemských hornin, které se tradičně využívaly na našem území k sochařským účelům. Pro porovnání byly shromážděny také data pevnosti v tlaku pro horniny a minerální opravné směsi, které se využívají pro jejich opravu (**obr. 233**). Z porovnání výsledků je zřejmé, že většina hornin se vyznačuje vysokou pevností a houževnatostí, které pomocí minerálních směsí u většiny hornin nelze docílit. Jediné směsi, které by v tomto ohledu mohly konkurovat, jsou směsi na bázi cementu (OPC). Jejich účinek na kámen jsou však všeobecně známé, zvláště v případech, kdy jsou použity na poréznější a nasákavější substráty.

**TABULKA 11:** Porovnání vlastností vybraných tuzemských typů hornin. Data byla naměřena autory na souboru vzorků nebo shromážděna z dostupných zdrojů (www.geology.cz, ČSN 733251, ČSN 721800)

Hornina	Pórovitost (%)	Nasákavost vodou (hm. %)	Pevnost v tlaku (MPa)
Hořícký pískovec	13,7	7,7–8,4	28,6–38,6
Maletínský pískovec	13,9	5,5–11,2	75,0–78,0
Kutnohorský vápenec	22,5	11,5–12,5	3,5–13,0
Opuky	13,7–40,1 (Přední Kopanina)	8,0–19,1	15,0–94,0



**OBRAZEK 233:** Celková porozita minerálních směsí/umělého kamene s různým typem pojiva. Data reprezentovaná body byla shromážděna z literatury nebo přímo naměřena autory. Šedá oblast reprezentuje hodnoty s nejvyšší četností. V grafu je označena střední hodnota (aritmetický průměr) a tzv. vážený průměr, který počítá průměr v závislosti na četnosti výskytu.

Plnivová složka ovlivňuje kvalitu umělého kamene a do určité míry i vlastnosti malt zvoleným mineralogickým složením, distribucí a tvarem částic. Při jejím výběru v případě doplňků na kámen je jeho skladba dána strukturou doplňované horniny. Nezbytné také je, aby navržené kamenivo opravné směsi vyhovovalo zpracovatelskými vlastnostmi, které zajistí kvalitní provedení opravy. Běžnou praxí, která zajistí maximální shody s tmelenou horninou, je využívání drcené horniny, které upraví strukturu i zpracovatelské vlastnosti doplňku i zajistí přiblížení materiálovým vlastnostem tmelené horniny. Základním požadavkem, který souvisí s volbou kameniva doplňku, je požadavek na rozměrovou stálost opravné směsi v čerstvém i zatvrdlém stavu. Problémy se vznikem trhlin nastávají nejčastěji při koncipování opravných směsí jemnozrnných hornin (např. opuky, jemnozrnné pískovce), kde je pro docílení odpovídající struktury horniny nutné využívat vysokého podílu jemnozrnného kameniva.

Kromě pečlivého výběru složek lze vlastnosti opravných směsí umělého kamene ovlivnit 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 mění se s ní související vlastnosti (nasákavost, pevnost aj.). Nadbytek vody nebo pojiva v maltě je také určující při smrštění opravných směsí, které se projevuje vznikem trhlin a prasklin v čerstvém i zatvrdlém stavu. Také podmínky přípravy tvárné směsi (příprava pojiva, zpracování směsi, čas a způsob míchání), následného zrání a expozice mohou zásadně ovlivnit vlastnosti opravné směsi a následně ovlivnit trvanlivost opravy (Lanas et al. 2004, Pozo-Antonio 2015).

## Kritéria pro hodnocení umělého kamene

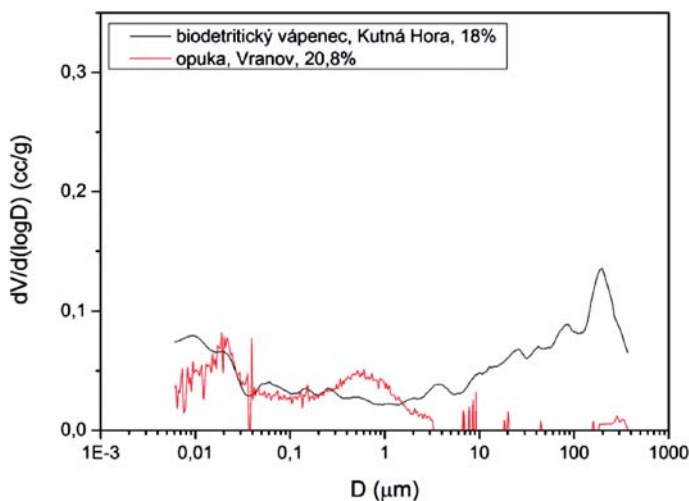
Při provádění oprav se zásah hodnotí z několika hledisek, která zahrnují zejména kritéria na shodu v estetických kvalitách opravy (barevnost, textura, vzhled povrchu), v materiálovém složení a shodě ve fyzikálně-mechanických vlastnostech navrženého opravného systému a tmeleného podkladu. Všechna uvedená hlediska musí vycházet z poznání tmeleného substrátu (horniny), zejména jeho chemického a látkového složení, mikrostruktury a aktuálního stavu.

Na základě mineralogického složení se většinou určí jednotlivé složky substrátu, které slouží pro výběr pojivového systému opravné malty/umělého kamene. Na základě znalosti mikrostruktury a textury opravované horniny se připravují směsi s různým obsahem pojiva a plniva, které jsou kromě testování fyzikálně-mechanických vlastností hodnoceny i po stránce zpracovatelských vlastností. Na základě nich jsou následně vytipovány složky opravné směsi a jejich vzájemný poměr, u nich se dále testuje jejich shoda v materiálových charakteristikách se substrátem. Pro porovnání originálu a umělého kamene není nutné provádět stanovení všech materiálových charakteristik. Pro zjištění jejich interakce jsou zásadní zejména charakteristiky, které popisují mikrostrukturu a interakci s vodou, příp. odezvu vůči změnám vnějších podmínek. Nezbytné je také určení chování při mechanickém namáhání, které má blízký vztah k odolnosti materiálu vůči různým vnějším vlivům. Při řešení opravy hornin pomocí minerálních směsí však porovnání na základě posouzení mechanických charakteristik většinou ztrácí smysl (odlišný původ materiálů) a využívá se spíše pro ohodnocení trvanlivosti navrženého opravného materiálu. Z tohoto hlediska je významnějším parametrem pro srovnání např. dynamický modul pružnosti nebo rychlost ultrazvukové transmise. Modul pružnosti je mírou odezvy materiálu na vnější změny a měl by být při dobré interakci u obou materiálů maximálně podobný. Rychlost ultrazvukové transmise představuje novou možnost posouzení shody opravného materiálu vzhledem k substrátu, neboť je mírou stavu materiálů, jejich porézní struktury a v neposlední řadě také kompaktnosti, tj. objemové hmotnosti. Přehled charakteristik pro srovnání uvádí **tab. 12** společně s kritérii na doplňky/umělý kámen (tzv. kritéria pro pozitivní hodnocení). Tyto intervaly, které byly shromážděny z relevantní odborné literatury, reprezentují možnou odchylku vlastností doplňku od tmeleného substrátu, která nezpůsobí jeho poškození (Delgado Rodrigues a Grossi 2007, Silva et al. 2015). Opravné materiály s vlastnostmi mimo tyto intervaly, lze považovat za nevhodné a poškozující. Při doplňování hornin s různorodou skladbou a vlastnostmi je navržený postup hodnocení opravného systému často velice náročný, neboť vyžaduje individuální řešení pro každý typ horniny i provedení náročných zkoušek materiálů. V praxi lze z důvodů časové a finanční náročnosti tento přístup uplatňovat pouze v ojedinělých případech nebo modelových projektech restaurování/obnovy. V současné praxi se proto řešení doplňků provádí spíše použitím „osvědčených“ materiálů a receptur, které více či méně reflektují vlastnosti substrátu. Hojně se také používají tzv. prefabrikované směsi, které mají svá pozitiva spočívající v dobré zpracovatelnosti, aplikaci, standardní kvalitě. Nevýhodou je však často složení maltových směsí; většinou se jedná o komplikovanou směs pojiva, kameniva, přísad a aditiv, které upravují vlastnosti malty, avšak nelze u nich předpovědět efekt na doplňovaný substrát ani průběh stárnutí.

**TABULKA 12:** Indikátory kompatibility a stupně hodnocení dle Silva et al. (2015), Delgado Rodrigues a Grossi (2007)

Charakteristika	Indikátor kompatibility	Hodnocení kompatibility (kritéria pro hodnocení)
<b>Chemické a mineralogické složení</b>	substrát (S) pojivo, kamenivo (oprava) (R)	S a R (substrát a oprava) stejně → 0 odlišné → 10 nebo stejně → 0 částečně odlišné → 5 zcela odlišné → 10 (hodnocení lze upřesňovat na základě shody v obsahu jednotlivých složek, vyžaduje přesnou znalost složení originálu)
<b>Porézní systém</b>	distribuce (S, R)	S a R (substrát a oprava) odlišné o méně než 10% → 0 10–30% → 2 30–50% → 5 více než 50% → 10
<b>Hydrofilní vlastnosti (hygričké vlastnosti)</b>	koefficient kapilární absorpce vysychání (S, R) propustnost pro vodní páry (S, R)	
<b>Mechanické vlastnosti</b>	pevnost v tlaku (S, R) dynamický modul pružnosti (S, R)	

Látkovou i mikrostrukturní charakterizaci horniny 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). Další možností je využití rentgenové difrakce (RTG) nebo termické analýzy. 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. Metodami se charakterizují vlastnosti, které ovlivňují absorpci a transport 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 jejich výstupů. Její důležitost spočívá v popisu porézní struktury materiálů související s hodnocením transportního chování vody v substrátu a opravném materiálu; z hlediska interakce materiálu s vodou jsou nejdůležitější tzv. kapilární póry s velikostí 0,1–5 mm, které se podílejí na transportu vody v porézním systému. Ideální je proto navrhnout doplněk tak, aby se se substrátem v zastoupení kapilárních pórů maximálně shodoval. Význam a přínos metody ilustruje **obr. 234**, 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 cca 20%, avšak skladba jejich



**OBRAZEK 234:** Distribuce velikosti pórů dvou typů tuzemských hornin (kutnohorský vápenec, opuka) se stejnou celkovou porozitou. Rozdíly v distribuci pórů ovlivňují rozdílný transport vody (nasávání i vysychání) materiálu

pórů je zcela odlišná. Opuka obsahuje střední až drobné póry, naopak vápenec je charakteristický přítomností, tzv. makropórů. Přítomnost spíše 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 i chování materiálů při styku s vodou. Mezi nejdůležitější patří kapilární absorpce, která se měří jako koeficient kapilární absorpce vody a vyjadřuje se jako množství vody, které je schopné 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 doplňku 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  $R_c$ , příp. tahu za ohybu  $R_f$  a dynamický modul pružnosti  $E_d$ . Z ověřovacích studií provedených 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 dané odlišným původem a mineralogií přírodního substrátu oproti minerálním doplňkům.

### Návrh doplňků pro biotritické vápence – příklad řešení z praxe

Biotritické nebo také biogenní vápence patří do skupiny organogenních hornin druhohorního nebo třetíhorního stáří, které vznikaly usazením původem biogenní kalcitové klastiky a následným stmelením. Dle původu a způsobu diagenese má tento typ hornin charakteristické mineralogické složení i mikrostrukturu; horniny lze klasifikovat jako vápnité pískovce až pískové vápence s proměnlivým obsahem kalcitu a ostatních minoritních složek zejména

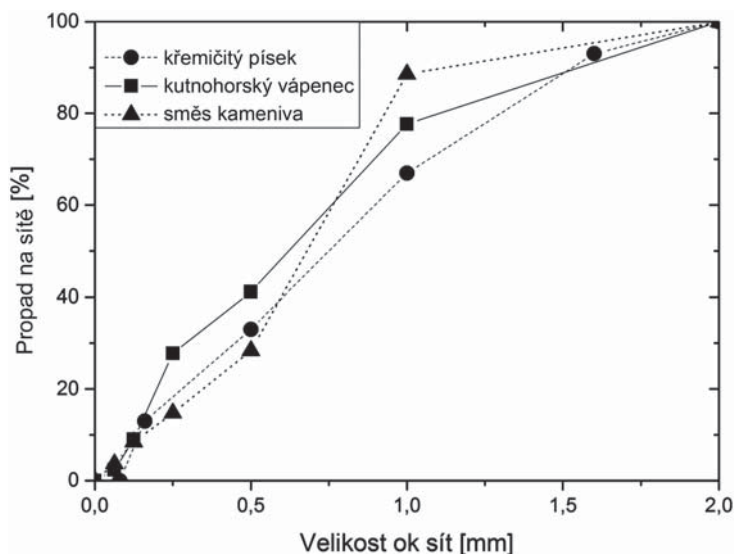
křemene, živců nebo úlomků metamorfovaných hornin, příp. glaukonitu. Na našem území se biodetritické vápence historicky těžily v okolí Kutné Hory. Zdejší kámen, též všeobecně známý jako „mušlák“ či „řasák“ druhohorního stáří, se hojně využíval jako stavební i dekorativní kámen zejména v Kutné Hoře a jejím blízkém okolí. Další, k našemu území blízkou, lokalitou výskytu tohoto typu hornin je jižní Morava, kam se biogenní vápence částečně importovaly z blízkého Dolního Rakouska z lomů v pohoří Leitha Gebirge – tzv. Leithakalkstein (Gryndlová 2007). Oba typy vápenců byly velice oblíbené a díky svým vlastnostem a snadné opracovatelnosti hojně využívané od období gotiky až do 18. století pro stavební i dekorativní účely. Kvůli chemickému složení však tento typ hornin snadno podléhá degradaci zvláště v silně znečištěných podmínkách atmosféry. Poškození se projevuje vymýváním kalcitové složky horniny nebo naopak stmelněním povrchu (v důsledku chemické přeměny kalcitu na chemicky rozpustnější formy), které se projevuje vznikem tmavých krust ve srážkových stínech. V důsledku chemické přeměny nastává rychlý úbytek hmoty horniny zvláště patrný na místech přímo vystavených působení srážek. Při obnově děl s historickou hodnotou z tohoto typu materiálu (kamenné plastiky, části architektury, prvky zdiva) je jedním z možných řešení opravy doplnění/náhrada poškozených částí umělým kamenem. Při formulaci umělého kamene na tento typ hornin se v současné době používají maltové směsi s různým typem minerálního pojiva, nejčastěji přirozeně hydraulického vápna (NHL).

Tato studie představuje vlastnosti vybraných opravných směsí/umělého kamene pro kutnohorský vápenc i vybraný litavský vápenc pocházející z lokality St. Margarethen, které byly koncipovány v rámci obnovy západního průčelí kostela sv. Jakuba v Kutné Hoře. Při obnově/restaurování byly řešeny náhrady dožilých nebo zvětralých částí stavebních nebo architektonických prvků, na které byl původně použit kutnohorský vápenc, který se při náhradách nahrazoval importovaným vápencem z lokality St. Margarethen. Umělý kámen byl koncipován pro opravu chybějících nebo zvětralých částí, doplnění nerovností horniny, ale i pro vyplnění spár a sjednocující úpravu povrchu originálu i doplňkové horniny. Při výběru vhodného systému umělého kamene testovali autoři tvárné maltové směsi na bázi přirozeně hydraulického vápna (NHL), které svými zpracovatelskými i optickými vlastnostmi vyhovuje typu tmeleného podkladu (výborná zpracovatelnost, okrová barva tmelů, přirozený vzhled, subjektivně dobré vlastnosti v průběhu opracování). Výběr pojivového systému nebyl náhodný, kromě výše uvedených pozitiv jsou s těmito typy vápen dlouhodobě dobré zkušenosti v podmínkách exteriéru. Vlastnosti opravných směsí byly upravovány typem použitého kameniva. Z hlediska provedení opravy je ideální využití drcené horniny (drtě vápence), avšak při takové modifikaci složení může dojít ke změně vlastností zatvrdlých směsí např. v porovnání s křemičitými typy kameniva. Shoda ve vybraných vlastnostech je prezentována na základě charakterizace mikrostruktury hornin i opravných malt a měření vybraných fyzikálních a mechanických vlastností.

## Materiály opravných malt

Při návrhu tvárných směsí umělého kamene bylo vybráno celkem 8 receptur, jejichž složení uvádí **tab. 13**. Směsi byly koncipovány s cílem ohodnotit faktory, které ovlivňují vlastnosti umělého kamene v zatvrdlém stavu, na základě nichž by bylo možné navrhnout složení opravné směsi, které maximálně odpovídá typu tmelené horniny. Hodnocen byl vliv typu pojiva, kameniva i úprava receptury (změna obsahu pojiva).





OBRÁZEK 235: Srovnání křivek zrnitosti použitých kameniv

Při míchání zkušebních záměsí byla použita přirozeně hydraulická vápna (NHL2, 3,5 a 5) o různé pevnosti (hydraulickém modulu). Pro jejich modifikaci bylo použito vzdušné vápno, vápenný hydrát CL 90, které se do směsí umělého kamene používá zejména kvůli zlepšení a prodloužení zpracovatelnosti a plasticity tvárných směsí v čerstvém stavu. Ve zkušebních záměsích byly použity 3 typy kameniva s cílem ohodnotit vliv různého typu kameniva na vlastnosti zatvrdlých malt. Jako základní byla použita drť kutnohorského vápence. Toto kamenivo nejlépe vyhovuje požadavkům umělého kamene pro daný typ hornin. Normovaný křemičitý písek, který vychází z normy EN 196-1, reprezentuje standardní čistě křemičitý typ kameniva navržený tak, aby malty, v nichž je tento typ kameniva použit, dosahovaly maximálních mechanických vlastností. Třetím typem kameniva byla směs navržená restaurátory, která obsahuje směs obou typů plniv (křemičitý písek Střeleč a drcený vápenec z Vápenky Čertovy schody). U všech typů kameniva byla provedena úprava frakce tak, aby zrnitost odpovídala struktuře tmelených hornin. Z kameniva byly odstraněny hrubší frakce přesátím ( $D < 2$  mm). U použitých kameniv byla provedena síťová analýza (obr. 235).

## Příprava vzorků

Opravné malty byly shodně míchány ve dvou různých objemových poměrech pojivo:kamenivo (1:2 a 2:1, obj.). První receptura reprezentuje klasickou recepturu umělého kamene pro daný typ horniny. Druhá, charakteristická vysokým podílem pojivové složky se využívá při doplňování míst, kde je požadována vysoká tvárnost směsí. Do testování byla zařazena s cílem ohodnotit vliv změny receptury. Množství vody přidávané do záměsí bylo u různých směsí odlišné, cílem bylo připravit směsi o stejné konzistenci odpovídající konzistenci vhodné pro tmelení (rozliv  $140 \pm 10$  mm). Konzistence čerstvé malty byla zkoušena dle ČSN EN 1015-3. Testování proběhlo po 3 měsících uložení v podmínkách, které stanovuje pro tento typ malt norma ČSN EN 1015-11.

**TABULKA 13:** Složení tvárných směsí umělého kamene. Receptura označuje objemový poměr pojivo: kamenivo

Směs	Receptura	Kamenivo			Pojivo				w
		Kutnohorský vápenc	Křemičitý písek	Směs kameniv	CL 90	NHL 2	NHL 3,5	NHL 5	
1	1:2	2	-	-	-	1	-	-	0,28
2	1:2	2	-	-	0,5	0,5	-	-	0,26
3	1:2	2	-	-	-	-	1	-	0,28
4	1:2	-	-	2	-	-	1	-	0,23
5	1:2	2	-	-	-	-	-	1	0,28
6	2:1	1	-	-	1	1	-	-	0,28
7	2:1	-	1	-	-	2	-	-	0,28
8	2:1	-	1	-	1	1	-	-	0,28

### Posouzení na základě rozhodných charakteristik

Pro porovnání originálu a umělého kamene není nutné provádět stanovení všech materiálových charakteristik. Pro zjištění jejich interakce jsou zásadní zejména charakteristiky, které popisují mikrostrukturu a interakci s vodou, příp. odezvu vůči změnám vnějších podmínek. Z vlastností, které charakterizují mechanické vlastnosti materiálů, byly stanoveny dynamický modul pružnosti a rychlost ultrazvukové transmise. Přehled charakteristik pro srovnání uvádí **tab. 14** společně s odkazem na platné normy nebo metody zkoušení, dle kterých byly vlastnosti stanoveny. Při posuzování kompatibility doplňků byla použita kritéria hodnocení, která uvádí **tab. 12**.

**TABULKA 14:** Přehled testovaných charakteristik a doporučení pro jejich stanovení

Zkoušky	Typ zkoušky	Označení	Jednotky	Normy a postupy pro stanovení
charakterizující porézní systém	Nasákavost vodou za atm. tlaku	-	[%]	ČSN EN 13755
	Otevřená pórovitost	P <sub>0</sub>	[%]	ČSN EN 1936
	Celková pórovitost	P	[%]	Rtuťová porozimetrie
související s mechanickými vlastnostmi	Objemová hmotnost zatvrdlé malty	ρ <sub>v</sub>	[kg·m <sup>-3</sup> ]	ČSN EN 1015-10
	Dynamický modul pružnosti	E <sub>D</sub>	[MPa]	ČSN 14146
	Ultrazvuková transmise	v	[km/s]	ČSN EN 14579

### Výsledky – vlastnosti hornin

Oba typy vápenců se vyznačují značně nehomogenními vlastnostmi souvisejícími s jejich heterogenní strukturou (**tab. 15, 16**). Společnými znaky jsou vysoká, i když u obou hornin odlišná porozita (22–35 %) a nasákavost vodou (10–12 %), které přispívají k jejich degradaci v podmínkách atmosféry. Oba parametry přitom souvisí s porézní skladbou, která je u obou hornin lokalizována přibližně ve stejné oblasti středních až makropórů, charakteristické velikostí 10–100 μm. Vyšší porozita u vápence St. Margarethen souvisí se zastoupením středních

pórů, které je u této horniny vyšší, stejně jako četnost těchto pórů (**obr. 236**). Při porovnání ostatních charakteristik je patrný rozdíl v objemové hmotnosti i modulu pružnosti; vyšší hodnoty obou parametrů u vápence rakouské provenience souvisejí pravděpodobně s vyšší mírou a typem diagenézy (stmelení) horniny. Vysoká hodnota porozity pravděpodobně souvisí s tzv. intrapartikulární porozitou (porozita zrn neboli klastů).

## Vlastnosti opravné malty/umělého kamene – odezva materiálů na interakci s vodou

Z naměřených hodnot vybraných charakteristik vyplývá, že vlastnosti umělého kamene na bázi NHL vyhovují požadavkům na tmelení biogenního typu vápenců. Jejich vlastnosti lze však do jisté míry ovlivňovat úpravou složení tvárné směsi. Překvapivě nejmenší vliv má typ pojiva (typy NHL i přírůstek CL 90). Naopak nejvýznamnější vliv na vlastnosti zatvrdělých směsí má receptura, tj. poměr složek, ale především typ kameniva.

**TABULKA 15:** Vlastnosti přírodních hornin – vlastnosti charakterizující pórezní systém a hygrické vlastnosti

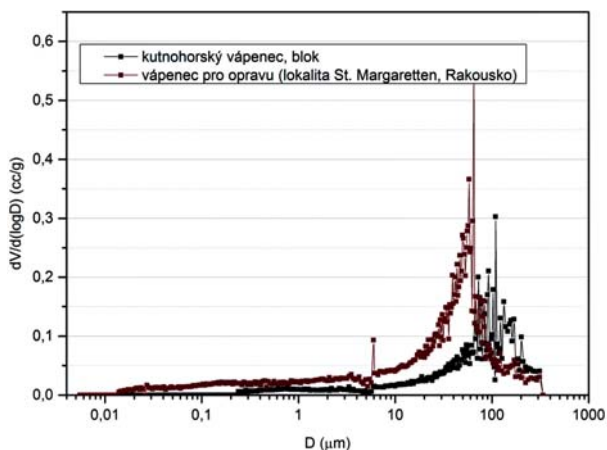
Typ horniny	Nasákavost [hm. %]	Otevřená pórovitost [%]	Celková pórovitost [%]	Střední velikost pórů [%]
kutnohorský vápenc	11,5–12,5	21,5	22,5	10–300*
St. Margarethen	10,4–20,8	36,5	35,1	10–100

\* stanoveno rtuťovou porozimetrií

**TABULKA 16:** Vlastnosti přírodních hornin – vlastnosti související s mechanickými charakteristikami

Typ horniny	Objemová hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]	Dynamický modul pružnosti [MPa]	Ultrazvuková transmise [km/s]
kutnohorský vápenc	1640–1850	2,1–7,8	1,6–2,3
St. Margarethen	1900–2120	20,0–23,8	3,4–3,7

Je všeobecně známo, že typ pojiva utváří vlastnosti a chování malty – mikrostrukturu, pevnost, interakci s vodou či odezvu vůči změnám vnějších podmínek (teplotě, vlhkosti, napětí). Obecně platí, že vzdušná vápenná pojiva vytváří malty s otevřenou, vysoce porézní strukturou (charakteristicky 25–35 %), s vysokou nasákavostí vodou a nižší pevností (Bochen a Labus 2013, Pavia a Treacy 2006). S rostoucím hydraulickým charakterem klesá porozita malt a naopak roste její odolnost při mechanickém namáhání (Lanas a Alvarez-Galindo 2003, Marques et al. 2006). Z tohoto hlediska by mělo platit, že malty s rostoucím hydraulickým modulem by měly vykazovat podobný model chování, tj. směsi s pojivem NHL 3,5 (3) a NHL 5 (5) by měly mít nižší porozitu, nasákavost a vyšší míru stmelení, která se projeví na objemové hmotnosti, modulu pružnosti i rychlosti ultrazvukové transmise. V předkládané studii se však daný trend nepotvrdil; malty s NHL 2 (1), NHL 3,5 (3) i NHL 5 (5) jsou prakticky stejně porézní a nasákové (**tab. 17**), jejich mírné odlišnosti lze spatřovat pouze v hodnotách modulu pružnosti a rychlosti UZ transmise, které potvrzují mírně vyšší pevnost těchto směsí, i když v minimálním odstupě od směsi s NHL 2 (**tab. 18**). Tento výsledek je značně překvapivý, avšak



**OBRAZÉK 236:** Srovnání skladby pórů biodetritických vápenců z Kutné Hory a z lokality St. Margarethen (Rakousko)

ne v rozporu s publikovanou literaturou, která se odlišnými typy hydraulických vápen a jejich srovnáním v zatvrdlém stavu zabývá (Gullota et al. 2013, Grilo et al. 2014). Některé studie ukazují na malý rozdíl v chování hydraulických vápen a potvrzují výrazný účinek kameniva, jehož vlastnosti modifikují malty. Z možných příčin podobného chování studovaných malt lze jednoznačně vyloučit krátkou dobu tvrdnutí; malty byly testovány po 3 měsících, při delší době zrání malt se však jejich vlastnosti zásadně nemění. Možným vysvětlením tedy zůstává účinek kameniva, které bylo použito při přípravě základních směsí (KH drtě). Ukazuje se, že drcená hornina zásadně mění vlastnosti malt. Malty s tímto typem kameniva výrazně zvyšují porozitu, nasákavost vodou a snižují elasticitu, objemovou hmotnost a rychlost UZ transmise, které jsou mírou stmelení (např. směsi 6 a 8). Vysvětlení spočívá v charakteru samotného kameniva. Drť horniny se vyznačuje vysokou sypanou hmotností ( $1370 \text{ kg/m}^3$ ) a nasákavostí (36,4%) oproti křemičitému písku ( $1690 \text{ kg/m}^3$  a 22,3%) nebo hodnotám naměřeným na směsném typu kameniva ( $1520 \text{ kg/m}^3$  a 24,9%). Při hodnocení účinku pojiva je nutné také zmínit účinek přídavku vápna, které má jen nepatrný vliv na většinu zkoumaných vlastností, s výjimkou modulu pružnosti, který mírně zvyšují – malty jsou více elastické (např. směsi 1, 2 nebo 7, 8). V každém případě musí být účinek typu a vlastností kameniva dále ověřen.

Účinek množství pojiva u maltových směsí je diskutován v několika studiích, v nichž se shodně uvádí, že množství pojiva v minerální směsi (maltě) ovlivňuje fyzikální i mechanické vlastnosti. Malty s vyšším obsahem pojiva jsou více pevné v porovnání s klasickými recepturami, které se připravují v objemovém poměru pojiva:kameniva 1:2 – 1:4, obj. (Lanas et al. 2004, Lanas a Alvarez-Galindo 2003). Nárůst pevnosti je však patrný jen do určitého množství pojiva; výrazné zvýšení pojiva ve směsi vede k poklesu pevnosti pravděpodobně z důvodu vzniku mikroskopických trhlin, které vznikají v pojivu při tuhnutí a tvrdnutí zvláště v maltách s vápennými pojivy (vzdušnými i slabě hydraulickými). Účinek množství pojiva v maltě také závisí na jeho typu. V případě studovaných směsí se prokázal účinek obsahu pojiva u obou studovaných receptur – směsi připravené v poměru pojiva a kameniva 1:2 jsou méně porézní a nasákové oproti všem studovaným tvárným směsím 2:1. Vyšší obsah pojiva

ovlivňuje zásadně objemovou hmotnost (klesá podíl kameniva), avšak evidentně nemá zásadní vliv na modul pružnosti a rychlost transmise UZ signálu, které jsou více funkcí typu pojiva než jeho množství.

**TABULKA 17:** Vlastnosti přírodních hornin a směsí umělého kamene charakterizující interakci materiálů s vodou

Receptura	Nasákavost [hm. %]	Otevřená pórovitost [%]	Celková pórovitost [%]
kutnohorský vápenec	11,5–12,5	21,5	22,5
St. Margarethen	10,4–20,8	36,5	35,1
1	18,8	31,5	31,1
2	17,1	28,5	30,3
3	18,4	31,5	-
4	15,0	24,5	28,4
5	21,7	36,2	32,4
6	29,3	49,8	45,9
7	23,3	38,8	33,7
8	24,7	39,9	35,1

**TABULKA 18:** Vlastnosti přírodních hornin a směsí umělého kamene související s mechanickými vlastnostmi

Označení receptur	Objemová hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]	Dynamický modul pružnosti [MPa]	Ultrazvuková transmise [km/s]
kutnohorský vápenec	1640–1850	2,1–7,8	1,6–2,3
St. Margarethen	1900–2120	20,0–23,8	3,4–3,7
1	1690	3,0	1,5
2	1710	3,7	1,6
3	1680	3,2	1,6
4	1800	5,2	1,9
5	1600	3,2	1,6
6	1450	2,6	1,6
7	1590	4,4	2,3
8	1580	4,8	1,9

Jednoznačně nejvíce určující vliv má typ zvoleného kameniva. Účinek drtě kutnohorského vápence na vlastnosti tvárných směsí byl již zmíněn; podobný trend lze však také spatřit u kameniva, kde byla část křemičitého kameniva nahrazena vápencovou drtí odlišného původu – vápenka Čertovy schody (směsí 3 a 4). Z výsledků lze v dané studii odvodit obecný závěr, že křemičitý typ kameniva přispívá ke zvýšení pevnosti a houževnatosti malt a snižuje jeho porozitu a nasákavost vodou. Naopak více porézní a nasáková kameniva působí opačným účinkem. Vliv distribuce kameniva nebyl v dané studii diskutován, stejně jako chemické

a mineralogické složení, i když je všeobecně jejich možný účinek znám. Odlišnosti v distribuci užitých kameniv považují autoři za minimální a jejich účinek v tomto případě za marginální oproti diskutovanému účinku charakteru kameniva.

## Shrnutí

Při koncipování opravných směsí umělého kamene je důležité přizpůsobit jeho vlastnosti opravovanému typu horniny. V této studii byly analyzovány doplňky na bázi minerálních pojiv pro dva typy tzv. biogenních vápenců, které se historicky využívaly pro sochařské i stavební účely na našem území. Směsi jsou určeny pro opravu a doplnění památek v případě, že jsou z různých důvodů poškozeny. Pro tmelení byly vybrány tmely na bázi přirozeně hydraulického vápna, které se v minulosti osvědčily a vyhovují komplexním nárokům na opravné materiály pro opravu kamenných objektů s historickou hodnotou. Studie prokázala, že při koncipování opravné směsi je nutné brát v úvahu několik faktorů, které mohou ovlivnit jeho vlastnosti v zatvrdlém stavu. Zejména je to typ kameniva, úprava receptury a v neposlední řadě také typ použitého pojiva. Do opravných směsí lze použít širokou škálu kameniv, avšak použití drcené horniny (vápencové drtě) nejlépe vyhovuje estetickým požadavkům na kvalitu a vzhled doplňků. Studie však ukázala, že tento tradiční způsob modifikace směsí může zásadně ovlivnit vlastnosti doplňků v zatvrdlém stavu. Přídavkem porézní drtě vápence se neúměrně zvyšuje porozita a nasákavost doplňku, což ovlivňuje i jeho pevnost a v konečném důsledku se může zkracovat životnost opravy. Stejný účinek lze zaznamenat v případě, pokud se zvýší obsah pojivové složky v tvárné směsi. Snížení porozity a nasákavosti doplňků lze docílit úplnou nebo částečnou náhradou vápencového kameniva křemičitým pískem. Jeho obsah lze upravovat v závislosti na typu opravované horniny. Zajímavým výsledkem jsou minimální rozdílné vlastnosti doplňků s různým typem hydraulického vápna (NHL2-5).

## Poděkování

Kapitola byla vytvořena s podporou projektu Ministerstva kultury ČR, Program aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity (NAKI) „Podmínky a požadavky kompatibilní péče o historické anorganické porézní materiály“, 2012–2015, id. č. projektu DF12P01OVV018.

## Použitá literatura

- Bochen, J. a M. Labus. Study on physical and chemical properties of external lime-sand plasters of some historical buildings. *Construction and Building Materials*. 2013, 45, 11-19. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.086>
- Delgado Rodrigues, J. a A. Grossi. Indicators and ratings for the compatibility assessment of conservation actions. *Journal of Cultural Heritage*. 2007, 8(1), p. 32-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2006.04.007>
- Šoubal, J. *Kamenné památky Kutné Hory: restaurování a péče o sochařská díla*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2015. ISBN 978-80-7395-905-0.

- Grilo, J., A. Santos Silva, P. Faria, A. Gameiro, R. Veiga a A. Velosa. Mechanical and mineralogical properties of natural hydraulic lime-metakaolin mortars in different curing conditions. *Construction and Building Materials*. 2014, 51, 287-294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.045>
- Groot, C. Characterisation of old mortars with respect to their repairs: a state of the art. In: Groot, C., G. Ashall a J. Hughes (eds.). *Characterisation of Old Mortars with Respect to their Repair – Final Report of RILEM TC 167-COM*. [S. l.]: RILEM publications SARL, 2004, 57-76. <https://doi.org/10.1617/2912143675.005>
- Gryndlová, K. *Současný stav a provenience lithothamniových vápenců historických památkových objektů města Brna*. Diplomová práce. Brno: Masarykova univerzita, PŘF, 2007.
- Gulotta, D., S. Goidanich, C. Tedeschi, T. G. Nijland a L. Toniolo. Commercial NHL-containing mortars for the preservation of historical architecture. Part 1: compositional and mechanical characterisation. *Construction and Building Materials*. 2013, 38, 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.029>
- van Hees, R. P. J. Damage diagnosis and compatible repair mortars. In: Bartos P., C. Groot a J. J. Hughes (eds.). In: *Historic mortars: characteristics and tests*. Cachan: RILEM Publications, 1999, 27-35.
- Lanas, J. a J. I. Alvarez-Galindo. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behaviour. *Cement and Concrete Research*. 2003, 33(11), 1867-1876. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00210-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00210-2)
- Lanas, J., J. L. Pérez Bernal, M. A. Bello a J. I. Alvarez Galindo. Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*. 2004, 34(12), 2191-2201. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.02.005>
- Marques, S. F., R. A. Ribeiro, L. M. Silva, V. M. Ferreira a J. A. Labrincha. Study of rehabilitation mortars: construction of a knowledge correlation matrix. *Cement and Concrete Research*. 2006, 36 (10), 1894-1902. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.06.005>
- Pavía, S. a E. Treacy. A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars. *Materials and Structures*. 2006, 39(3), 391-398. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9033-4>
- Pozo-Antonio, J. S. Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate. *Construction and Building Materials*. 2015, 77, 472-478. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.115>
- Silva, B. A., A. P. Ferreira Pinto a A. Gomes. Natural hydraulic lime versus cement for blended lime mortars for restoration works. *Construction and Building Materials*. 2015, 94, 346-360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.058>

# Stanovení ekonomické náročnosti restaurátorského zásahu

**Petr Gläser, Jan Chlád, Jakub Ďoubal, Petr Justa, Jan Vojtěchovský**

Metodika pro oceňování restaurátorských prací a průzkumů je zaměřená na stanovení základních parametrů pro tvorbu cen v rámci přípravy a realizace restaurátorských akcí. Z charakteru restaurátorských prací, které jsou prováděny na unikátních objektech, které prošly individuálním stavebním a historickým vývojem, je zřejmé, že není možné stanovovat ceny paušálně na základě jednoduchého klíče a při tvorbě cen je vždy třeba vycházet z detailního poznání konkrétní situace. Cílem této metodiky je doporučit postupy, případně představit varianty, které umožní stanovit reálné ceny za restaurátorské práce, které budou odpovídat náročnosti a rozsahu dané intervence (**tabulka 19**).

## Postup při stanovení ceny, cenotvorba

Nákladové odhady na restaurátorské práce vytváří zpravidla přímo restaurátor, v případě větších stavebních celků je optimální, když vytváří restaurátor návrh rozpočtu v koordinaci s odborníkem na oceňování souvisejících stavebních prací. Tvorba cen zohledňuje aktuální fázi přípravy projektu a požadovanou přesnost zadavatele s ohledem na níže uvedená variantní řešení. Na základě složitosti dané problematiky a rozsahu plánovaného zákroku je možné rozhodnout, u které varianty se příprava zastaví; ve které fázi lze považovat vstupní informace za dostatečné. V některých případech bude dostatečné stanovit cenu na základě odhadu či poučeného odhadu. Naopak u komplikovaných restaurátorských akcí, vyžadujících detailní vhled do dané problematiky a zahrnující podrobné restaurátorské a materiálové průzkumy, případně ověření navrhovaných technologií, bude třeba zvolit přesnější variantu položkového rozpočtu či detailního položkového rozpočtu.

## Varianta 1 – výstup: Řádivý odhad nákladů na předmět zadání

Výstupem z varianty 1 není položkový rozpočet. Vzniká pouze rámcový odhad nákladů na celek či jeho dílčí části a upřesňuje se rozsah a náklady na soubor souvisejících prací.

Odhad vychází z odborného (vizuálního) posouzení objektu/předmětu, který zejména reflektuje vizuálně zjištěnou míru narušení (viditelné statické defekty, povrchové degradace apod.), kterou dává do kontextu s materiálem památky a rozměry předmětného objektu/předmětu.

Výsledkem tohoto odhadu je orientační částka, která umožní rámcové plánování financování restaurátorských prací. Je zde však nutné upozornit, že odchylka dané ceny se může výrazně lišit od ceny konečné za provedené práce. U běžného odhadu u varianty 1 je rozptyl nutně nejvyšší.



## **Varianta 2 – Výstup: Poučený odhad nákladů vhodný pro další administrativní zpracování**

Výstupem z varianty 2 je odhad rozpočtu na jednotlivé dílčí kapitoly předpokládaného zásahu členěné v návaznosti na požadovaný rozsah prací. Jedná se o základní informaci pro přípravu položkového rozpočtu. Podrobný vizuální průzkum je v případě druhé varianty rozšířený o dílčí materiálové a stavebně-technické průzkumy (statické, chemicko-technologické apod.) s cílem upřesnit příčiny a rozsah poškození.

Výsledkem tohoto odhadu je částka, na jejímž základě může vlastník objektu připravit finanční rozvahu předpokládaných nákladů a požádat o případnou alokaci potřebných finančních prostředků.

## **Varianta 3 – Výstup: Položkový rozpočet**

Výstupem z varianty 3 je položkový rozpočet, který splňuje veškeré parametry pro zadání prací v souladu s požadavky na výběrové řízení dle zákona o veřejných zakázkách.

V této fázi je již hotový podrobný restaurátorský průzkum, případně další soubor průzkumů dle zadání včetně komplexního vyhodnocení a je zpracován restaurátorský záměr, případně je zpracována projektová dokumentace (PD) památkové obnovy zadaného objektu.

V této variantě realizačního rozpočtu dochází k maximálnímu zpřesnění nákladů na budoucí restaurátorské práce a případné doporučení na provedení vzorové plochy (viz varianta 4). Investor v této variantě obdrží položkový rozpočet rozpracovaný do dílčích kapitol. Rozpočet zahrnuje veškeré náklady na restaurování a související práce včetně vedlejších rozpočtových nákladů, případně další specifikace souvisejících nákladů nutných k řádnému dokončení díla. Formu rozpočtu používá zadavatel rovněž jako slepý rozpočet pro potřeby VŘ.

## **Varianta 4 – Výstup: Detailní položkový rozpočet**

Výstupem varianty 4 je rozšířená forma třetí varianty, jejíž přidanou hodnotou je maximální věrohodnost odhadu. Položkový rozpočet zohledňuje zkušenosti z restaurátorských či jiných zásahů na vzorových plochách, provedených na daném objektu v rámci projektové přípravy.

Restaurování vzorové plochy se využívá v případech, kdy je třeba upřesnit navrhované technologie, případně přesněji odhadnout časovou náročnost či spotřebu materiálu. Restaurování vzorové plochy je vhodné v případech rozsáhlejších objektů se složitější problematikou restaurování. Na vzorové ploše může být proveden buď komplexní restaurátorský zážitek, nebo zkoušky jednotlivých uvažovaných technologií (čištění, zpevňování, odsolování). Provedení vzorové plochy umožňuje relativně přesně stanovit předpokládané náklady na restaurování, dále umožní upřesnění navrhovaných technologií a v neposlední řadě může restaurované vzorové pole sloužit jako referenční plocha pro následnou kontrolu kvality prováděných prací. Tato forma rozpočtu s maximálně možnou přesností specifikuje materiálové spotřeby na jednotlivé práce i časovou náročnost a může sloužit pro kontrolu reálnosti nabídkových cen.

V případě této varianty je nutné do kalkulace přípravných prací zahrnout náklady na zhotovení vzorových ploch.

TABULKA 19: Přehled variantních postupů tvorby rozpočtu

Var.	Účel	Zdroje	Výstup	Odchylna ceny	Forma rozpočtu
1	orientační cena pro hrubé plánování	první (obecné) seznámení se situací	souhrnný odhad nákladů na průzkum i restaurování, není vhodný pro VŘ	až 60 %	orientační odhad
2	forma pro alokaci nákladů	podrobné vizuální prohlídky, prvotní shromažďování informací	orientační dělení na průzkum a restaurování, není vhodný pro VŘ	až 40 %	kvalifikovaný odhad
3	realizace projektu	souhrn relevantních podkladů (průzkumy, pasport, výkaz výměr apod.)	forma pro VŘ	do 20 %	položkový rozpočet
4	forma pro významné pam. objekty	viz var. 3 + honorované zkoušky na vzorových plochách	doporučená forma pro VŘ	do 5 %	detailní položkový rozpočet

TABULKA 20: Hodinová zúčtovací sazba

Charakter odborné činnosti	Popis, role	Požadavky na výkony	Hodinová sazba
restaurování vysoce kvalifikovaná	hlavní, tzv. zodpovědný restaurátor, koordinátor projektu	vedení a koordinace, koordinace činnosti restaurátorů, řeší zvláště obtížné úkoly, stanovení koncepce,	1000 +
restaurování plně kvalifikovaná s praxí	zodpovědný restaurátor za celky	samostatný, řešení obtížných úkolů, stanovování koncepce	500–800
restaurování kvalifikovaná bez praxe	výkon dílčích restaurátorských úkonů, malá praxe	práce pod vedením, řešení dílčích úkolů	350–550
umělecko-řemeslné práce	výkon odborných umělecko-řemeslných prací souvisejících s restaurátorským zásahem	práce pod vedením restaurátora, nepodílí se přímo na restaurování, pomocné a odborné řemeslné práce	190–500
ostatní práce	pomocný pracovník	(univerzální charakter)	150–200

Podkladem pro hodinové sazby byl sazebník dle ČKAIT aktualizovaný pro rok 2015<sup>1</sup>

<sup>1</sup> [http://www.stavebnistandardy.cz/doc/vypocet/vyse\\_hodinovych\\_sazeb\\_2014.pdf](http://www.stavebnistandardy.cz/doc/vypocet/vyse_hodinovych_sazeb_2014.pdf), 5. 3. 2015.

## Metody zpracování cenové kalkulace

### 1) Náklady na restaurátorské práce metodou stanovení hodinové zúčtovací sazby (tabulka 20)

Obecně zařazení mezi jiné pracovníky (projektant, architekt, odborný dozor apod.) nebylo vybráno náhodou. Restaurátor nese stejnou míru odpovědnosti za výsledek své práce, vzhledem k tomu, že případná pochybení jsou velice často již nenapravitelná a dochází k fyzické (hodnotové) újmě na díle.

#### *HZS Hodinová zúčtovací sazba*

Používá se všude tam, kde je obtížné stanovit výkon na jednotku produkce (měrnou jednotku  $m^2 m^3$ ), tj. v našem případě hlavně v případech průzkumů a oceňování jednotlivých rozpočtů a zvláště složitých prací, u kterých nelze dopředu určit jejich rozsah.

Součástí sazby jsou: práce, základní vybavení, náklady na drobný (spotřební) materiál, režie, zisk, odvody.

Součástí sazby nejsou: restaurátorský materiál, náklady na stroje (pronájem) a speciální techniky a technologie, doprava, lešení a zařízení stavenišť.

### 2) Rozpočet agregovaných položek

Vychází z restaurátorských úkonů, které slučuje do větších celků jak ve vztahu k objektům (např. části architektury, fasády, sousoší), tak ke slučování položek (čištění + redukce biologického napadení).

V rozpočtu s agregovanými položkami doporučujeme držet se základních měrných jednotek, tj.  $m^2/h$ , h,  $m^2$ ,  $m^3$ , jen ve zcela výjimečných případech používat jednotku komplet (kpl.) z důvodů pozdější kontroly skutečně provedených prací.

Daný objekt je nutné rozdělit na menší funkční celky, které lze sdružovat v jiné logické struktury, což zjednoduší a celkově zpřehlední práci na přípravě, realizaci a následné kontrole. Jednoznačně to platí u architektury, ať už jde o práce v exteriéru, či interiéru. Tento způsob řešení je ale žádoucí i u větších kamenosochařských děl a složitějších sousoší.

Základní měrné jednotky lze díky pokročilým způsobům měření (vyhodnocení dat z 3D skeneru, obrazová analýza apod.) získat prakticky na každém objektu. Ne všude je to ale přínosné a žádoucí, což je dané určitými specifiky restaurátorského oboru.

Například u sochařského díla jsou práce často oceňovány na „figuru v životní velikosti“, což má svoje opodstatnění v kamenosochařské tradici. Dnes jsme sice schopní změřit přesně povrch a převést sochu na základní měrné jednotky např.  $m^2$  povrchu, ale v praxi bývá takový údaj využíváný spíše doplňkově. Nehledě na to, že mnoho restaurátorských úkonů, byť jde ve výsledku o povrch objektu, se zabývá i vnitřní strukturou díla.

Naopak v případě některých architektonických prvků je žádoucí provádět přesnější měření, než je v současné době zvykem. Je to např. případ říms, které jsou v rozpočtech uváděné často v jednotce běžných metrů. To je ve vztahu k jejich tvarovému řešení často silně zavádějící. Optimální je změřit přesně profil, jak se říká „narovnat“ (rozvinout) ho a převést běžné metry na metry čtvereční. Obdobné je to při oceňování malířských restaurátorských prací na prvcích architektury (např. na klenbách).

Rozhodnutí o použití toho kterého způsobu je pak na odpovědném restaurátorovi a důkladné přípravě – průzkumu díla.

### 3) *Kalkulace položek (R věty)*

Kalkulace vychází z určení složitosti a náročnosti daného úkonu se stupněm obtížnosti 1–5 respektive 7 a určením jeho nákladů a pracnosti. Každému úkonu je přiřazena obtížnost, dle míry poškození (míry nutné intervence), případně časové náročnosti úkonu na danou rozměrovou jednotku. Každá R věta obsahuje přímé náklady, tj. náklady na přímý materiál, včetně drobného spotřebního materiálu, dále náklady na práci a ostatní přímé náklady OPN související s úkonem, tj. sociální a zdravotní pojištění spjaté s objemem práce, spotřebu technologické energie, paliva. Dále správní režii a zisk.<sup>1</sup>

Neobsahuje náklady spojené s umístěním stavby a náklady na ochranná opatření vůči ne-restaurovaným částem objektů, stromům apod. Dále neobsahují náklady na BOZP a náklady na prostoje strojů a náklady na přesuny hmot pomocí strojních zařízení.

Stanovení R věty vychází z dobré znalosti popisované činnosti, součtu potřeb všech materiálů, energií a času strávených nad konkrétní oceňovanou činností. Je třeba zdůraznit, že tato znalost nesmí vycházet pouze z restaurátorových zkušeností, ale z věcného průzkumu časově-berných dat z mnohonásobného pozorování, a to jak samotné práce restaurátora, tak spotřeby všech materiálů, energií a pracovních pomůcek. Vzhledem k věcné odlišnosti jednotlivých materiálů i přístupů k nim je těžké tuto formu ocenění restaurátorských činností stanovit v plném rozsahu tak, aby byla využita opakovaně na jiné objekty, zvláště pokud mluvíme o uměleckých dílech typu sousoší, a na složité obzvláště cenné malby. Systém kalkulace pomocí R vět je možné využít zejména u objektů velkého rozsahu, kde se problematika restaurování opakuje a tudíž je možné na základě shromáždění výše uvedených dat sestavit podrobný rozpočet prací na jednotlivé typy povrchů.

### *Doporučení, omezení a rizika*

Doporučení pro vyhlášení výběrových řízení na dodávku restaurátorských prací.

V případě výběrových řízení je často jediným kritériem pro výběr dodavatele nabídková cena. Tím se ovšem investor vystavuje značnému nebezpečí nižší kvality prováděných prací, zejména pokud nebyla provedena řádná projektová příprava zahrnující detailní restaurátorské průzkumy a podrobné stanovení jednotlivých postupů a technologií při restaurování. Zpravidla je výhodnější pro vlastníka optimalizovat kvalitu s cenou. Potenciální kvalita se zpravidla projeví v úrovni záměru a v odborné kvalifikaci předkladatele (reference, realizace).

Výběrová řízení by měla být připravována s tím, že v rámci řízení bude maximálně specifikována realizační restaurátorská dokumentace. Tuto specifikaci by měl provádět zkušený restaurátor ve spolupráci s projektantem, případně technologem. Pro kvalitní provedení vlastního restaurování se v praxi, zejména v případě větších zakázek, osvědčilo, že restaurátor, který se podílel na přípravě realizace, restaurátorských průzkumech a formulaci restaurátorského záměru provádí pro investora i dozor. Tento dozor výrazně zvýší možnosti kontroly navrhovaných postupů a technologií a má vliv na kvalitu prováděných prací.

Výběrová řízení u větších zakázek je vhodné rozdělit na výběrové řízení na průzkum a ocenění restaurátorských prací a na výběrové řízení vlastní restaurátorské práce.

<sup>1</sup> Schneiderová Heralová, R., Kadlčáková, A., Kremlová, L., KALKULACE A NABÍDKY 1, nakladatelství ČVUT, 2009, 243, ISBN 978-80-01-03532-0, s. 102.

V případě veřejných výběrových řízení se v mnoha případech objevuje v rámci zadávací dokumentace předpokládaná cena zakázky. Z praxe je bohužel zřejmé, že zejména v případě větších nabídek uchazeči rezignují na seriózní tvorbu ceny a pouze vynásobí cenu známou z předchozích podobných zakázek menšího rozsahu koeficientem, jehož volba je svévolná. Namísto ocenění jednotlivých položek na základě odhadu náročnosti a rozsahu prací je pak tvorba cen výsledkem volného kalkulu. Z těchto důvodů doporučujeme předpokládaný limit zakázky nezveřejňovat a naopak si kvalifikovaný odhad ceny (pakliže je zpracovaný) ponechat jako kontrolní referenci pro určení reálnosti nabídek.

Je vhodné zajistit přítomnost restaurátora jako kvalifikované osoby při formulaci a případně zadávacích podmínek, zadávací dokumentaci i při vyhodnocení podaných nabídek ve výběrovém řízení.

V případě, že je to účelné, zejména u komplexních zadání většího rozsahu, je vhodné pro vlastníka sestavit odbornou hodnotící výběrovou komisi s odborníky dle daného zaměření.

V případě, že musí být hlavním kritériem výběru cena, je při samotném vyhodnocení nabídek vhodné ověřit cenové nabídky účastníků, a to zvláště proto, aby nedošlo k výběru zhotovitele, který zřejmě nebude schopen práci za danou cenu provést v potřebné kvalitě. Postup ověření cenových nabídek:

- Nejnižší a nejvyšší nabídkovou cenu vyřadit z následného výpočtu.
- Zbylé nabídkové ceny aritmeticky zprůměrovat.
- Pokud je nejnižší nabídková cena nižší než obvyklá průměrná cena, je vhodné tuto nabídku vyřadit.

### ***Základní kritéria pro vyhodnocení nabídek<sup>1</sup>***

Obecně lze doporučit následující požadavky pro vyhodnocení nabídek ve veřejných soutěžích:<sup>2</sup>

- Soulad s konkrétním výkazem výměr
- Soulad s požadavky týkajícími se specifikací, rozsahu prací a (výkresové) dokumentace
- Reference – prokázané realizace (referenční listy)
- Soulad se zvláštními a Všeobecnými podmínkami stanovenými zadávací dokumentací
- Obecné a specifické zkušenosti účastníka (firmy)
- Navržený podrobný pracovní plán (harmonogram prací)
- Prokázaná technická způsobilost k provedení požadovaných úkonů
- Prokázaná schopnost ctít důležité povinnosti a závazky přidělené zhotoviteli ve výběrovém řízení (např. kvalita, pojistné krytí atd.)

### **Poděkování**

Kapitola byla vytvořena s podporou projektu NAKI DF12P01OVV018 „Podmínky a požadavky kompatibilní péče o historické anorganické porézní materiály“.

<sup>1</sup> Volně převzato z UNESCO evaluation criteria.

<sup>2</sup> Stále však zůstávají v platnosti požadavky stanovené platnými právními nařízeními, vyhláškami a zákony.

## Použitá literatura

- Český statistický úřad. *Doporučená úprava výše hodinových sazeb* [online]. Praha: ČSÚ, 2014 [cit. 5. 3. 2015].  
Dostupné z: [http://www.stavebnistandardy.cz/doc/vypocet/vyse\\_hodinovych\\_sazeb\\_2014.pdf](http://www.stavebnistandardy.cz/doc/vypocet/vyse_hodinovych_sazeb_2014.pdf)
- Drdáček, M., Z. Slížková a P. Langhammer. *CULT-STRAT Deliverable no 10: estimation of cost for conservation/renovation works for materials and elements considering regional diversities* [online]. Stockholm: CULT-STRAT, 2009 [cit. 9. 5. 2015].  
Dostupné z: <http://www.corr-institute.se/cultstrat/web/page.aspx?refid=12>
- Haag, I. *Was bei der Rechnungstellung zu beachten ist*, 12 116,
- Hamm, D. *Welche Versicherung ist die richtige?* 96 160.
- König-Weska, R. *Existenzgründung Freiberufliche Selbständigkeit für Restauratoren*. Master thesis. Hildesheim: HAWK Fakultät Erhaltung von Kulturgut, 2011.
- König-Weska, R. *Verträge und Vertragsmodalitäten. Das gilt es zu beachten*, 12 102.
- Kremlová, L., L. Krejčí, D. Čápová a J. Nováková. *Ekonomika a management: podklady a příklady ke cvičením*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03337-1.
- Meier, E. F. *Der Kostenvoranschlag. Ein Schwerpunkt in der Auftragsabwicklung*, 12 113.
- Příručka rozpočtáře – Rozpočtování a oceňování stavebních prací*. Praha: ÚRS Praha, 2015. ISBN 978-80-7369-623-8.
- Recker, M. *Was muss Erhaltung von Kulturgut kosten? Preiskalkulation aus Sicht eines Restaurators*, 12 106.
- Schneiderová Heralová, R., A. Kadlčáková, L. Kremlová. *Kalkulace a nabídky I*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-03532-0.

# Udržitelnost sbírek v muzeích a galeriích

## Sledování kvality prostředí v muzeích a galeriích

Jaroslav Valach, Karel Juliš, Benjamin Wolf

### Základní idea preventivní péče a modulární systém senzorů

Základní ideou projektu je zvýšení ochrany předmětů kulturního dědictví před působením negativních vlivů, což je zároveň základním cílem preventivní péče o kulturní dědictví. Naplnění tohoto cíle přineslo vývoj variabilního skladebného modulárního systému pro monitorování a matematické zpracování veličin popisujících rizika ohrožení vystavovaných sbírkových předmětů, což je podmínkou pro komplexnější přístup k preventivní péči o předměty kulturního dědictví. Omezené rozpočty kulturních institucí si vynucují hledání úsporných řešení, která by zachovala hlavní poslání, jež lze v případě muzeí spatřovat v péči o sbírky a jejich zpřístupnění veřejnosti. Je proti duchu doby, aby pracovníci muzeí plýtvali svým časem na úkony, jakými jsou například obcházení lepových pastí, záznamníků prostředí, dozimetru apod., místo toho, aby se věnovali své odborné činnosti – péči o sbírky. Je proto žádoucí tyto úkony automatizovat a záznamy používat nejen k úpravě klimatu sbírek, ale také pro další výzkum. Ukazuje se totiž, že monitorování vnitřního prostředí sbírek se sice stalo běžnou praxí v muzeích, ale dlouhodobé sledování a vyhodnocování zaznamenaných dat má dosud nevyčerpané možnosti. Ačkoli jsou data cennou surovinou budoucího poznání, zdaleka nebývá ukládání zaznamenaných hodnot samozřejmostí. Jedním z příkladů je i to, že díky analýze jemné degradace exponátů, ke které dochází i přes veškerou péči o sbírkové předměty, lze upravit bezpečné meze prostředí.

### Konflikty v ochraně sbírek

Ideálních podmínek pro ochranu sbírek nelze vždy dosáhnout. Bývají totiž v konfliktu s jinými zájmy a hodnotami, které ve své činnosti muzeum jakožto kulturní instituce sleduje. Pro ilustraci takových rozporných požadavků lze uvést několik příkladů (**obr. 237**).

Muzea jsou často situována v chráněných budovách: zde dochází ke konfliktu mezi ochranou budovy a ochranou exponátů (budova např. neumožňuje ideální zateplení, instalaci klimatizačního zařízení) – musí nastat určitá forma kompromisu. Jiným příkladem může být vystavování předmětů citlivých na světlo, jako jsou různé barvené textilie, fotografické desky a podobně. Uchováním ve tmě by se životnost předmětů prodloužila, ale posláním muzea je své



OBRÁZEK 237: Příklady konfliktů v ochraně sbírek

sbírkové předměty také vystavovat a poskytnout návštěvníkovi dostatek světla, aby předmět mohl pozorovat. Následuje otázka škůdců ve sbírkách. Pro jejich eliminaci (např. plynováním) dochází k vystavení návštěvníků muzeí potenciálně škodlivým látkám. Preventivní plynování se provádí plošně a nevýběrově, ačkoli by bylo možné je omezit pouze na sbírky s pozitivní detekcí škůdců. Lze se tedy ptát, jaké je řešení takových konfliktů? Odpovědí je kvantitativní poznání rozhodných veličin, které pomůže najít úzkou cestičku mezi těmito rozpory, cestičku, jež nám umožní stanovit v daném místě optimální režim. V jistém smyslu lze parafrázovat výrok lorda Kelvina: „Pokud člověk opravdu něčemu rozumí, je schopen to vyjádřit číslem.“ Nasazení čidel vede k tomu, že lze prostředí exponátu kvantifikovat a pomocí jejich instalací tudíž odpovědět na některé otázky pro život (a životnost) sbírek rozhodující.

Rozsah nasazení čidel rozhoduje o úspěchu zvoleného přístupu, a proto je pro dosažení potřebného počtu čidel nutné instalovat je v interiérech muzeí s minimálními náklady a minimálními zásahy. Tyto požadavky lze naplnit několika způsoby: adaptovat existující čidla (např. v Centrálním depozitáři Horní Počernice – jsou instalována pro udržování stálého klimatu, ale data poté, co bylo prostředí zregulováno, nebývají dále nevyužita); připojit vlastní rozhraní ke stávajícím záznamníkům dat (vyžadujícím manuální stahování dat nebo ve kterých jsou data prezentována v uzavřeném /proprietárním/ formátu, tudíž s nimi nelze dále nakládat); především pak vývojem vlastních čidel.

## Centrální pult ochrany sbírek

Po oživení je celý systém k dispozici uživatelům v podobě webové aplikace, která jednotným způsobem ovládá velmi různorodé části. O webovém rozhraní můžeme hovořit jako o centrálním pultu ochrany sbírek, který celý systém modulárních snímačů zastřešuje. Jedno rozhraní a jedno místo zajišťuje přístup ve všech úrovních – od samostatných poboček přes jejich místnosti a všechny v nich umístěné vitríny až k jednotlivým snímačům. Tyto snímače jsou obvykle



konstruovány jako víceparametrové a vzdálený přístup určuje i volbu sledovaného parametru. Administrátor systému smí upravovat a přidávat budovy i další měřicí místa. Každá budova má v databázi základní údaje – adresu, GPS pozice, internetovou adresu, jednotlivé místnosti v budově, půdorys, popis místnosti a materiály v místnostech uložené. Následují jednotlivé měřicí body, kterých může být v každé místnosti několik. K měřicím bodům přiřazujeme jednotlivé senzory. Můžeme např. vyměnit senzor za jiný, přiřadit ho ke stejnému bodu a měření pak na sebe bude navazovat. Záznamy dat pořízené čidly jsou následně ukládány na centrální server, kde jsou k dispozici nejen pro aktuální vyhodnocení stavu ve sbírkách, ale také k tomu, aby se mohlo pracovat s celou retrospektivou měření. Zpětná analýza záznamů může přispět k ochraně exponátů. Reálné prostředí v muzeu zaostává za ideálním, a proto i přes veškerou snahu dochází k mírné degradaci zvláště citlivých exponátů. Jsou-li ze záznamů známy hodnoty prostředí v minulosti, lze u řízeného klimatu přestavět meze, které budou pro jejich další existenci ve sbírce bezpečné. Naopak je úzkostlivé lpění na některých parametrech pro méně citlivé exponáty mnohdy zbytečné a zvyšuje energetické nároky udržování klimatu v budově.

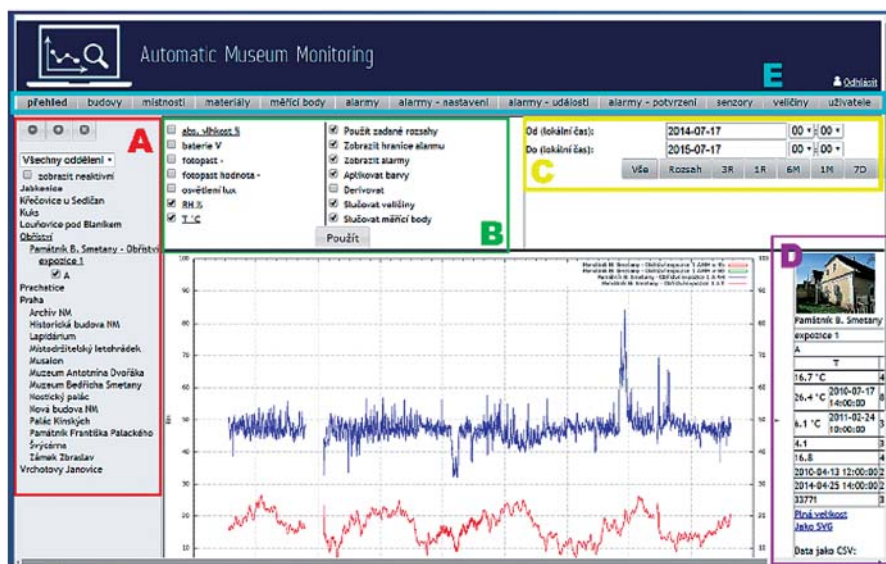
Uživatelské rozhraní zabezpečuje díky řešení přes webové stránky na platformě nezávislé ovládání a přístup k systému, jak ukazuje **obrázek 238**. Uživatel má tak na jednom místě shromážděna veškerá zaznamenaná data. Může je podle potřeby zobrazovat a určovat chování systému nastavením bezpečných mezí a také reakci systému následující po vybočení z těchto mezí. Do systému je možné zapojit všechna čidla – jak komerční, tak také nově vyvinutá. Výhody tohoto systému lze spatřovat v tom, že jsou všechna data na jednom místě, přístup do databáze je možný odkudkoliv přes internet. Další předností je variabilita čidel – lze připojit jakékoliv, nahrát libovolné funkce a statistiky, systém má otevřený software, je přístupný pro každého přes jednotný přístupový protokol, je výhodný pro malé (používající jen dataloggery nebo některé naše senzory) i velké instituce, které mají několik systémů a potřebují spojit výstupy do jedné databáze.

## Zobrazení dat

Do webového rozhraní je možné načíst i několik senzorů najednou. Zobrazí se pod sebou nebo v jednom grafu. Lze si vybírat i měřené veličiny, např. jen vlhkost a absolutní vlhkost, vlhkost a teplotu, libovolné kombinace včetně určení období, pro které budou data vykreslena. Spolu s vykreslením grafu se načítají běžné statistiky pro vybraná období a jsou k dispozici i pokročilejší funkce, např. integrální hodnota pro měření osvětlení. Pro další zpracování vybrané podmnožiny záznamů lze data exportovat. Výstup je v textovém formátu a proto umožňuje data dále zpracovat v programech jako např. MS Excel.

## Výstrahy

Pro každý měřicí bod je možné nastavit podmínky pro zasílání výstrah v případě překročení zadaných prahových hodnot. Např. při poklesu relativní vlhkosti v depozitáři pod 35 % po dobu delší než 300 minut odešle systém výstražný e-mail na zadanou adresu. Výstrahu lze nastavit i u online senzorů v případě výpadku. Po nastaveném časovém úseku zašle výstražný systém zprávu, že došlo k výpadku měření a je tedy nezbytné zasáhnout. Výstražné e-maily obsahují informace o měřicím bodu, překročené hodnotě a je zde také odkaz na stránku, na které lze potvrdit přijetí výstrahy. Pracovník muzea může potvrdit přijetí výstrahy a zapsat svůj komentář. Záznam potvrzených i nepotvrzených výstrah je uložen v databázi.



OBRAZEK 238: Hlavní prvky uživatelského rozhraní

## Technologické komponenty systému

Základní myšlenky tohoto systému jsou následující:

Jedná se o otevřený systém, který charakterizují modularita a záměnnost použitých senzorů; škálovatelnost od malého regionálního nebo soukromého muzea až po nasazení v Národním muzeu; možnost spojení senzorů do vyšších celků a jejich záměnnost, pokud se někdo rozhodne použít senzor vyšší kvality. Odlišnost požadavků je uspokojena variabilitou formy (konfigurací) nasazení, variabilita komunikačních kanálů zaručuje, že bude možné data přenést do serveru a k pracovníkům muzea. Tato otázka není triviální – jsou muzea, kde např. není internet a nemusí v nich být ani pevná telefonní linka, a přesto i zde musíme být schopni dopravit data do cílového určení (centrálního sběrného místa). Tento systém by měl mít tedy co nejvariabilnější komunikační kanály + některé komunikační kanály energeticky náročné (tzn. mnoho energie na provoz např. u mobilního telefonu), z tohoto důvodu jsme se snažili dosáhnout největší variability komunikačních nástrojů. Zpracování dat se přirozeně liší podle sledované veličiny, je zde variabilita vyhodnocovacích nástrojů. Na úrovni serveru též probíhá zálohování dat. Dlouhá časová retrospektiva dat zase umožní dodatečně dohledání doby, kdy se ve sbírce či depozitáři stala nehoda.

Otevřené datové struktury umožňují, aby byla data volně přístupná k dalšímu libovolnému zpracování třetí straně, usnadňují vytváření i zpracování výsledků, nabízejí veřejně popsaný protokol, dovolující vazbu zařízení třetích stran, dále umožňují snadné vyhledávání chyb v komunikaci a jednoznačně definované předávání dat k dalšímu zpracování.

## Fyzické uspořádání systému

Systém je hierarchicky uspořádán. Jeho vrcholem je server, který komunikuje s jednotlivými čidly a který je ovládán pracovníky muzeí. Lze na něm provádět dotazování a získávat nové informace o současném stavu vybrané sbírky, o statistice překročení mezí apod. Cílem ukládání záznamů je uchovat data v otevřeném formátu, který je přizpůsobený pro sémantické vyhledávání v datech, aby byla data dostatečně anotována, a pokud někdo bude chtít s daty pracovat v budoucnu, aby v nich našel dostatek informací, které vysvětlí jejich smysl. Záznamy proto obsahují metadata a byl použit .xml formát. Otevřený formát dále pomůže při „dolování dat“ – dataminingu. Dalším důležitým bodem je komunikace mezi komponentou včasného varování systému a pracovníky muzea, kteří se tak dozví o aktuální situaci ve sbírkách, aniž by je museli permanentně obcházet.

## Koncept snímačů

Obecně lze na vytvořené snímače hledět jako na propojení některé z měřených proměnných s dostupnou formou přenosu danou seznamem komunikačních cest. Prostředníkem je řídicí jednotka, která tyto konce propojuje a realizuje celé měření.

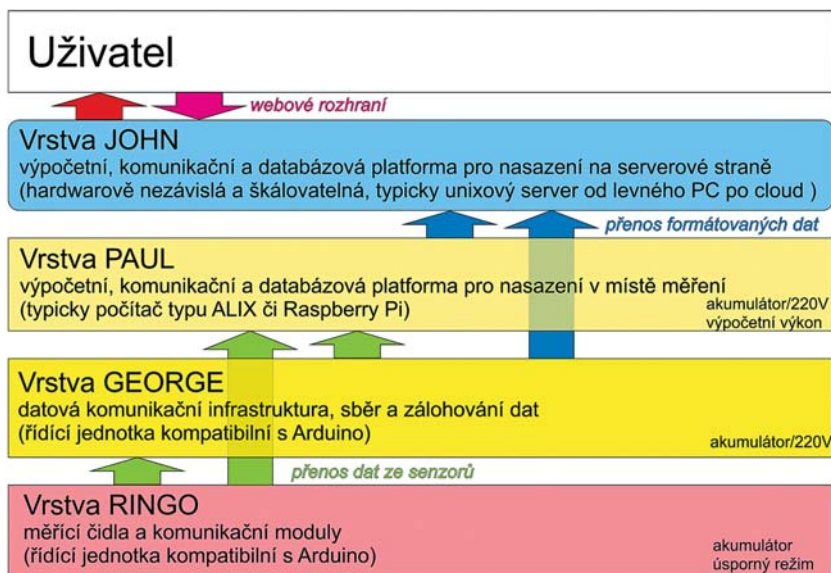
## Návrh a komponenty čidel

Návrh sleduje zásady nízkých nákladů a otevřených standardů. Pro návrh byly voleny běžně dostupné a levné elektronické a IT součásti, které usnadňují připojení na další rozhraní – systém je koncipován tak, že umožňuje vazbu do prostředí, ve kterém je umístěn (např. depozi-tář Horní Počernice), mechanické a konstrukční části jsou snadno a levně vyrobitelné na zakázku. Jde-li o jednotlivé kusy, díly lze vyrobit 3D tiskárnou, v případě velké série lze zadat sériovou výrobu komponentů u výrobce. Ovládání zařízení a zpracování dat maximálně využívá modelu „svobodného softwaru“, to znamená, že se využívá, co připravili ostatní, a vytvořený kód je k dispozici i dalším uživatelům. Pořizovací náklady na software jsou pak nulové. Výstupem projektu jsou podklady pro výrobu levných zařízení, které jsou stejně jako naše podpora řešitelů poskytovaná zájemcům volně k dispozici.

## Vrstvový model

Po zohlednění značně různorodých požadavků na měřené parametry, na dostupné zdroje energie pro měřící zařízení v uvažovaných lokalitách a možnosti přenosu dat v těchto místech se vrstvý model systému ukázal jako nejvhodnější.

Nejnižší vrstva čidel nazývaná RINGO provádí měření a posílá je vyšší vrstvě (**obr. 239**). Nejnižší úroveň měření a čidel je vyvinuta s cílem maximální úspory energie při provozu, aby mohla být umístěna v nepřístupných místech, například v zapečetěných vitrínách či depozi-tářích bez dostatečných rozvodů elektrické energie.



OBRÁZEK 239: Schematické vyjádření závislosti mezi jednotlivými vrstvami systému

Data posílaná jednotlivými čidly jsou přebírána zařízeními ve vrstvě GEORGE, která je uspořádává a připravuje k dalšímu předání po komunikačně náročnějších cestách, jakými jsou například přenosy přes Ethernet nebo GSM mobilní síť. Vrstva George tedy funguje jako komunikační koncentrátor, tzn. že v ní dochází ke snímání dat z jednotlivých RINGŮ a vytváří se z nich kompaktní tvar v otevřené formě.

Zařízení ve vrstvě PAUL slouží na rozdíl od vrstvy GEORGE k základnímu zpracování dat. Zařízení tohoto typu je nutné pro zpracování signálů z biosenzorů: v okamžiku, kdy je v obrazu zaznamenána změna, může být spuštěna určitá akce, aniž by byl nutný zásah nejvyšší vrstvy typu JOHN (centrální server).

- Vrstva RINGO – čidla s velmi nízkým příkonem a jejich podpůrné prostředky.
- Vrstva GEORGE – datová komunikační infrastruktura pro bezdrátovou i drátovou komunikaci.
- Vrstva PAUL – výpočetní, komunikační a databázová platforma pro nasazení v místě měření.
- Vrstva JOHN – výpočetní, komunikační a databázová platforma pro nasazení na serverové straně.

Logická struktura vrstev tohoto systému má jednoznačně definované dělicí hrany. Do všech dělicích rozhraní je možné připojení dalších zařízení, podobně je možné napojení dalšími aplikacemi na datové toky v systému. Podle zadání se vrstvy často slévají v jedno zařízení, použité komunikační protokoly poskytují velmi širokou škálovatelnost a variabilitu konfigurace.

## Materiálové a sériové výrobní náklady na jednotlivé komponenty

Náklady kalkulované z ceny součástek a odhadované ceny při výrobě jednotlivých čidel a komponent lze zjednodušeně shrnout do následující tabulky.

**TABULKA 21:** Odhadované ceny při výrobě jednotlivých čidel a komponent

Zařízení typu RINGO	2 000–3 000 Kč
Biosenzor	2 000 Kč
Zařízení typu GEORGE (různé úrovně funkcionality)	3 000–8 000 Kč
Zařízení typu PAUL (běžné PC)	cca 10 000 Kč
Serverová platforma JOHN	> 10 000 Kč

### Fyzická realizace vrstvy RINGO

Zařízení typu RINGO se skládá z jádra, předního rozhraní (front end, FE) a zadního rozhraní (back end, BE). Přední konec (ve Windows je užívaný výraz driver) je softwarová komponenta, která slouží pro komunikaci s konkrétním čidlem a vůči jádru má jednotné rozhraní. Přední konec předává signál od čidel již v předzpracované formě jádru, které zajišťuje odeslání dat přes odpovídající BE. Toto odesílání musí být co nejjednodušší, a proto byl zvolen rádiový přenos, který může mít podobu jednoduchého přenosu typu dálkového ovládání na auto až po možnost připojení velké radiostanice a přenosu mezi kontinenty. Spolu s rádiovým přenosem lze využívat jako komunikační rozhraní Bluetooth (BT) nebo ZigBee, což je rádiová komunikace na krátkou vzdálenost přímo podporovaná komponentami do běžných počítačů. Data z RINGO zařízení vysílaná přes BT mohou být bezprostředně zpracována PC s BT adaptérem. Je tedy možné v jednom místě měřit a nedaleko, třeba ve vedlejší místnosti, data zpracovávat na PC.

### Fyzická realizace vrstvy GEORGE

Vrstva GEORGE přijímá data od zařízení typu RINGO, ale i k nim lze připojit místní čidla, přičemž výkonnější jádro dovoluje místní zpracování, místní uložení a zálohování dat. BE jsou orientovány na intenzivnější přenos dat. Parametry zařízení typu George: kompatibilní s celou řadou RINGO, výstup RS 232 nebo USB, na výstupu je otevřený protokol, v síti jich lze použít libovolný počet, umožňuje paralelní využití měření libovolným počtem dalších subjektů.

### Perspektivy vývoje

Perspektiva vývoje vede ke konceptu IoT (Internet of Things neboli „internet věcí“), který má zásadní vliv na komunikaci – i nejnižší vrstva bude realizovaná na úrovni klasické paketové komunikace IP. Čidla nejnižší úrovně se změní na senzor a budič, komunikace k výkonným členům může například zajistit zapnutí světel, sirén apod. Změna přinese výhody i nevýhody: komunikace je jednodušší, obsahy jsou stále otevřené, dojde ke zvýšení přenosové rychlosti, komunikace bude oboustranná a přenos je garantovaný – součástí přenosu je potvrzení o doručení, mezi nevýhodami lze zejména počítat výrazně vyšší energetickou náročnost na úrovni základních čidel, vyšší nároky na součástky. Pokud nelze dostatek energie uskladnit v akumulátorech, nelze ji čerpat z prostředí? Jako východisko ze situace s vysokou spotřebou

zařízení na platformě IOT stojí za úvahu tzv. energy harvesting – „sklizení energie“ z procesů v okolí. Tato zbytková energie by stejně přišla vniveč. Příklady čerpání energie z okolí jsou známy dlouhou dobu, např. ruské náramkové hodinky z 50. let využívající energy harvesting (samonatahovací hodinky s kyvadélkem, které se při pohybu člověka samy natahovaly). Lze se tedy ptát, jaké jsou v muzeu k dispozici přirozené zdroje energie? Mezi ně lze zahrnout mechanické pohyby, rozdíly teplot, osvětlení, pohyb vzduchu. Bohužel ani jeden z uvedených zdrojů není schopen dodat potřebných 63  $\mu\text{W}$  trvalého energetického přísunu. Nejslibnější je světlo, ale i v tomto případě kvůli nízkým hladinám osvětlení (z důvodu šetrnosti k exponátům), které navíc svítí jen v určitou dobu, a kvůli nízké účinnosti fotovoltaiky (PV), vychází PV panely nesmyslně veliké (pro 100 lx a osvětlení 8/24 vychází panel cca 30 × 30 cm). Naneštěstí už nezůstává rezerva v dalším redukování výkonu procesoru. Pro ilustraci lze uvést, že ohřátí jedné náplně varné konvice využívá výkon 2 kW po dobu 3 minut, tedy 100 Wh. Na tento objem energie by zařízení typu RINGO dokázalo pracovat nepřetržitě cca 250 let. Naproti tomu pro trvalý chod zařízení vrstvy PAUL se dvěma biosenzory potřebujeme cca 5 W trvalého příkonu. Energii akumulátoru z traktoru (150 Ah) spotřebuje PAUL za 15 dnů.

## Praktické příklady použití různých modulů

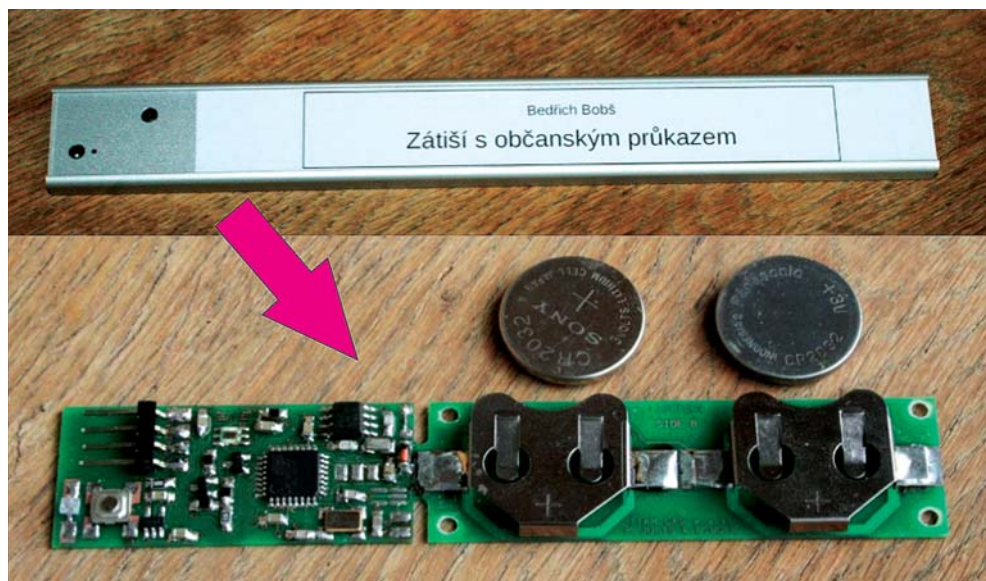
Prototypů existuje pouze několik, modulů není neomezené množství, proto se používají vždy, když je třeba pečovat o zvláště cenné předměty kulturního dědictví – jedno z prvních nasazení snímačů bylo provedeno na výstavě „Peníze“. Autonomním senzorem s rádiovým přenosem byly zaznamenávány časové průběhy měřených hodnot teploty, relativní vlhkosti a úrovně osvětlení ve vitrině s prvním vydáním knihy A. Smithe „An inquiry into the nature and causes of the wealth of nations“ Londýn, 1776, zápůjčka z Österreichische Nationalbibliothek ve Vídni.

## RINGO LIGHT 009

Jedná se o specializovanou verzi bloku RINGO pro jednoúčelovou aplikaci snímání světelné expozice světlo citlivých exponátů. Optická expozice se měří ve dvou spektrálních oblastech – širokopásmové měření a měření v oblasti infračerveného světla. Lze sledovat expozici v infračerveném nebo obráceně, případně ze širokopásmové křivky odečítat a matematicky si vypočítat expozici ve viditelné oblasti. Na dvě „knoflíkové“ baterie provádí „popiska k obrazu“ integrální záznam celkového nasvícení po dobu minimálně šesti měsíců a zjištěná data vydává čtecímu zařízení přes IČ rozhraní. Detailně je zařízení vyobrazeno na **obrázku 240**.

## Příklady využití získaných dat

Vtáhnout návštěvníky do procesu konzervace a otázek uchování sbírky vnáší nový rozměr do zážitku návštěvy muzea. Implikací je nenechávat si data pro sebe, ale ukázat, že boj o zachování exponátu není samozřejmý, a podělit se o něj s návštěvníky. Snímače umístěné ve vitrinách s exponáty posílají data o vnitřním prostředí sběrné jednotce, která je může okamžitě zobrazovat, návštěvník získá možnost nahlédnout do péče o sbírky (**obr. 241**). Bezdrátová komunikace zajišťuje vysoce nerušící a estetické řešení ochrany, podmínkou je dlouhá výdrž baterií.



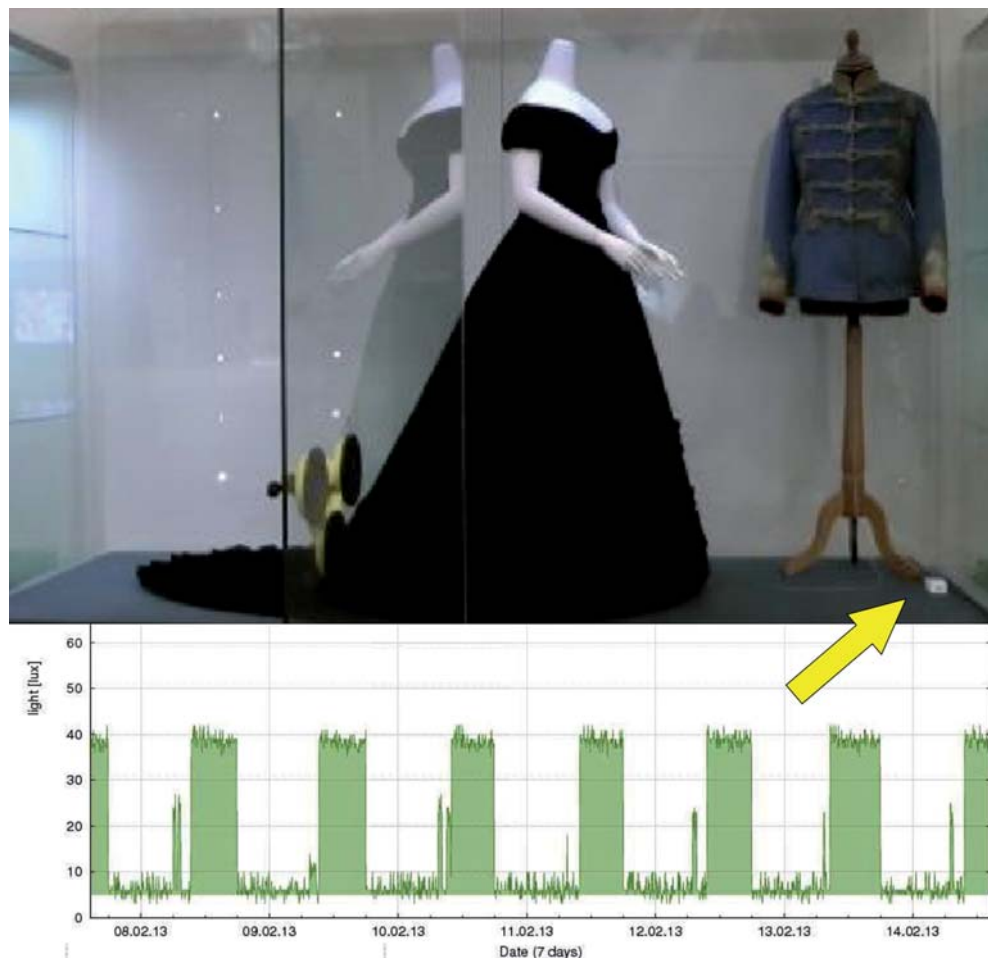
**OBRAZEK 240:** Světelný integrátor zaznamenávající celkovou radiační expozici objektu

## Biosenzory

Moduly pro kontinuální on-line monitoring přítomnosti lezoucího a polétavého hmyzu jsou založeny na vyhodnocování časové řady snímků z webkamery tvořící jádro modulu. Prototypy modulů vyrobené na 3D tiskárně byly umístěné na výstavě „Archa“ v NM (senzor je vyobrazen na **obrázku 242** i s časovým záznamem signálu, který představuje změna barevnosti leповé plochy = nalepení dalších škůdců). Kombinuje se vhodné umístění do předpokládaných drah pohybu hmyzu a použití chemických atraktantů v leповé vrstvě se záznamem obrazu vyhodnocovaném porovnáním časově následných snímků. Pokud rozdíl mezi snímky přesáhne stanovenou mez – odpovídající například velikosti mola – pošle systém výstražnou zprávu odpovědnému pracovníkovi. Tímto způsobem jsou pracovníci muzea ušetřeni obchůzek mezi leповými nástrahami a také sledování nástrah samotných. Další výhodou je omezení objemu přenášené informace – místo obrazových dat se posílá pouze krátká zpráva o pozitivní detekci, což je výhodné i pro odlehlá místa a depozitáře s nízkou či žádnou rychlostí připojení. Veškeré fotografie jsou uloženy v databázi. Ta je přizpůsobena pro ukládání dat z nejrůznějších typů senzorů. Umožňuje zobrazení aktuální fotografie z fotosenzorů i celou historii předchozích snímků.

## Záznamník transportu

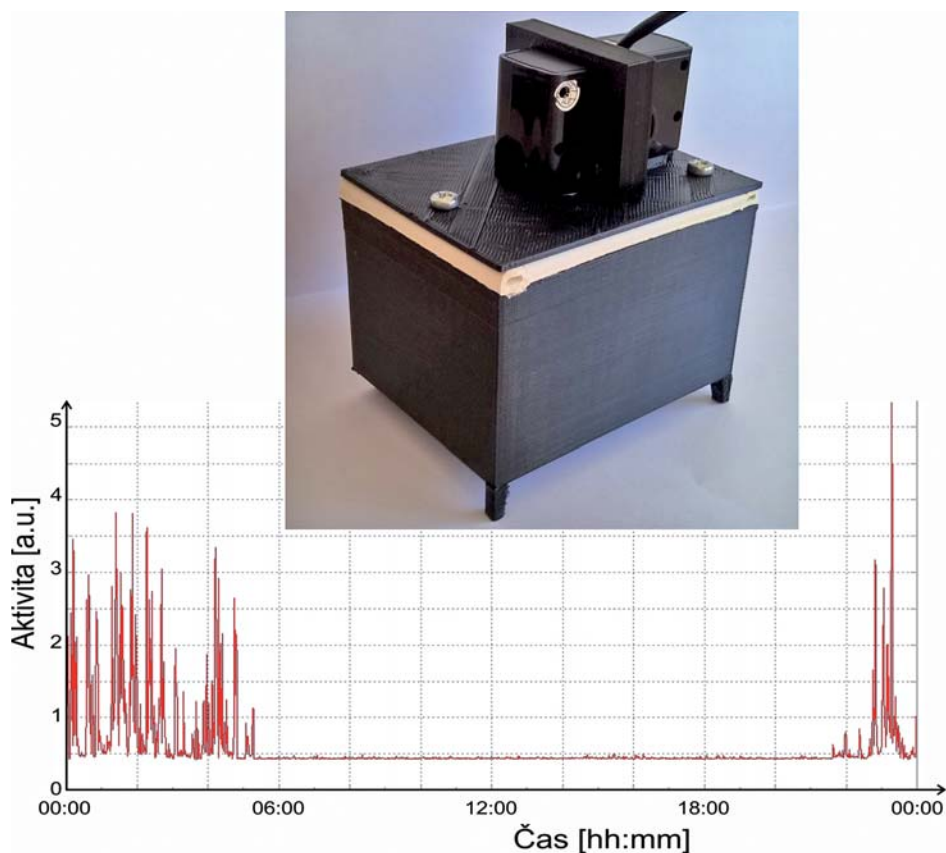
Zatímco sbírkové předměty jsou v expozicích zabezpečeny a dobře chráněny, transport vždy představuje vysokou míru rizika (Stolow 1981, Thickett 2002). Každá instituce má proto vlastní propracovaná pravidla, jak možnost poškození během přepravy vyloučit nebo alespoň minimalizovat. Jedním ze způsobů, kterými lze zlepšovat ochranu exponátů, je důkladné monitorování všech fází přepravy – od ukládání přes transport až po vyjímání z přepravních



**OBRAZEK 241:** Zapojení návštěvníků do ochrany exponátů (*Monarchie, Sisi, Franz Joseph, Kunsthistorische museum „Monarchy“ – exposition in National Museum*)

boxů. Pro zabezpečení dohledu a prohloubení poznání o dějích, které přepravu provázejí, bylo vyvinuto zařízení, které tyto informace zaznamená. Zařízení musí sledovat exponát během přepravy, podrobně zaznamenávat otřesy exponátů, zaznamenávat klimatické parametry a jejich změny, vyhodnotit ochrannou funkci přepravního boxu z hlediska ochrany proti otřesům a z hlediska podmínek v mikroprostředí (pronikání vlhkosti atd.), umožnit sledování parametrů uvnitř boxu ještě před jeho otevřením. Z těchto důvodů je na těle přístroje vnitřní akcelerometr a snímač parametrů prostředí, další snímače jsou také na kabelu na externích destičkách, které mohou být umístěny přímo na exponátu. Z toho vyplývá, že vždy můžeme porovnat parametry boxu i exponátu. Je možné externí senzor nahradit jiným typem akcelerometru z této řady. Lze tudíž převážet zařízení s citlivějším či méně citlivým snímačem akcelerace. Zrychlení pozorujeme ve třech osách, máme tedy kompletní prostorové výsledky pohybů/nárazů, které zažívá exponát. Přehled měřených veličin záznamníku transportu: teplota, relativní vlhkost, tlak vzduchu (z něj lze vypočítat nadmořskou výšku), intenzita



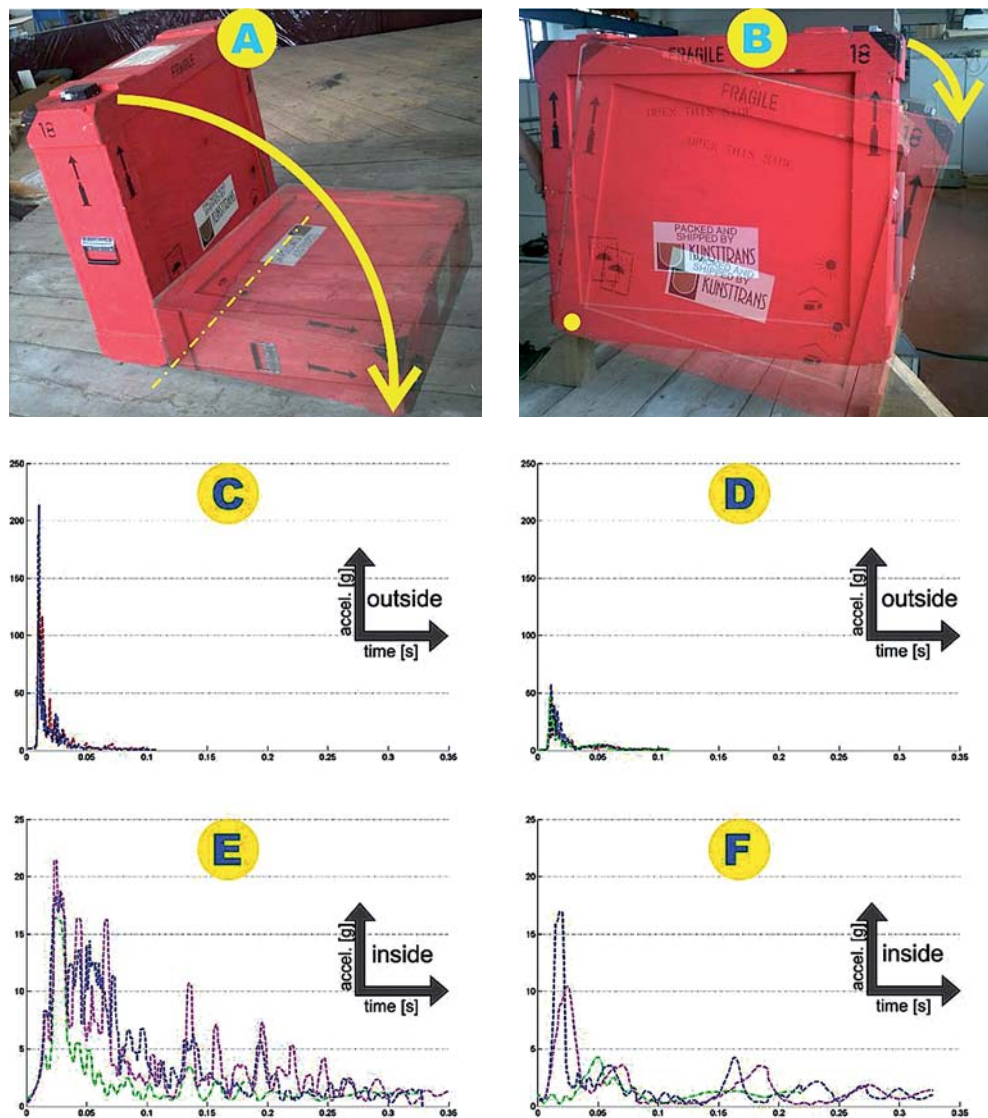


**OBRAZEK 242:** Ukázka senzoru plazivého hmyzu a záznamu aktivity hmyzu v zorném poli kamery

dopadajícího světla, zrychlení, orientace (naklopení), otřesy. Veličiny jsou ukládány v uživatelsky nastavených intervalech (od 10 s až po 1 h). Z naměřených záznamů lze detailně rekonstruovat nejen časové průběhy teploty, relativní vlhkosti a tlaku během transportu, ale také počty a úroveň maximálních sil a zrychlení, změn orientace objektu (Valach et al. 2014). Náklady na tento typ snímače jsou přibližně od 10 000 do 15 000 Kč.

### Transportní čidlo – příklad použití

Následující **obrázek 243** ilustruje použití transportního čidla. Může zobrazit orientaci a náklon boxu při přepravě rukopisu Symfonie č. 9 A. Dvořáka do New Yorku. Otřesy překračující stanovenou hodnotu zrychlení se zaznamenávají co do počtu a intenzity maximálního zrychlení. Výrazné otřesy jsou uloženy s celým průběhem. Rozdíl mezi histogramy je vysvědčením o kvalitě fungování výstelky. Velké hodnoty akcelerací jsou zaznamenány pro kufřík a netýkají se rukopisu samotného. Čidlo umožňuje rovněž měření tlaku např. během letových fází. Tlak se mění, a to může mít nepříznivý vliv na radikální snížení vlhkosti exponátu, pokud není nijak ochráněn. Další výhodou je i možnost „nahlédnout“ do uzavřeného transportního boxu využitím bezdrátové komunikace mezi čidlem a počítačem obsluhy. Tato



**OBRAZĚK 243:** Použití transportního čidla pro vylepšení konstrukce přepravního boxu. Jsou porovnávána zrychlení obalu (prostřední obrázky) a exponátu (spodní obr.) při simulovaném hrubém zacházení – převržení a upuštění (horní obr.)

funkce je zvláště užitečná v období teplotních výkyvů (léto, zima), kdy může být exponát při transportu vystaven různým venkovním teplotám. Každý, i sebelépe izolovaný transportní box, nakonec srovná svoje vnitřní klima s vnějším prostředím, pokud se v něm nachází dlouhou dobu. Proto lze po přepravě exponátu v boxu do místnosti díky senzoru monitorovat postupné vyrovnávání teploty a vyčkat do doby, kdy bude otevření boxu pro sbírkový exponát bezpečné. Objekt tedy zbytečně neprojde teplotním šokem (například nenastane z kondenzování vlhkosti na jeho povrchu, zkroucení teplotními gradienty). Další závěr, který umožní

analýza přepravních dat učinit, ukazuje, že zdrojem největšího zatížení exponátu z pohledu ořesů není ani tak stav vozovky jako spíš ruční manipulace (až 30 g), která však představuje malý zlomek přepravního času.

## Optimalizace přepravních boxů

Data ze senzorů slouží i k optimalizaci přepravních boxů (**obrázek 243**). Při řízených zkouškách lze zaznamenat, jaký je rozdíl mezi tím, co se děje v konstrukci boxu, a tím, co se děje s objektem uvnitř, a najít konstrukci pláště a výstelky maximalizující efekt tlumení. Tímto způsobem může být studována i efektivita tepelného stínění. Zaznamenáváme rozdíl mezi vnější a vnitřní teplotou a rychlost jejího přizpůsobování, která je mírou efektivity ochranného obalu. Sledování vnitřní a vnější teploty napomáhá k optimalizaci ochrany exponátů. Toto použití by nebylo dostupné bez zdvojení čidel.

## Závěr

Detailní znalost parametrů prostředí může přispět ke zlepšení ochrany exponátů ve sbírkách, depozitářích i během transportu. Ukazuje se, že teprve s číselným vyjádřením hodnot lze vyslovovat ověřitelné hypotézy o podstatě poškozování sbírkových předmětů. Klíčem k novým poznatkům o dějích, které vedou k hromadění poškození v exponátech, je podrobná znalost podmínek, kterým byly vystaveny (pro další informace o projektu viz Štefcová et al. 2014 a Valach et al. 2012). Na druhou stranu nelze předem odhadnout, u kterého ze sbírkových předmětů se poškození vyskytne, a proto je výhodné mít záznamová zařízení nasazena co nejmasivněji. Pro naplnění tohoto požadavku byla zařízení navržena s minimálními náklady. Tímto vývoj nekončíme. Chtěli bychom, aby čidla/zařízení byla schopna mezi sebou komunikovat a vytvářet jakousi realizaci toho, co se dnes nazývá internet věcí. Dalším cílem je využít energetické toky přítomné ve vnitřním prostředí, aby čidla mohla autonomně pracovat po co nejdélnější dobu. To, co jsme vytvořili v rámci tohoto projektu, by nemělo sloužit jen řešitelskému kolektivu, ale zcela naopak. Celý přístup k věci obsahuje pozvání pro všechny, kteří by chtěli tyto snímače na svých pracovištích vyzkoušet.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI (identifikační kód DF 12P01OVV027 „Jednotný modulární systém dálkového on-line sledování environmentálních charakteristik depozitářů a expozic“) Ministerstvem kultury ČR.

## Použitá literatura

- Stolow, N. *Conservation standards for works of art in transit and on exhibition*. Paris: Unesco, 1979. ISBN 92-3-101628-8.
- Štefcová, P., M. Pech, M. Kotyk, J. Valach, K. Juliš a J. Frankl. Pest management in museum collections and storage areas: new approach-online sensors for pest detection. *Journal of Environmental Science and Engineering A*. 2014, 3, 163-176.

- Thickett, D. Vibration damage levels for museum objects. In: *ICOM Committee for Conservation, ICOM-CC: 13th Triennial Meeting Rio de Janeiro preprints*. London: James & James, 2002, 90-95.
- Valach J., K. Juliš a P. Štefcová. Modular system of sensors for monitoring of museum internal environment. *International Journal of Heritage in the Digital Era*. 2012, 1, 39-42. <https://doi.org/10.1260/2047-4970.1.0.39>
- Valach J., B. Wolf, K. Juliš, P. Štefcová a M. Pech. Mobile device for monitoring of artefacts during transportation. In Ioannides, M., N. Magnenat-Thalmann, E. Fink, A. Yen a E. Quak (eds.). *EuroMed 2014: digital heritage. Progress in cultural heritage documentation, preservation and protection*. Hockley: Multi-Science, 2014, 442-451. ISBN 978-1-907132-47-6.

# Kódované fotometrické stereo pro dokumentaci a prezentaci drobných sbírkových předmětů

Jaroslav Valach

Vytváření digitálních třírozměrných modelů těles je oborem, kterému je věnována narůstající pozornost. V oblasti péče o kulturní dědictví a jeho zachování jde především o vytváření třírozměrných virtuálních replik vzácných předmětů a zpřístupňování sbírek nejširším okruhům zájemců, ať už profesionálních badatelů, nebo veřejnosti. Tím se otevírá možnost plně demokratického přístupu k historickému dědictví lidstva. Mimo digitální objekty manipulovatelné na dálku prostřednictvím počítačových sítí se také jedná o vytváření materiálních kopií digitalizovaných předmětů pomocí 3D tiskáren. Takové hmotné objekty nacházejí uplatnění nejen ve speciálních archeologických výzkumech, v nichž není možné použít originál, ale také například jako suvenýry.

## Metody prostorové digitalizace objektů

Obvykle se k digitalizaci objektů používají zařízení pracující na principu stereoskopického vidění, vyhodnocení paralaxy nebo deformace promítané pravidelné mřížky. Stereoskopické metody jsou založeny na záznamu tělesa dvěma kamerami, na kterých se různé body povrchu tělesa promítají na různá místa obrazů v závislosti na vzdálenosti mezi daným bodem na tělese a kamerou. Z geometrického rozboru měření vyplývá, že citlivost metody klesá se vzdáleností objektu od zařízení a také jsou pro tuto metodu problematická „plochá“ tělesa s nevýrazným reliéfem. Pro automatické přiřazení bodů z jednoho a druhého obrázku do páru je nezbytné, aby buď přímo povrch byl natolik různorodý, že metody zpracování obrazu toto přiřazení mohou bezpečně a spolehlivě provést, nebo lze na povrch promítat strukturované světlo, které s identifikací pomůže. Otázka měřitelné paralaxy je klíčová pro stanovení rozsahu vzdáleností a prostorové členitosti objektů, ve kterém jsou stereoskopické metody použitelné.

Jiný způsob měření prostorového tvaru tělesa je založen na projekci pravidelné mřížky o známých vlastnostech na povrch studovaného objektu. Prostorové členění povrchu způsobí deformaci mřížky, jež je napřed zaznamenána a pak vyhodnocena. Odchylka mezi očekávanou polohou a skutečně zaznamenanou polohou částí promítaného obrazce je úměrná vzdálenosti daného místa od zvolené roviny. Projekci mřížky je blízká technika využívající jev moaré. Původně bylo moaré označení pro jemnou, obvykle hedvábnou tkaninu s pravouhlým uspořádáním vláken, jež je utkána takovým způsobem, že mezery mezi rovnoběžnými vlákny přibližně odpovídají jejich průměrům. Když člověk hledí na světlé pozadí přes

vrstvy takovéto látky přeložené přes sebe, pozoruje vlnící se pruhy světlejších a tmavších oblastí, které odpovídají tomu, zda v daném místě jsou vlákna obou látek uspořádána za sebou, nebo vedle sebe. Je-li mezi fotoaparát, šikmo dopadající světlo a pozorovaný objekt vložena mřížka (tvořená neprůhlednými proužky na skle, přičemž mezery mezi proužky odpovídají jejich šířce), potom ve snímku pořízeném fotoaparátem lze pozorovat kombinaci mřížky s její projekcí na povrch objektu, výsledný efekt se projevuje soustavou proužků určujících místa o stejné výškové souřadnici.

Laserová profilometrie využívá takzvanou triangulační metodu, při které je laserový paprsek nasměrován svisle na objekt. Obraz stopy paprsku na povrchu tělesa se přes optickou soustavu promítá na lineární pole detektorů. Ze známé geometrie snímacího prvku s maximem signálu a čočky optické soustavy lze s velkou přesností stanovit vzdálenost mezi bodem povrchu a měřicím zařízením. Jestliže se toto uspořádání mnohokrát fyzicky opakuje v jednom zařízení, můžeme hovořit o naměření výškového profilu ve stanoveném úseku. Pokud dále zajistíme vzájemný posun tělesa a záznamového zařízení, můžeme hovořit o laserové profilometrii povrchu tělesa.

Je ovšem možné použít počítačovou tomografii, která vytvoří na základě rentgenových radiogramů získaných z různých směrů prozáření jeho prostorový model i s detailní znalostí jeho vnitřní struktury. Počítačová tomografie je schopná vytvořit z jednotlivých radiogramů plně prostorový model zkoumaného objektu, ale může se také soustředit jen na jeho povrch a jako výstup poskytnout jen „plášť“ vybraného objektu.

## Fotometrické stereo

V rámci dlouhodobého rozvoje různých optických metod pro dokumentaci těles ve 3D je v ÚTAM rozpracovávána metoda fotometrického sterea. Jak název vypovídá, jedná se o metodu, která zjišťuje prostorový tvar tělesa na základě měření intenzity světla odraženého z jeho povrchu. Metoda fotometrického sterea má své kořeny v planetární astronomii, kde byla užita ke zkoumání tvaru kráterových valů na Měsíci, Marsu i jiných planetách. To má své hluboké důvody – jiné metody prostorové digitalizace povrchů těles by nepřinesly požadované výsledky, jelikož výška reliéfu těchto útvarů je zanedbatelná ve srovnání se vzdáleností mezi Zemí a zkoumaným tělesem. Srovnáme-li například výšku kráterů na Měsíci s jeho velikostí, jeví se Měsíc bezmála hladký jako kulečnicková koule. Pro fotometrické stereo však vzdálenost není problém: rozhodující je prokreslení a zřetelnost stínů na povrchu vržených terénem od slunečního záření. A tuto citlivost si zachovává i metoda vyvinutá pro dokumentaci tvaru těles.

Dříve, než bude popsáno provedení a výsledky této techniky pro digitalizaci objektů, je na místě provést malou odbočku, která uvede do vztahu lidské vnímání prostorovosti předmětů a fotometrické stereo. Ukazuje se totiž, že stereoskopické vnímání předmětů díky páru očí s rovnoběžnými osami není jedinou technikou využívanou lidským mozkem pro rozpoznání prostorovosti objektů, což je významná přednost, berou-li se do úvahy výše zmíněná omezení: například ztráta citlivosti vůči hloubce předmětu s jeho vzdáleností. Pro určení tvaru vzdálených předmětů jsou zrakem a myslí nevědomky uplatňovány tytéž fotometrické principy. Díky stínování povrchu tělesa dopadajícím světlem je lidské oko schopno určit jeho tvar, neboť vychází z předpokladu, že zjasněná místa jsou ke zdroji světla

přivrácená, tmavá místa jsou naopak od něj odkloněná. Skok v rozložení jasu je příznakem zlomu nebo hrany. Fotometrický princip je klíčem i k dalším jevům. Například šrafování a rýhování jsou technikami, jak dodatečným vnesením vysokého kontrastu mezi blízkými místy na povrchu zakrýt různorodou barevnost plochy a hlavně její nerovnosti, které vyniknou při tečném osvětlení. I situace, ve kterých selhává využití tohoto principu, jsou potvrzením jeho platnosti: Pokud sochu pokryje krusta neboli souvislá vrstva černých usazenin, které dříve pocházely ze spalování uhlí v lokálních topeništích, a dnes je především způsobuje nákladní doprava s dieselovými motory, stane se její povrch silně pohlcující pro dopadající světlo. Malý zlomek dopadajícího světla, co se z povrchu odrazí, již lidskému oku nestačí k rozpoznání tvaru objektu, a proto ztratí schopnost „číst“ ze stínování objemovost sochy, jež tak ztratí významnou část svého sdělení a zbude z ní pouhá silueta. Tato situace je bezesporu impulzem pro zahájení restauračního procesu, ale to by bylo jiné téma.

Jak tedy metoda fotometrického sterea funguje? Předměty pohlcují, propouštějí a odrážejí dopadající světlo. V odraženém světle je přítomna informace o barevnosti jejich povrchu (která je určena různou odrazivostí pro různé barvy), ale také informace o tvarování, drsnosti a reliéfní členitosti povrchu. „Fotometrická“ se nazývá proto, že stanovuje množství světla, které do záznamového zařízení, například fotoaparátu, z daného místa zkoumaného povrchu přichází. Pro záznam tvaru, ono „stereo“ z názvu se uplatňuje základní pravidlo říkající, že při jinak stejných podmínkách se místo na povrchu jeví nejsvětlejší, míří-li jeho normála (kolmice k povrchu) ke zdroji světla. Ze známé polohy světla lze na základě zjištění, jak světlé se místo na povrchu tělesa jeví, určit jeho sklon napřed vůči tomuto dopadajícímu světlu a potom vůči obecné soustavě souřadnic (Horn 1975 a Woodham 1980). Od znalosti sklonů je již malý krok k dopočtení výšek, které je nezbytné znát pro vytvoření třírozměrného modelu povrchu. Tento „malý krok“ ve skutečnosti představuje řešení obrovské nelineární soustavy rovnic, které jsou schovány „pod kapotou“ aplikace, do které vstupují fotografie nasvětleného povrchu tělesa a ze které jako výsledek vychází rekonstrukce topografie tělesa. Minimální počet vstupních fotografií vyplývá z následující podmínky: jelikož každé místo zkoumaného povrchu je určeno sklonem do dvou směrů a vlastní barevností, je nezbytné využít alespoň tří rozličných způsobů nasvětlení povrchu pro jednoznačné řešení problému. Tento prostorový model se následně „povlékne“ fotografií povrchu pořízenou v rozptýleném bílém světle potlačujícím stíny. Možnost uchovat třírozměrný povrch včetně jeho přirozeného vzhledu je například oproti laserové profilometrii výraznou předností této techniky.

## Zařízení pro fotometrické stereo

Přesně definované osvětlení předmětu je pro fungování metody rozhodující. Proto bylo v ÚTAM nejprve vyvinuto speciální zařízení, které integruje nasvícení povrchu s jeho záznamem na digitální fotoaparát, jež díky přímému propojení s počítačem umožňuje využití techniky nejen v laboratoři, ale díky kompaktním rozměrům i v terénu, toto zařízení lze označit jako nultou generaci. Zařízení používá další malý trik, aby překonalo omezení postupnosti přepínání světel, které jinak brání záznamu v čase se rychle měnících povrchů: jak známo, většina digitálních fotoaparátů ukládá barevné snímky jako kombinaci červené, zelené a modré složky. Pokud pro každé ze tří světel, které potřebujeme pro vytvoření

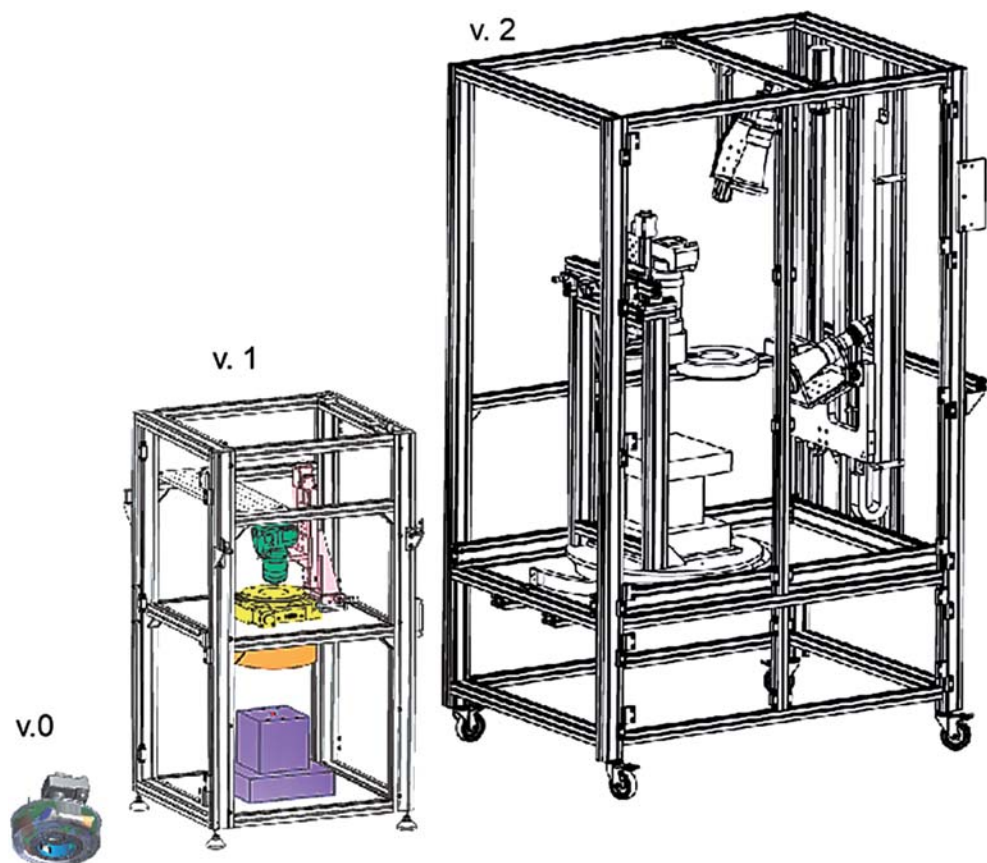
3D modelu povrchu, provedeme snímek v jedné z těchto barev, bude zaznamenaný obraz obsahovat tři nezávislé, oddělitelné scény. Tato varianta metody se nazývá „kódované fotometrické stereo“ (označované CPS), protože je možné v jednom snímku zaznamenat tři obrázky najednou, aniž by se ovlivňovaly (Valach 2011 a Vavřík et al. 2005). Zařízení na digitalizaci objektů metodou fotometrického sterea prošla v průběhu času evolucí, kterou vykresluje **obrázek 244**. Původní nasvěcovací zařízení pro CPS bylo použito pro základ zařízení rozšířené o skřín a několik počítačově řízených polohovacích os. Toto rozšířené zařízení je možné označit jako první generaci přístroje. Tímto způsobem bylo možné získat větší počet snímků pro digitalizaci povrchu tělesa a provést celkovou automatizaci záznamu. Nicméně velikost digitalizované plochy nedostačovala pro většinu studovaných předmětů a bylo nutné hledat způsob, jak zvětšit osvětlenou plochu. K tomuto účelu byla využita telecentrická světla, která díky své optické soustavě čoček vydávají kolimované světlo tvořené rovnoběžnými paprsky. Další vylepšení požadované na základě rozboru fungování zařízení první generace spočívalo v přidání pohyblivosti světla, která zaručuje volbu úhlu, pod kterým světlo na vzorek dopadá. Tento stupeň volnosti je pro fungování metody nezbytný – digitalizované předměty s velmi členitým povrchem je třeba osvětlovat téměř svisle, aby se vyloučily vlastní stíny, zatímco předměty s plochým a nevýrazným reliéfem vyžadují bezmála tečné osvětlení, ve kterém vynikají jejich výškové rozdíly. Pro první odhad topografie studovaného předmětu slouží světlo, které na povrch objektu promítá soustavu rovnoběžných proužků. Analýzou proužkového obrazce lze při známé geometrii projekce zjistit absolutní informace o výškové souřadnici v daném místě a tato informace poslouží pro zpřesnění konečné rekonstrukce spojením s topografickými informacemi z fotometrického sterea. Kvalitní prstencové světlo pro bezstínové osvětlení objektu je nezbytnou podmínkou pro kvalitní rekonstrukce, ale také pro dokumentaci objektů. Použití bílého světla zajišťuje spolehlivé chování zařízení při libovolné vlastní barvě zkoumaného objektu na rozdíl od nulté verze zařízení, které povrch nasvěcovalo v různých barvách. Vysoký stupeň automatizace ovládání a možnost programovatelné obsluhy a postupů podle zvoleného algoritmu nabízí novou kvalitu ovládání, jež s sebou přináší i novou kvalitu zaznamenaných dat. V neposlední řadě velká plocha stolku umožňuje i dávkové zpracování digitalizace malých objektů, které na stolek mohou být umístěny současně, a ovládání programu umožní jejich postupnou digitalizaci a spojování neboli „sešívání“ částečných modelů. Výsledný objekt s texturou (vlastní barevností) zaznamenanou s použitím prstencového bezstínového světla a informací o prostorové modelaci získané fotometrickým stereem je potom zcela připraven pro umístování do aplikací umožňujících simulované nasvěcování ve „virtuálních světech“, manipulaci ve virtuální realitě a další operace.

Zmíněná vylepšení byla základem pro v současnosti poslední verzi zařízení.

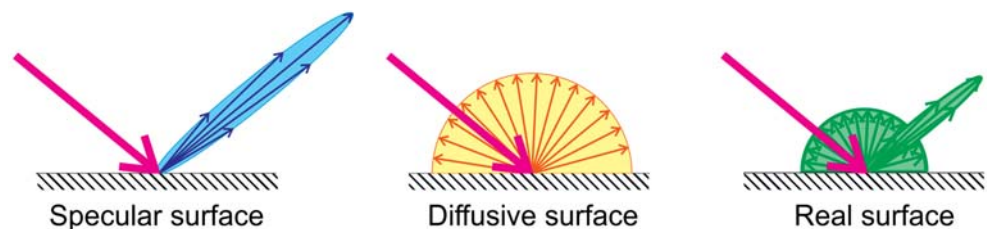
## Vliv povrchu objektu na spolehlivost fotometrického sterea

Znalost odrazivých vlastností povrchu je zásadní pro fotometrické metody, jelikož svazuje informaci o množství odraženého světla se sklonem plošky vůči dopadajícímu světlu a vůči fotoaparátu (**obr. 245**). Některé povrchy jsou zrcadlově lesklé neboli spekulární, jiné matné (difuzní) a rozptylují dopadající světlo rovnoměrně do všech směrů. Difuzním povrchům se také říká lambertovské. Jiné jsou „něčím mezi“ nebo na přechodu od zrcadlového



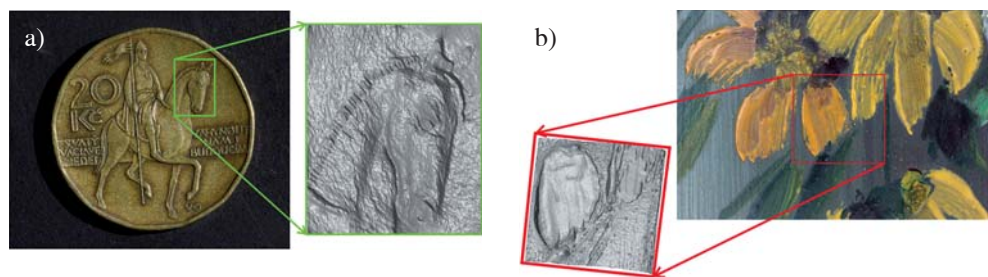


**OBRÁZEK 244:** Generační sled zařízení na digitalizaci objektů metodou fotometrického sterea

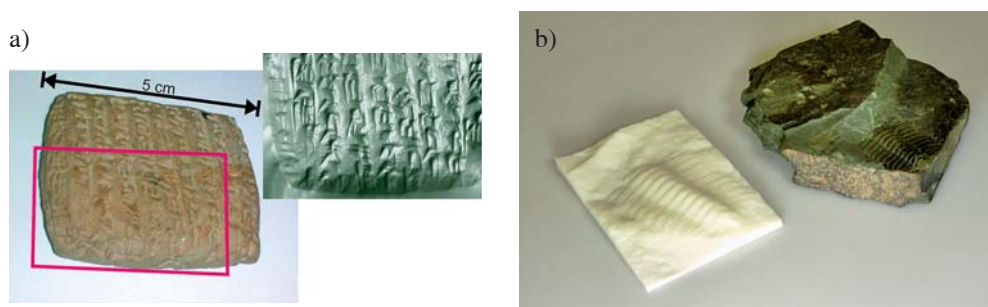


**OBRÁZEK 245:** Způsob interakce světla s rozdílnými typy povrchů: lesklý (specular), matný (diffusive) a skutečný (real)

lesku k difuznímu povrchu, jak lze například pozorovat u mincí, které jsou různou dobu v oběhu: nové se lesknou, ale vlivem korozivního prostředí lidských rukou, hromaděním škrábanců a abraze povrchu při směně zmatní (**obr. 246**). Měřením směrové závislosti odrazivých vlastností tedy lze nejen zpřesnit výpočet povrchového reliéfu, ale také získat poznatky důležité pro vyhodnocení stavu povrchu. Směrovou závislost odrazivých vlastností



**OBRÁZEK 246:** a) Ilustrace digitalizovaného detailu hlavy koně z 20 Kč mince. b) Plastické tahy štětce v malbě vyniknou při virtuálním nasvícení digitalizovaného modelu bočním světlem



**OBRÁZEK 247:** a) Klínopisná tabulka a její digitální model; b) Fosílie trilobite (vpravo) byla digitalizovaná pomocí fotometrického sterea a model použit jako předloha pro 3D tiskárnu, která vytiskla repliku

Lze stanovit pomocí zařízení zvaného reflektometr. Připojením znalostí o odrazivosti povrchu předmětu ke vstupním datům v podobě fotografií v různých nasvíceních lze zpřesnit vypočtenou topografií povrchu tělesa. Začleněním ne-Lambertovských povrchů do procedur fotometrického sterea se významně rozšířila třída materiálů, na které je možné korektně postup aplikovat. Omezení na difuzní povrchy bylo překonáno a nyní lze zahrnout do výpočtu i objekty lesklé nebo s matným leskem. Současně se vytvořil prostor pro možnou synergii aplikačních výstupů s projektem zaměřeným na studium povrchu ochranných povrchů mozaik, jehož jedním z aplikačních výstupů byl laboratorní reflektometr, tedy zařízení schopné získávat potřebná vstupní data o odrazivosti povrchu pro rekonstruování povrchu.

## Využití fotometrického sterea

Schopnost metody zaznamenávat mikroskopické nerovnosti povrchu ji činí přitažlivou pro různé aplikace v oblasti kulturního dědictví. Pro prostorově členité povrchy s malými výškovými rozdíly je možné zintenzivnit prokreslení stínů snížením světla do téměř tečné polohy. Postup se tak podobá známému způsobu, jak hledat na rovné podlaze malý předmět: zhasne se světlo a položenou baterkou se svítí do všech možných směrů. Když kužel světla dopadne na vystupující předmět, vržený stín prozradí jeho polohu. Tímto způsobem lze dokumentovat nárůst degradovaných vrstev – například koroze, nebo naopak různé typy ztráty hmoty z povrchu, například otěrem, v důsledku mechanického čištění a podobně.

Metoda je vhodná zejména pro záznam drobných sbírkových předmětů reliéfního charakteru, jako jsou mince, pečeti, kameje, různé fosílie a podobně. S úspěchem lze fotometrické stereo také uplatnit ve studiu malířských technik různých autorů, protože dokumentuje plastické použití barev pro expresivnější vyznění díla či prostě zaznamenává temperament tvůrce samotného...

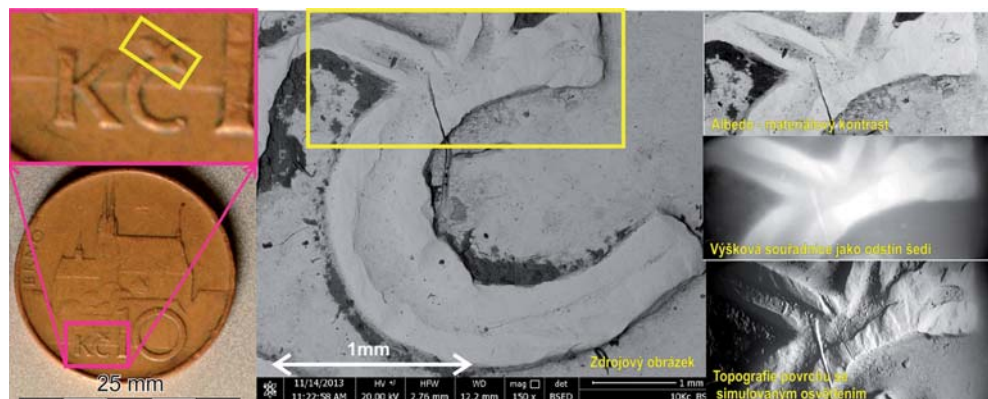
Velmi zajímavé je využití metody pro uchování a celosvětové zpřístupnění sbírek klínopisných tabulek. Klínopis byl ve starověkých kulturách Asie používán k záznamu jak literárních děl, tak i obchodních smluv. Do trojbokého tvaru seříznutým rákosem byly do měkké tabulky z keramické hlíny zapisovány znaky, které se vypálením staly trvalé. Tabulky jsou jednobarevné a čitelnost znaků obstarává stín, který na vrypech vzniká. Tabulka se znaky klínového písma se tedy čte tak, že se různě naklání vůči dopadajícímu světlu a plasticita znaků vyvstává v pohybu stínů. S ohledem na vzácnost destiček není možné je vystavovat riziku přímé manipulace, a proto se hledají způsoby, jak je zpřístupnit badatelům virtuálně, například přes internet. Ukazuje se, že fotografie pro takový účel nedostačují, protože se v nich ztrácí výše popsáný pohyb stínů, ale vytváření digitálních modelů metodou fotometrického sterea by řešením být mohlo...

Jiná výrazná aplikace digitálních třírozměrných modelů těles spočívá v tzv. reverzním inženýrství, kdy jeden výrobce vytváří doplňky, příslušenství nebo náhradní díly k výrobku jiného výrobce, aniž by měl k dispozici originální výkresovou dokumentaci. V jistém slova smyslu do této kategorie spadá i situace, kdy se mají vytvářet ortopedické a protetické pomůcky – dlahy, krunýře na rovnání páteře, umělý chrup nebo části kostí pacientů. V případě muzejních předmětů jde především o doplnění chybějících částí pro názornější předvedení celku (**obr. 247**).

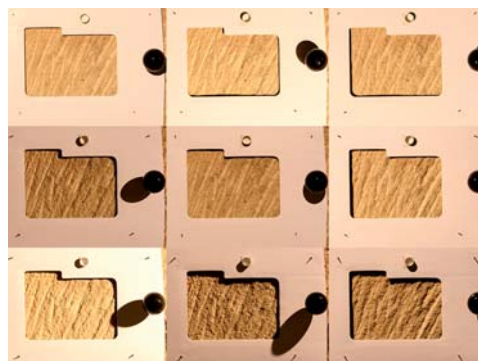
Jak vyplývá z výkladu o historických počátcích fotometrického sterea v astronomii, jeden a týž algoritmus pro 3D digitalizaci předmětů je schopen obsáhnout měřítka astronomická i lidská. Je zajímavé, že stejnou techniku lze použít i pro mikroskopická pozorování, pokud je zaručena možnost „nasmícení“ scény podle pravidel standardního použití metody. Zdroj světla nemusí být pouze viditelné záření, ale může jím být elektronový paprsek či tepelné záření (ve kterém se jeví povrchy lesklejší, protože vlnová délka tepelného záření těles, ve které je povrch pozorován, je delší ve vztahu k nerovnostem povrchu, což je podmínka pro to, aby se povrch jevil opticky hladší). Změnou vlnové délky se lze soustřeďovat na různé úrovně drsnosti povrchu. Tvzení je ilustrováno prostorovou rekonstrukcí malého detailu mince provedené pomocí řádkovacího elektronového mikroskopu vybaveného čtyřdílným detektorem zpětně odražených elektronů. Záznam obrazů téže části povrchu mince různými kvadranty detektoru je ekvivalentní pořizování snímků při různém nasvícení scény, jak ukazuje schematický **obrázek 248**. Zpracováním vstupních obrázků vyvinutým programem je možné zjistit nejen výškové souřadnice jednotlivých míst zkoumaného povrchu, tedy lokální topografii, ale také zvýraznit materiálový kontrast sledovaného povrchu.

Podobně lze postupovat i pro objekty tak veliké, že se nevejdou do zařízení. Reliéfní povrchy jsou typickou oblastí pro využití fotometrické metody (**obr. 249**). Ta se proto může významně uplatnit při dokumentaci tesařských a kamenických značek, které bývají během historických průzkumů středověkých staveb nejen důležitým zdrojem informací o mistrech, kteří dané dílo provedli, ale i o způsobu, nástrojích a technice práce. Pro studium stop tohoto druhu se obvykle užívá název trasologie.

Použitím velmi silného zdroje světla (nutného k tomu, aby běžné osvětlení povrchu denním světlem bylo zanedbatelné), umístovaného do různých míst, vznikaly nasvícené scény, ze kterých byla provedena rekonstrukce povrchové topografie. Pozornější pohled na detail záberu zkoumané části kamenného bloku ukazuje nejen výrazné vystínování, ale také ozřej-

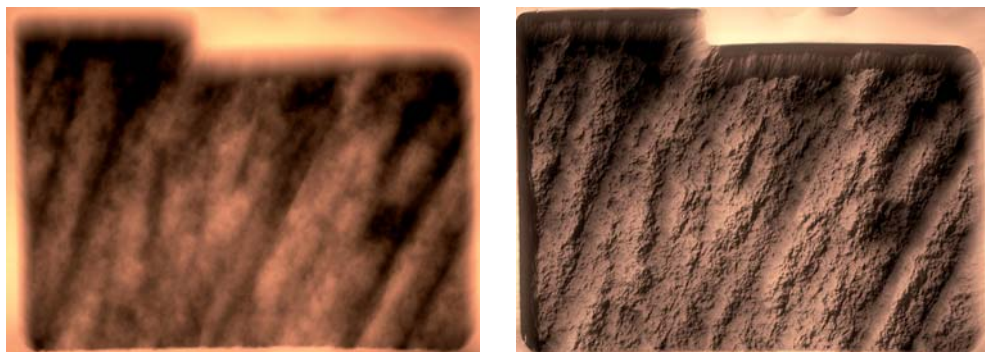


**OBRAZEK 248:** Fotometrické stereo lze použít k vytváření digitálních modelů i velmi malých objektů (detail mince) zaznamenaných do obrazů pořizovaných fyzikálně odlišným způsobem, než je světelná fotografie – zde pomocí SEM. Výsledek pak ukazuje nejen prostorové členění, ale také materiálové složení.



**OBRAZEK 249:** Vlevo ukázka získávání vstupních obrázků pro metodu fotometrického sterea „v terénu“. Vpravo kompozice devíti obrázků zachycujících různé nasvícení povrchu, které jsou vstupními daty pro fotometrické stereo

muje několik různých způsobů, jak určovat polohu zdroje světla vůči vzorku a vůči fotoaparátu. Nejjednodušší a nejspolehlivější se jeví použití černé koule, v jejímž povrchu se zdroj světla jeví jako světlá tečka, ale takové řešení není příliš přesné, a proto byla tato indikace ještě doplněna jinou – založenou na stínu vrženém nízkým prstencem a především délkou stínů čtveřice hrotů o známé výšce vystupujících z plochy bílého kartonu. Jak dramaticky odlišný se jeví povrch při různých směrech nasvícení ukazuje **obrázek 250**. Je zároveň přesvědčivou ilustrací skutečnosti, že pro vystižení povrchu je fotografie nedostatečná a měla by být doplněna informací o topografii a o orientaci plošek povrchu. Takovou informaci poskytne právě digitalizace povrchu předmětu, například provedená fotometrickým stereem. Jejím výsledkem je poznání výškové informace o jednotlivých bodech na povrchu, ale také možnost podle potřeby provést simulované nasvícení povrchu i s virtuálně vrženými stíny. Výškové informace jsou zakódovány do barevného odstínu bodů v jednotlivých místech na povrchu studovaného tělesa. Oproti tomu přidáním simulovaného světelného zdroje se zviditelní díky vrženým stínům modelace povrchu.



**OBRAZEK 250:** Vlevo digitální model povrchu kamene – jas jednotlivých bodů odpovídá jejich výškové souřadnici. Vpravo též model doplněný „virtuálním světlem“, které vržením stínů činí prostorové členění povrchu názornější

Vysvětlení principů, na kterých je metoda fotometrického sterea založena, odhaluje zajímavé souvislosti metody s fyziologií lidského vnímání objemovosti těles. Na příkladech rekonstrukcí povrchů různých typů těles byly ukázány možnosti metody fotometrického sterea pro digitalizaci objektů. Výsledné virtuální kopie mohou být bez omezení sdíleny se zájemci, ať už jimi jsou badatelé, nebo jen nadšení laici. Digitální modely mohou být též replikovány na 3D tiskárnách a tím lze nepřímo přispět k ochraně předlohy.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI „Diagnostika poškození a životnosti objektů kulturního dědictví“ DF11P01OVV001. Bez spolupráce s J. Bryscejnem, D. Vrbou, D. Vavříkem, T. Fílou a dalšími spolupracovníky by nemohla být dokončena.

## Použitá literatura

- Holubová, B., Z. Zlámalová Cílová, I. Kučerová a M. Zlámal. Weatherability of hybrid organic–inorganic silica protective coatings on glass. *Progress in Organic Coatings*, 2015, 88, 172-180. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2015.07.001>
- Valach, J. a J. Bryscejn. Improved precision of stereometric measurement of relief's surface by means of structured light enhanced photometric stereo method. In: Návrat, T., V. Fuis, L. Houfek a M. Vlk (eds.). *Experimentální analýza napětí 2011*. Brno: Czech Society for Mechanics, 2011, 411-415. ISBN 978-80-214-4275-7.
- Vavřík, D., J. Bryscejn, J. Jakůbek, a J. Valach. Optical measurement of a 3D displacement field using one camera. In: Brebbia, C. A. (ed.) *Computational Methods and Experiments in Material Characterisation II*. Southampton: WIT Press, 2005, 229-237. ISBN 978-1-84564-031-6. <https://doi.org/10.2495/MC050221>
- Winston, P. H. (ed.). *The psychology of computer vision*. New York: McGraw-Hill, 1975, 115-155.
- Woodham, R. J. Photometric method for determining surface orientation from multiple images. *Optical Engineering*. 1980, 19(1), 139-144. <https://doi.org/10.1117/12.7972479>

## Rentgenové zobrazování plastik a obrazů

Daniel Vavřík, Jan Žemlička

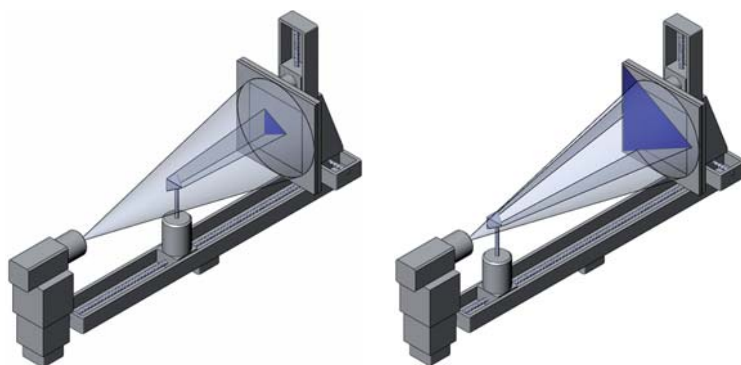
V muzejních a galerijních sbírkách se nachází mnoho cenných předmětů, u kterých nelze využít jiných průzkumných metod než neinvazivních. Mezi tyto metody náleží i rentgenové zobrazování, které může poskytnout cenné informace o vnitřní struktuře zkoumaného díla. K takovému průzkumu je řada důvodů. Znalosti vnitřní struktury uměleckého objektu napomáhají restaurátorům při identifikaci dřívějších úprav, oprav a doplňků a lze s jejich pomocí identifikovat skryté vnitřní vady a poškození; z hlediska umělecko-historického je přínosné shromáždit informace o užitých technologických postupech – lze tak v některých případech získat dílensky či autorsky specifická data – jakýsi „podpis“ autora; u obzvláště cenných artefaktů je vhodné nedestruktivní zobrazovací metodou dokumentovat jejich stav v případě jejich přesunu do jiné lokace (například v případě dlouhodobé zápůjčky).

Jednou ze základních metod zkoumání vnitřní struktury objektů je rentgenografie, založená na prozařování objektu rentgenkou, kdy je snímek reprezentující útlum rentgenového (RTG) záření po průchodu objektem zaznamenáván zobrazovacím detektorem, umístěným za objektem. Vzniklý dvourozměrný rentgenogram zahrnuje informace o vnitřní struktuře, hustotě a atomovém složení zkoumaného objektu.

Rentgenogram sejmутý z jednoho pozorovacího úhlu nám samozřejmě nepoví, jak jsou vnitřní detaily objektu rozloženy v objemu, do rentgenogramu se promítne vše, čím RTG záření prošlo. Prostorovou strukturu objektu se můžeme dozvědět až pomocí počítačové tomografie.

V případě obrazů nám rentgenografie dává obvykle všechny potřebné informace. Je ale třeba mít k dispozici manipulační systém, který dovolí zobrazit i relativně velká plátna. Další podmínkou je zobrazovací detektor s vysokým rozlišením a citlivostí i na nízké energie RTG fotonů.

Rentgenografické i tomografické metody v posledních dvou dekadách zaznamenaly významný technologický pokrok, který umožnily především nové nano- a mikrofokusové rentgenky a digitální zobrazovací detektory. Rentgenografický/tomografický skener laboratoře rentgenové radiografie a tomografie Centra excelence Telč (CET) je osazen takovými prvky. Navíc disponuje pokročilým manipulačním systémem s přesným absolutním odměřováním poloh. Díky tomu můžeme běžně zobrazovat vnitřní struktury materiálu s mikrometrickým rozlišením a skenovat rozměrná plátna až do velikosti jednoho čtverečního metru.



**OBRÁZEK 251:** Schematické znázornění geometrického zvětšení v rentgenografickém/tomografickém skeneru: vlevo je objekt připevněný na rotačním stolku v půlce vzdálenosti „rentgenka – detektor“, výsledné zvětšení 2x. Vpravo je v jedné šestině vzdálenosti, blíže k rentgence, výsledné zvětšení 6x, projekce je větší než aktivní plocha detektoru (pro použitou velikost objektu).

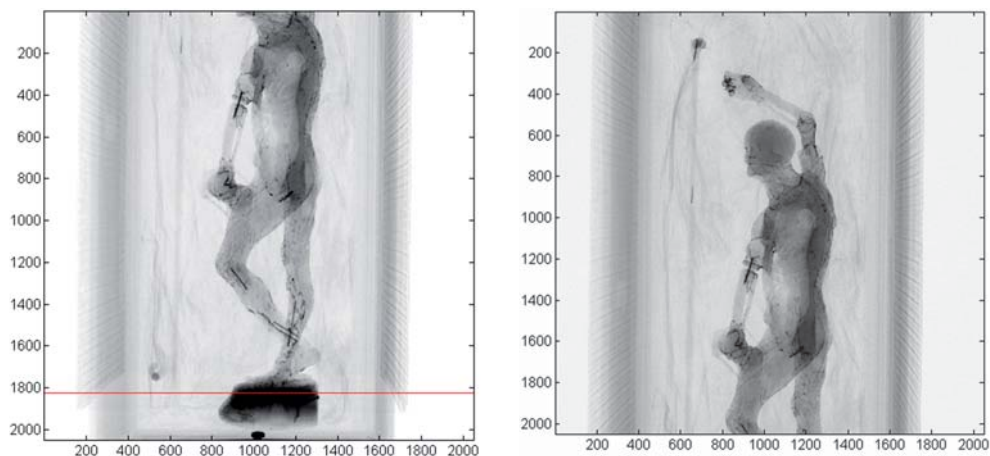
## Rentgenografie

Do dvourozměrného rentgenogramu jsou projektovány všechny struktury, které se ocitly v cestě mezi zdrojem RTG záření, v našem případě rentgenkou, a zobrazovacím detektorem. Nevíme tedy, v jaké hloubce objektu se pozorovaný prvek vyskytuje. Přesto tak v mnoha případech můžeme získat dostatečné informace o vnitřní struktuře zkoumaného objektu. Základním předpokladem úspěšné rentgenografie je dostatečný odstup signálu od šumu, tj. získání dostatečně kontrastního snímku. Schopnost RTG záření prosvítit studovaný objekt je přímo úměrná energii RTG fotonů. V případě rentgenky je RTG spektrum spojitě, s maximem rovným urychlovacímu napětí. Pro masivní objekty či objekty složené z těžších prvků se pak volí napětí až stovky kV, jinak za objektem naměříme příliš malý, či dokonce žádný užitečný signál. Naopak pro málo tlumící objekty je nutné použít napětí na úrovni desítek kV, energetická část spektra se při pronikání objektem utlumí velmi málo, či vůbec – opět se tak snižuje úroveň užitečného signálu.

Rozlišení rentgenogramu je prvotně dáno geometrickým zvětšením, nepřímo úměrným poměru vzdáleností „rentgenka – detektor“ ku „rentgenka – objekt“, schematické vyobrazení geometrického zvětšení rentgenografickým/tomografickým skenerem je na **obrázku 251**.

Maximální možné rozlišení rentgenogramů je omezené velikostí emisní skvrny rentgenky (plocha, ze které jsou emitovány RTG fotony) – v rentgenogramech lze rozpoznat detaily, které jsou větší než polovina velikosti skvrny. Na straně detektoru je důležitá vysoká granularita (malá zrnitost filmu či velikost pixelu detektoru), vysoký dynamický rozsah (i malá změna v útlumu je rozpoznatelná) a především malé „rozmazání“ kontrastní hrany (signál by měl přejít z maxima do minima na co nejkratší vzdálenosti).

Využití RTG optiky je v praxi velmi omezené, proto je maximální průřez objektu, který lze zobrazit v jednom rentgenogramu, limitován velikostí detektoru a použitým zvětšením. Například pro detektor s aktivní plochou 400 × 400 mm můžeme při stonásobném zvětšení v jednom rentgenogramu zobrazit objekt o maximálním průřezu 4 mm. V případě, kdy je projekce větší, než je aktivní plocha detektoru, můžeme tento objekt skenovat, tedy posunovat detektor a rentgenku kolmo k ose svazku RTG záření.



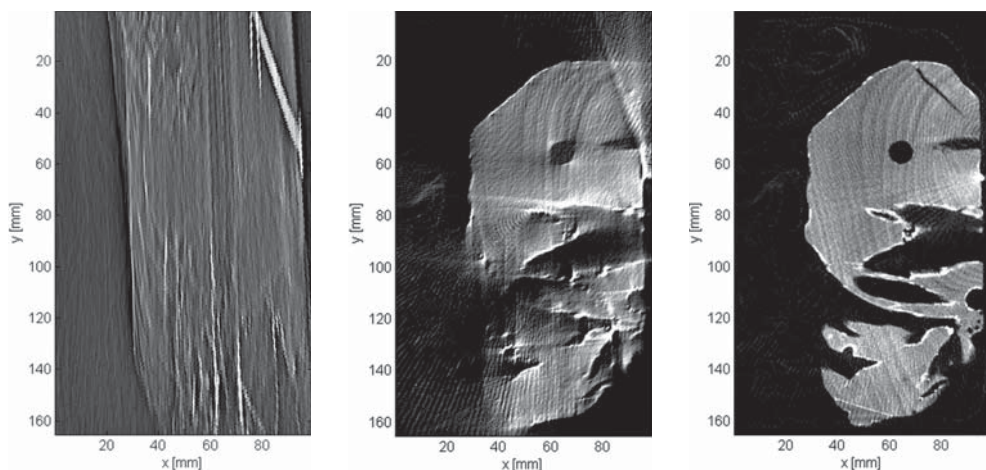
**OBRÁZEK 252:** Ukázka rentgenografie, zobrazená dřevěná socha Smrtka (Vanitas). Ve snímku lze jasně rozpoznat drátky, které spojují jednotlivé díly sošky (loket, koleno, bérce). Spojovací drátky v kloubech byly aplikovány při vzniku díla, drátky v bércích nejspíš pochází z pozdějších restaurátorských zásahů. Na sošce je množství tmavých teček – materiál s vysokým útlumem. Jedná se nejspíše o fragmenty polychromie, z rentgenogramu není přímo patrné, zda jsou tyto částičky na povrchu sošky. Na pozadí přepravního obalu jsou v rentgenografii obtížně rozpoznatelné dřevěná kosa a červ, které byly v krabici umístěny odděleně.

Ukázka rentgenografie je uveden na **obrázku 252**, kde je zobrazena dřevorezba kabinetního formátu zobrazující Smrtku (Vanitas) ze sbírek Národní galerie v Praze (střední Evropa, kolem 1530, lipové a břekové dřevo, v. 42 cm, fragmenty polychromie, NG v Praze inv. č. P 7338). Pro záznam obrazových dat byl použit velkoplošný detektor typu flat panel s aktivní plochou 400 × 400 mm. Na rentgence bylo nastaveno urychlovací napětí 160 kV. Toto relativně vysoké napětí bylo voleno s ohledem na přítomnost kovových spojovacích prvků a polychromie obsahující materiály s vysokým atomovým číslem (fragmenty stříbrnění, olovnatá běloba, železité pigmenty). Při měření bylo zvoleno minimální možné zvětšení 1,2×, které dovozoval rozměr ochranného boxu (během měření nebyla soška vybalována). Přesto se soška do jedné projekce nevešla celá, byla proto zobrazena na dvakrát – horní a dolní polovina. V rentgenogramech je maximální signál v místech otevřeného svazku, kde záření nestojí nic v cestě. Minimální signál je v místech spojovacích drátků (vysoká hustota) a v hmotě podstaty sochy (masivní část, záření prochází velkou tloušťkou).

## Počítačová tomografie

Počítačová tomografie (computed tomography – CT) je všeobecně známá z lékařského prostředí. Medicínské CT skenery mají fixní ozařovací geometrii s přibližně dvojnásobným zvětšením, kde rotuje soustava „rentgenka – detektor“, člověk je posouván v ose rotace. Typické rozlišení medicínských CT skenerů je 1 mm, nejnovější generace dosahuje rozlišení 0,3 mm. U medicínských CT skenerů je obvykle napětí nastavitelné v rozmezí 80–120 kV. Technické tomografy jsou koncipovány jinak. Především rotuje objekt a ostatní části skeneru jsou při měření statické (viz schematický **obrázek 251**). Geometrie ozařování je nastavitelná v širokém rozmezí zvětšení, taktéž napětí na rentgence je možné měnit ve značném rozsahu.





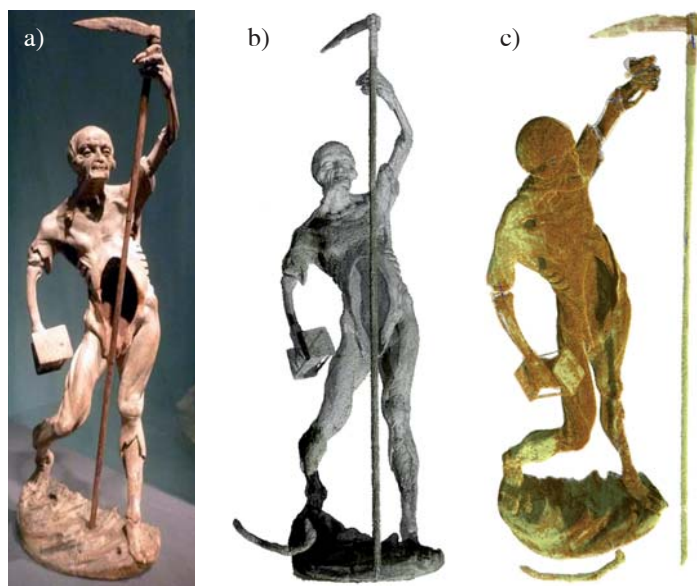
**OBRAZEK 253:** Ukázka rekonstrukce jednoho tomografického řezu. Vlevo s jednou projekcí, uprostřed integrál prvních sta zpětných projekcí (rotace stolku 45 stupňů), vpravo integrál se všemi naměřenými projekcemi. V řezu vpravo je v dolní části vidět, že byla spodní část sošky doplňována (změna směru letokruhů). Jasná slupka kolem rekonstruovaného řezu indikuje přítomnost polychromie obsahujícího prvky s vyšším atomovým číslem.

Základní princip tomografie není složitý. Během rotace objektu vůči soustavě „rentgenka – detektor“ jsou nahrávány rentgenogramy – takzvané projekce. Běžně je na projekce aplikován přirozený logaritmus a jsou normovány pozadím (rentgenogramem bez objektu). Při takzvané filtrované zpětné projekci jsou tyto projekce po vysokopásmovém filtrování virtuálně projektovány napříč rekonstruovaným objemem, přitom je respektována geometrie prozařování. Pro každý úhel rotace je tak zaznamenána stopa projekce v rekonstruovaném tomografickém řezu, příklad jedné zpětné projekce je na **obrázku 253** vlevo. Výsledná rekonstrukce je integrálem všech zpětných projekcí. V místech, kde nebyl objekt přítomen, je signál pro všechny projekční úhly konstantní, v místech, kde se nacházel objekt, je signál vyšší. Při dostatečném počtu projekčních úhlů dostaneme věrnou informaci o geometrii zkoumaného objektu i o jeho vnitřní struktuře.

V závislosti na rekonstrukčním algoritmu a požadované kvalitě rekonstrukce jsou potřeba stovky až tisíce projekčních úhlů. Na **obrázku 253** uprostřed je ukázka rekonstrukce jednoho řezu, kdy byl použit nedostatečný počet projekcí (100), vpravo je tentýž řez s plným počtem naměřených projekcí (400). Jedná se o rekonstrukci jednoho tomografického řezu sošky Smrtky (Vanitas), uvedené výše, poloha řezu je vyznačena červenou čarou v **obrázku 252** vlevo.

V rekonstrukci řezu v **obrázku 253** vpravo jsou patrné letokruhy dřeva, na hranicích dřeva je patrná bílá vrstva, místně odpovídá vrstvě podkladu a vrstvám polychromie. Ve spodní části je viditelný doplněk. Data byla snímána díky skriptovacím možnostem software Pixelman (Tureček et al. 2011). Použitý rekonstrukční software umožňuje zadat celou geometrii skeneru, včetně jeho nepřesností, program byl vytvořen v prostředí Matlab od MathWorks.

Při tomografické rekonstrukci jsou zrekonstruovány všechny řezy a z těch je posléze složen prostorový model celého objektu. Podobně jak bylo uvedeno výše, nebylo možné v jednom tomografickém záznamu zaznamenat celou řezbu najednou. Byla proto rekonstruována



**OBRAZEK 254:** a) Foto díla, postava Smrtky drží kosu, had prochází skeletem (Fotografie Národní galerie); b) kompletní rekonstrukce – kosa a had byly v přepravním boxu uloženy odděleně; c) části s nižší hustotou jsou obarveny světlejším odstínem.

zvlášť horní a spodní část sochy, obě rekonstrukce byly posléze spojeny. V **obrázku 254** a **255** jsou ukázány různé způsoby zobrazení tomografické rekonstrukce. Na vizualizaci byl použit software VGmax, MAX 2.2., poskytnutý firmou Volume Graphics GmbH.

Při analýze tomografických dat bylo potvrzeno, že socha byla téměř celá zhotovena z jednoho kusu dřeva, paže byly v loktech připojeny pomocí kovových čepů. V průběhu času zřejmě došlo k poškození některých choulostivých částí řezby. Poškozeny byly například oba bérce. U pravého je vidět významné doplnění jeho hmoty, doplněk nemá kresbu lipového dřeva a má vysoký útlum (vyšší hustota). Podobně byla opravována i levá ruka. V podstavě s řezbou travnatého terénu jsou viditelné drobné praskliny a chodbičky červotoče. Čitelné jsou i drobné dřevorezby a doplňky. Polychromie není na soše dochována spojitě, místně zcela chybí (viz např. kosiště). Kosiště je spojeno ze dvou kusů a dle hustoty dřevní hmoty je z měkčího dřeva, než řezba Smrtky.

## Velkoplošné skenování obrazů

V laboratoři rentgenové rentgenografie a tomografie CET bylo rentgenograficky skenováno několik obrazů v celé jejich ploše. Jednalo se například o velký olej, připisovaný Munchovi – článek se připravuje k publikaci; autoportrét van Gogha (vlastník si nepřeje zveřejnění); pravděpodobné falsum Rafaelova deskového obrazu ze soukromé sbírky (vlastník si nepřeje zveřejnění); obraz s přemalbou, pravděpodobně od van Gogha - související článek se připravuje k publikaci.

Z velkoplošných radiografií, realizovaných v laboratoři CET, byly publikovány práce (Žemlička et al. 2014, Hradilová et al. 2014) týkající se dvou obrazů – *Nanebevzetí Panny*

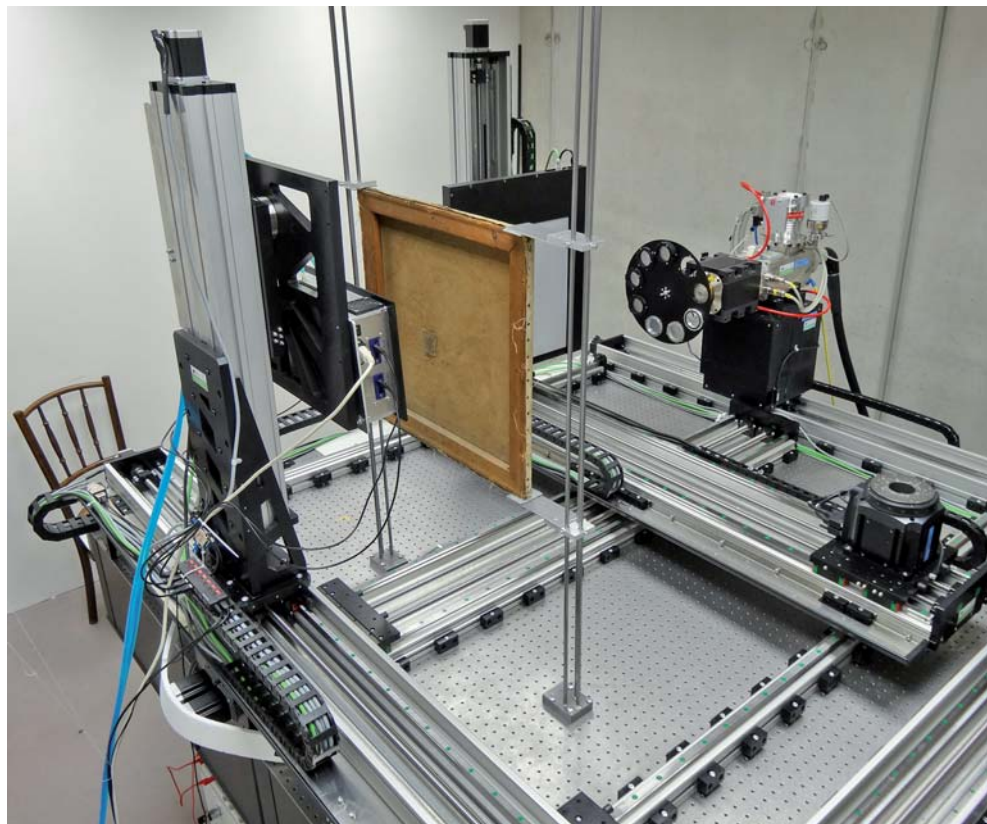


**OBRAZEK 255:** Vlevo je vizualizace kovových spojovacích prvků a fragmentů povrchových vrstev; uprostřed je dřevorezba obarvená dle hustoty materiálu se zvýrazněnými fragmenty polychromie; vpravo nahoře je detail spodní části, dobře viditelný hřebíček a výrazně jiná struktura pravého lýtko – zřejmě doplňování materiálu během pozdějších zásahů; vpravo dole je vodorovný řez podstavy, s patrnými chodbičkami červotoče, uprostřed v levé části „vodorovná“ prasklina, v horní části je další prasklina zasahující ke kraji, červená skvrna vpravo nad středem odpovídá přítomnosti kovových prvků.

*Marie a Proměnění Páně na hoře* z vlastnictví Národního památkového ústavu, Územní památkové správy v Kroměříži, fondu státního zámku Vizovice. Z těchto prací bude citováno v následujícím textu této kapitoly. Cílem rentgenografie byl restaurátorský průzkum zkoumaných děl. Oba obrazy mají rozměr 95 × 64 cm. Pro jejich skenování byl použit velkoplošný pixelový detektor typu Timepix.

Vzhledem k omezené velikosti detektoru byly oba obrazy snímkovány po částech tak, aby se jednotlivé radiogramy mírně překrývaly a ve výsledku pokryly celý obraz. Během měření byl obraz zafixován do statického rámu a skenování bylo zajištěno synchronním pohybem rentgenky a detektoru (viz **obrázek 256**). Rentgenografický systém dovoluje skenování vzorku o rozměrech 140 × 50 cm, a proto bylo v obou případech nutné v polovině měření obrazy otočit o 180 stupňů. Bylo zvoleno minimální možné geometrické zvětšení 1,1×, aby nebylo nutné zvyšovat počet radiogramů.

Jednotlivé rentgenogramy byly měřeny s expoziční dobou 60 s, při napětí rentgenky 90 kV a výkonu na terčiku 5 W. Celá plocha obrazu byla zachycena sérií 54 snímků (9 × 6). Měření včetně všech souvisejících úkonů trvalo 5 hodin. Během zpracování naměřených dat byly snímky sesazeny do jednoho celkového snímku o velikosti 18 400 × 12 000 pixelů (220 Mpx), s rozlišením 50 μm. Výsledný radiogram obrazu *Nanebevzetí Panny Marie* je uveden na **obrázku 257** vlevo nahoře. Při porovnání obrazu ve viditelném světle (**obrázek 257** vpravo nahoře) a v jeho radiografické reprezentaci (**obrázek 257** vlevo nahoře) můžeme



**OBRÁZEK 256:** Fotografie rentgenografického systému laboratoře Centra excelence v Telči, v zobrazovací ose je zleva umístěn velkoplošný pixelový detektor typu Timepix, fixační rám s obrazem a nanofokusová rentgenka s revolverem kalibračních filtrů.

přesně popsat místa poškození malby, přemalby a stav plátěné podložky. Detailnost radiografických informací je dobře patrná ve výřezu (**obrázek 257** dole). Bližší rozbor zjištěných skutečností je uveden v práci Hradilové et al. 2014.

### **Instrumentace laboratoře rentgenografie a tomografie s vysokým rozlišením v Centru excelence Telč**

Rentgenografický/tomografický skener v laboratoři RTG a neutronové tomografie v Centru excelence Telč (CET) kombinuje dvě nezávislé zobrazovací linky v ortogonálním uspořádání. (Fíla et al. 2015) – viz fotografie na **obrázku 258**. Unikátnost skeneru dokladuje udělení evropského patentu (Fíla a Vavřík 2015).

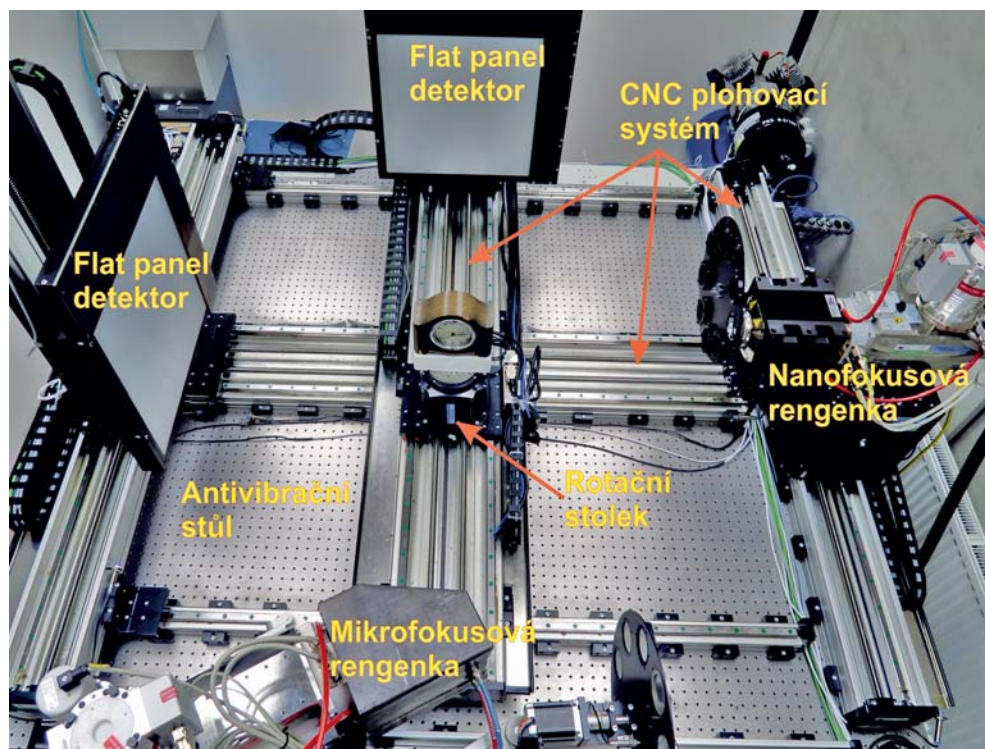
Uspořádání skeneru umožňuje dvojnásobné zrychlení sběru dat pro tomografické rekonstrukce, případně paralelní sběr tomografických dat při dvou různých RTG spektrech současně. Jedna rentgenka má vysoký výkon na terčíku a vysoké maximální urychlovací napětí, přitom relativně malý spot (max. 280 W, 240 kV, spot 4  $\mu\text{m}$  při 20 W), druhá rentgenka má sice nižší výkon, dovoluje ale menší spot (max. 80 W, 160 kV, nejmenší spot 1  $\mu\text{m}$  při 6 W



**OBRÁZEK 257:** Radiografie obrazu Nanebevzetí Panny Marie vlevo nahoře. Fotografie téhož obrazu ve viditelném světle vpravo nahoře (Foto O. Trmalová). Výřez radiogramu s tváří Panny Marie dole.

na terčiku). Pro tomografické a rentgenografické měření je možné vybrat jen jednu zobrazovací linku, pokud je to pro danou úlohu výhodnější.

Skener je standardně vybaven dvěma velkoplošnými detektory typu Flat panel XRD1622 od firmy Perkin Elmer s aktivní plochou  $400 \times 400$  mm, s velikostí pixelů  $200 \mu\text{m}^2$ , 4 Mpx. Rovněž je možné skener alternativně osadit unikátním velkoplošným detektorem typu



OBRÁZEK 258: Fotografie tomografického/rentgenografického skeneru laboratoře Centra excelence v Telči

Timepix (Llopart et al. 2007), s aktivní plochou  $140 \times 140$  mm a velikostí pixelů  $55 \mu\text{m}^2$ , 6.5 Mpx (Jakúbek et al. 2014). Tento detektor počítá jednotlivé fotony a umožňuje vybrat rozsah detekované energie, přitom je citlivý již od velmi nízkých energií RTG fotonů (4 keV). Na pracovišti je dále k dispozici zcela nový modulární spektroskopický detektor typu Timepix s paralelním čtením (Vavřík et al. 2014). Tento detektor se vyznačuje extrémně vysokou rychlostí čtení snímků, kdy je získávána informace o energii každého zaznamenaného fotonu. Díky tomu máme u získaných rentgenogramů i informace o spektru záření, které prošlo zkoumaným objektem.

Skener má plně motorizované osy pro nastavování vzdáleností „rentgenka–vzorek–detektor“, osazené velmi přesným absolutním odměřováním polohy. Osy dovolují plynule měnit projekční zvětšení zhruba od  $1,2\times$  až  $100\times$ . Použité detektory a dostupné projekční zvětšení umožňuje měnit rozlišení CT rekonstrukcí od 0,2 milimetrů až po submikrometrické. Relativně velký rozsah pohybových os dovoluje rentgenograficky skenovat objekty o ploše až  $1 \text{ m}^2$ . Precizní tomografická data jsou získávána také díky motorizovanému stolku na vzduchovém polštáři firmy Aerotech ABRT-150-AS, který má přesnost polohy osy rotace na úrovni  $1,50 \mu\text{m}$ . Velmi vysoká stabilita systému je dosažena díky antivibračnímu stolu, na kterém je celá sestava umístěna. Absolutní odměřování polohy dává zpětnou vazbu o skutečné geometrii ozařování, zároveň umožňuje parametry této geometrie uložit do datového souboru a znovu kdykoliv vyvolat.

## Poděkování

Kapitola vznikla díky projektu „Udržitelný pokročilý rozvoj CET“ LO1219 poskytnutého Ministerstvem školství mládeže a tělovýchovy ČR a projektu NAKI DF12P01OVV048 MK ČR.

## Použitá literatura

- Hradilová, J., O. Trmalová a J. Žemlička. Radiografie maleb s vysokým rozlišení (II): dva protějškové obrazy ze zámecké kaple ve Vizovicích – dva zcela odlišné příběhy. In: *Acta Artis Academica 2014*. Praha: Akademie výtvarných umění, 2014. ISBN 978-80-87108-48-2.
- Fíla, T., I. Kumpová, I. Jandajsek, M. Kloiber, D. Tureček a D. Vavřík. Utilization of dual-source X-ray tomography for reduction of scanning time of wooden samples. *Journal of Instrumentation*. 2015, 10(5), C05008. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/10/05/C05008>
- Fíla, T. a D. Vavřík. *A multi-axial apparatus for carrying out x-ray measurements, particularly computed tomography*. Patent číslo: EP2835631-A1, 2016.
- Llopart, X., R. Ballabriga, M. Campbell, L. Tlustos a W. Wong. Timepix, a 65k programmable pixel readout chip for arrival time, energy and/or photon counting measurements. *Nuclear Instruments and Methods A*. 2007, 581(1-2), 485-494. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2007.08.079>
- Jakůbek, J., M. Jakůbek, M. Platkevič, P. Soukup, D. Tureček, V. Sýkora a D. Vavřík. Large area pixel detector WidePIX with full area sensitivity composed of 100 Timepix assemblies with edgeless sensors. *Journal of Instrumentation*. 2014, 9(4), C04018. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/04/C04018>
- Tureček, D., T. Holý, J. Jakůbek, S. Pospíšil a Z. Vykydal. Pixelman: a multi-platform data acquisition and processing software package for Medipix2, Timepix and Medipix3 detectors. *Journal of Instrumentation*. 2011, 6(1), C01046. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/01/C01046>
- Vavřík, D., M. Holík, J. Jakůbek, M. Jakůbek, V. Kraus, F. Krejčí, P. Soukup, D. Tureček, J. Vacík a J. Žemlička. Modular pixelated detector system with the spectroscopic capability and fast parallel read-out. *Journal of Instrumentation*. 2014, 9(6), C06006. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/9/06/C06006>
- Vavřík, D. a P. Soukup. Metal grain structure resolved with table-top micro-tomographic system. *Journal of Instrumentation*. 2011, 6(11), C11034. <https://doi.org/10.1088/1748-0221/6/11/C11034>
- Žemlička, J., J. Jakůbek, J. Dudák, J. Hradilová a O. Trmalová. Radiografie maleb s vysokým rozlišením (I): testování a měření velkoplošným pixelovým detektorem. In: *Acta Artis Academica 2014*. Praha: Akademie výtvarných umění, 2014. ISBN 978-80-87108-48-2.

## Místo doslovu

Miloš Drdáký

Výsledky výzkumu, uvedené v předchozích kapitolách, jsou jenom částí aktivit a výzkumné kapacity pracovišť Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., v oblasti záchrany, zachování a restaurování památek. Rozsah publikace také neumožnil uvést všechny zajímavé detaily prováděného výzkumu, publikované v řadě úžejí zaměřených monografií. Využijme proto pár závěrečných stránek k prezentaci dalších výzkumných témat a jejich výsledků získaných v terénu a užitečných pro památkovou péči.

Architektonické povrchy památek nejvíce poutají pozornost veřejnosti a často rozhodují o nutnosti opravy, přestože většinou neodrážejí skutečný stav a ohrožení objektu. Posuzování kvality povrchu stavby nebo sochy je obvykle založeno pouze na subjektivním hodnocení více či méně poučeného nebo znalého pozorovatele. Základními parametry takového hodnocení jsou barva a čistota povrchu. Běžně užívané bodové měření barvy má mnoho nevýhod – nezobrazuje reprezentativně vzhled plochy a nedá se spolehlivě a jednoduše použít pro dlouhodobé monitorování. Proto byla v ústavu vyvinuta metoda celoplošného měření vzhledových charakteristik povrchu<sup>1</sup>. Terénní aplikace vyžaduje jednoduché a finančně nenáročné zařízení, které je přenosné a schopné dosáhnout vysokého obrazového rozlišení. Takové požadavky výborně splňují přenosné skenery. Typické nejvyšší skenovací rozlišení 600 dpi přibližně představuje 20 pixelů na milimetr, neboli jeden obrazový bod představuje 50 mikrometrů. Při skenované ploše 18 × 13 cm<sup>2</sup> tak můžeme získat obrázky o velikosti cca 10 megapixelů. Skenování zaručuje vždy stejné zvětšení a uvážíme-li ještě stabilitu osvětlení, předčí přenosný skener (**obr. 259**) fotografii, která je nevhodná pro účely měření, neboť je citlivá na změnu podmínek osvětlení, daných počasím.

Přenosným skenerem je možno měřit spolehlivě vizuální vlastnosti povrchu a parametry jejich statistického rozdělení za předpokladu kalibrace obrazu ustavením nejvyšší a nejnižší úrovně intenzity pomocí černého a bílého referenčního rámečku přítomného v každém skenovaném obrazu. Vlastní měření je pak velmi jednoduché a nepoškozuje památku: na příměně plochý povrch zkoumaného objektu přiložíme skener (po odstranění jeho horního krytu).

---

<sup>1</sup> Valach, J., Bryscejn, J., Drdáký, M., Slížková, Z., Vavřík, D. (2006). Public perception and optical characterization of degraded historic stone and mortar surfaces. In: Fort, Alvarez de Buergo, Gomez-Heras, Vazquez-Calvo (eds). *Proceedings "Heritage, Weathering and Conservation"*, Taylor & Francis Group, London, pp. 827–832. ISBN 0-415-41272-2.

Valach, J., Drdáký, M. F. (2008). An effective method for monitoring and optical characterization of degraded historic stone and mortar surfaces. In: Tiano, P., Pardini, C. (eds). *Proceedings of the International Workshop "In Situ Monitoring of Monumental Surfaces"*, Edifir – Edizioni Firenze, ICVBC Florence, pp. 37–44. ISBN 978-88-7970-390-1.



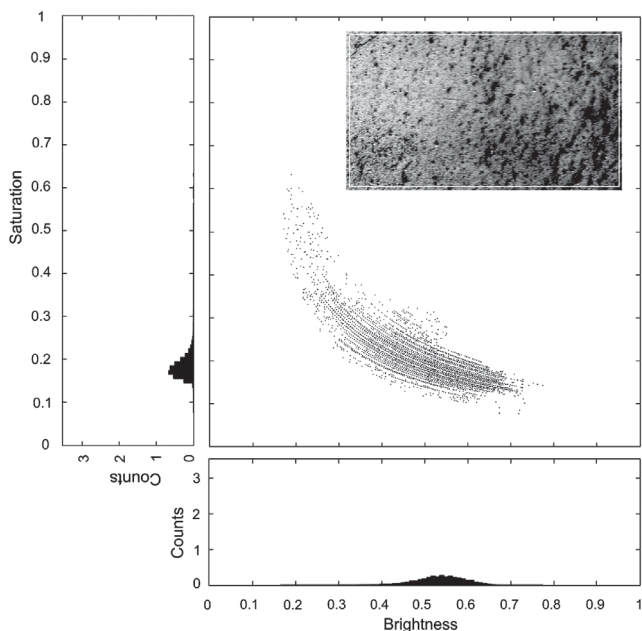


**OBRÁZEK 259:** Přenosný skener pro měření barevnosti a znečištění povrchu (Foto J. Valach)

Skenování se spustí tlačítkem a po jeho ukončení je obraz uložen do paměťové karty nebo mohou být data posílána přes USB přímo do notebooku. Data jsou pak zpracována a analyzována pomocí vlastního programu v prostředí MATLAB.

Vlastnosti barvy lze popsat různými modely barevnosti. Digitální optické přístroje používají tzv. RGB (red, green, blue) model pro záznam obrazů, nicméně model HSL (hue, saturation, luminance) lépe vyhovuje pro popis změn spojených s degradací povrchu a tak musí být provedena transformace získaných dat známou procedurou<sup>1</sup>, případně může být souhrnná změna charakterizovaná veličinou  $\Delta E$ , často využívanou v kolorimetrii. Degradací procesy na památkách jsou vždy doprovázeny změnami jejich vzhledu. Znečištění povrchu se většinou projevuje ztmavnutím a ztrátou barevnosti. Tyto vizuální změny můžeme technicky přesněji popsat pomocí jasů a sytosti barvy. Jas je dán mírou světla odraženého od povrchu, čím je povrch jasnější, tím vyšší je hodnota jasů. Dva mezní stavy – černá a bílá jsou dány hodnotami 0 a 1. Sytost je mírou čistoty barvy – na jedné straně stupnice jsou čisté barvy duhy a na druhém konci barvy s příměsí černé, bílé nebo jejich kombinace, tedy šedé. Skutečnost, že je možno hodnotit kvalitu povrchu nezávisle na podmínkách osvětlení, ukazuje, že změna jasů a sytosti jsou vlastnosti popisující vizuální stav povrchu s nejvyšší vypovídací hodnotou. Jednotlivé pixely obrazu skenované plochy jsou pak statisticky zpracovány a získané střední hodnoty a směrodatné odchylky jasů a sytosti jsou dále užívány pro analýzu optických vlastností povrchu. Střední hodnoty reprezentují polohu těžiště všech bodů na osách pro jas a sytost. Představená metoda umožňuje analyzovat statistické rozdělení těchto vlastností a kvantitativně ukázat, co znamená „nerovnoměrně degradovaný povrch“. Posun středních hodnot výše zmíněných dvou proměnných citlivě ukazuje zhoršení povrchové degradace, nebo naopak může být použit pro hodnocení efektivity čištění povrchu. Vlastnosti statistického rozdělení mohou být vizualizovány graficky v souřadnicích sytosti a jasů, kde je každému pixelu studovaného obrazu přiřazen bod o jeho souřadnicích jasů a sytosti. Projekce

<sup>1</sup> Lebrun, V., Toussiant, C., Pirard, E. (2004). Monitoring color alternation of ornamental flagstones using digital image analysis. In: Příkrýl (ed.). *Dimension Stone*, Taylor and Francis, London, pp. 139–146.



**OBRAZEK 260:** Typický graf závislosti jasu a sytosti pro znečištěný povrch (Foto J. Valach)

těchto bodů vytvoří „oblak“, jehož rozptýl a tvar jsou užitečnými mírami povrchové degradace (**obr. 260**). Kompaktní a symetrický oblak představuje rovnoměrný vzhled, zatímco rozptýlený signalizuje proměnnost, typickou pro znečištěný povrch.

Častým problémem v památkové péči je i obava z poškozujícího účinku dynamického zatěžování památky nebo studium její dynamické odezvy na okolní vzruchy. Objektivní posouzení vyžaduje provést řadu měření přímo na památce v terénu. V odůvodněných případech, zejména při nebezpečí vzniku únavového poškození, musí být památka sledována dlouhodobě za pomoci osazených snímačů pro kontinuální měření nebo periodickými inspekcemi dynamické odezvy. I při dlouhodobém monitoringu nejsou sbírána a archivována data o kmitání objektu nepřetržitě. Moderní měřicí ústředny a záznamová zařízení umožňují zahájit sběr dat jen při překročení volitelné prahové hodnoty, např. při překročení určité meze měřeného průhybu. Typickými adepty potřeby dynamické analýzy jsou dřevěné stropy na větší rozpětí, štíhlé vysoké stavby nebo jejich části, jako jsou věže, štítové zdi a zejména tzv. morové nebo mariánské sloupy. Pro měření charakteristik kmitavého pohybu se využívají snímače zrychlení, případně optické systémy pro měření rychlostí a vytváření map kmitání, např. již uvedené výsledky na **obr. 190** a **191** na str. 234 a 235.

Zajímavé analýzy byly prováděny při restaurování jezdecké sochy Jana Žižky na Vítkově, kde je ocas koně spojen s tělem subtilním spojem, a tudíž tvoří konzolu náchylnou ke kmitání. Jednou z veličin charakterizujících technický stav konstrukce jsou její vlastní frekvence, které jsou poměrně snadno a přesně na skutečném díle měřitelné. Při dlouhodobém monitoringu změna frekvence signalizuje rozvíjející se poruchu, změnu tuhosti nějakým vnějším zásahem nebo změnu materiálových vlastností. Změnou tuhosti je možno řešit



**OBRÁZEK 261:** Umístění snímačů kmitání v úrovni hlavice sloupu (vlevo) a na dřívku (vpravo)

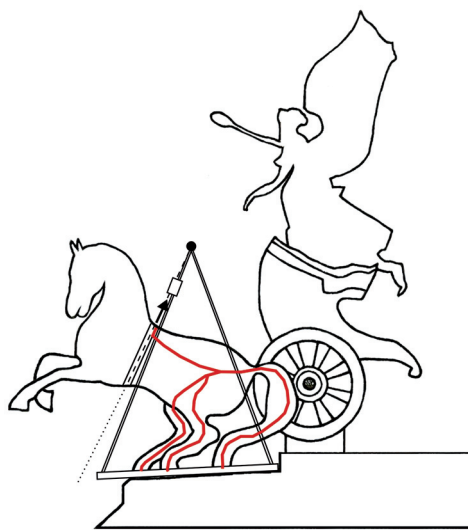
problémy s nadměrnými výchylkami. Příkladem na památce je kotvení vysokého zděného štítu kostela sv. Petra a Pavla na Vyšehradě.<sup>1</sup>

Lidské smysly jsou na kmitání citlivé, ale velikost výchylky kmitání je velmi obtížné správně odhadnout. Vznikají tak představy, které většinou oproti realitě odezvu zveličují. Takovým příkladem byla dynamická odezva mariánského sloupu v Letohradu, kde měli restaurátor i přivolaný statik pocit, že je sloup po výšce ve spárách oddělen a že dochází k nebezpečným výchylkám. Dynamické charakteristiky byly standardně zjištěny zkouškou (**obr. 261**), která prokázala, že při kmitání se vlastní sloup chová jako celistvé nepoškozené těleso. Během zkoušky nebyla pozorována aktivní trhlinka v úrovni nasazení patky či v úrovni spínací obruče ve spodní části sloupu. Z průběhu záznamů je vidět, že sloup pružně kmitá ve stejném směru, jako je rozkmitávající silové působení jak u patky sloupu, tak i vnitřního zděného jádra podstavce sloupu. Nicméně rozkmit spodní části sloupu je několikanásobně menší než rozkmit sloupu u hlavice, který sice dosahoval maximálních hodnot výchylky jenom okolo 0,8–1 mm, ale subjektivně byl vnímán jako nebezpečný pro stabilitu sloupu.

Další poznámka představuje oblast výzkumu mechanického chování historických konstrukcí. Zde je cílem zjistit jejich chování při zatížení, bezpečnost, spolehlivost, případně zbytkovou životnost. Zatěžovací zkoušky historických konstrukcí většinou nemohou používat standardní postupy obvyklé při zatěžovacích zkouškách stavebních konstrukcí. Důvody mohou být různé – tvar historické konstrukce, její dostupnost i účel zkoušky.

Příkladem zvláštní zatěžovací zkoušky byla studie spolupůsobení bronzového pláště sousoší trig na střeše Národního divadla s jejich výztužnou železnou kotrrou pro přípravu jejich restaurování (**obr. 262**). Zkoumaný objekt byl zřejmě nepřemístitelný, musel tedy být zatěžován na místě. Úkol vyžadoval měření poměrných deformací na povrchu zkoumaných konstrukcí a měření složek průhybu sochy koně při statickém zatěžování, doplněné o měření kmitání při dynamickém zatěžování. Zkoumaná socha koně působí staticky jako konzola složitého tvaru, vetknutá do střešní konstrukce třemi podporami: dvěma zadními nohama a ocasem. Hruď, hlava a přední nohy ční volně do prostoru. Celkový pohled

<sup>1</sup> Fischer, O., Urushadze, S. (2004). Účinek pohybu zvonů na štítovou zeď z kamenného zdiva. In: Králík, J. (ed.). Proc. 3rd international conference on New trends in statics and dynamics of buildings, Slovak University of Technology in Bratislava, October 21–22, 2004 Bratislava, pp. 9–12. ISBN 80-227-2116-6.

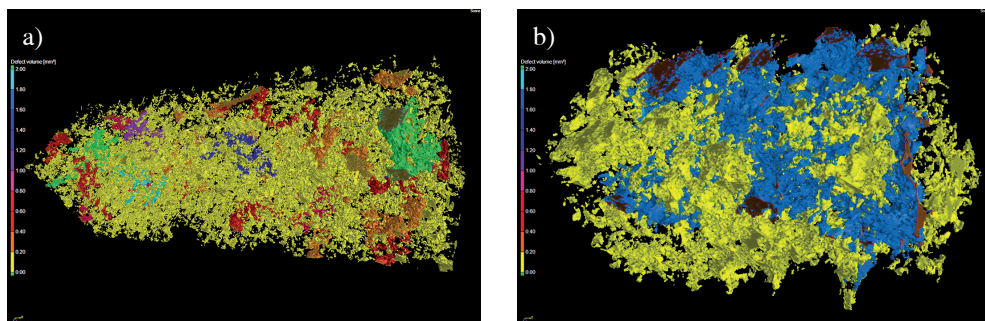


**OBRÁZEK 262:** Podpůrný rám a zavěšení sochy koně pomocí popruhů pro zatížení nadlehčováním (Foto Sh. Urushadze)

na koně je uveden na **obr. 262**. Nohy a ocas jsou tvořeny dutými tenkostěnnými bronzovými profily nepravidelného průřezu a nepravidelné tloušťky, stejně tak tělo je staticky spíše krátkým tenkostěnným dutým prutem než skořepinou. Prostorová tuhost bronzového pláště velmi nepravidelně proměnné tloušťky je značná a jeho napjatost lze odhadnout jenom přibližně. Vzhledem k nedostatku prostoru pro umístění těžkého zatěžovacího rámu bylo navrženo zatížení nadlehčením koně, což výhodně využívalo již vybudovanou závěsnou konstrukci pro restaurování (**obr. 262**) a bylo přijatelné pro posouzení poměru spolupůsobení ocelové kostry a bronzového pláště.

Z naměřených výsledků bylo na první pohled patrné, že bronzový plášť významně spolupůsobí při přenosu vlastní tíhy sochy do podpory. Při odlehčování byla v plášti naměřena vyšší napětí a průřezové plochy profilů jsou většinou rovněž větší v plášti než v ocelové kostře, kromě profilu nad kopytem, kde bronz těsně obmyká ocelový profil. Podle chování konstrukce bylo odhadnuto, že bronzový plášť může přenášet cca 75 % vlastní tíhy sochy do podpory v převážně tlačných a ohýbaných prvcích (nohy). Naměřené hodnoty dynamické odezvy pro běžné provozní podmínky (automobilový a tramvajový provoz) ukazují, že nedochází k takovému kmitání objektu, které by mohlo nepříznivě ovlivnit sousoší trig. Hodnoty naměřených hodnot odezvy jsou nepatrné. Nicméně při větrném počasí může dojít k rozkmitání soch. Vyvolané výchylky ve vodorovném směru kolmém na osu koně pak mohou být výrazně vyšší než účinky dopravy.

Výzkumná infrastruktura ÚTAM a jeho pracovišť v Praze a Telči umožňují řešení mnoha dalších typů výzkumných úloh spojených se záchranou, zachováním a využíváním kulturního dědictví. Řada experimentálních zařízení je světovými unikáty, které umožňují měření a výzkum jinde nedosažitelný. Jako poslední poznámku uvedme možnosti pohledu do struktury historických nebo opravných materiálů. Pro restaurování porézních hmot je základní potřebou znalost prostorové pórové struktury. Jedná se o velmi složitou úlohu, kterou lze



**OBRAZEK 263:** Počítačová mikrotomografie: a) rekonstruovaný prostor mezi zrna zasolené malty; b) pohled na vzorek odsolovací malty (Obrázky M. Vopálenský)

uspokojivě řešit jenom kombinací několika metod. Významnou roli zde hraje počítačová rentgenová mikrotomografie, představená v poslední kapitole této knihy. Vzhledem k tomu, že se jedná o bezkontaktní a tudíž i nedestruktivní metodu, dá se použít pro zobrazení pórové struktury i velmi křehkých nebo poddajných materiálů. **Obrázek 263a** ukazuje volný prostor mezi zrna zasolené omítky, **obr. 263b** póry odsolovací malty, vše ve 3D zobrazení.

Uvedené příklady jsou jenom zlomkem možností současných moderně vybavených laboratoří pro památkové vědy. Jednou z nich je i Centrum excelence v Telči, vybudované s podporou Evropského fondu regionálního rozvoje a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR. Jeho předností je existence vysoce výkonné výzkumné infrastruktury pro výzkum interdisciplinárních problémů kulturního dědictví pod jednou střechou. Autoři této knihy vědy pro památky neustále dále rozvíjejí a jsou připraveni k široké národní i mezinárodní spolupráci. Uvítají s radostí kritické připomínky i náměty na nová výzkumná témata.

## Autoři

### Ing. Pavel Beneš

Absolvoval obor matematického inženýrství na Fakultě jaderného a fyzikálního inženýrství ČVUT v Praze. Pavel Beneš se věnuje modelování problémů z oblasti stavební mechaniky a mechaniky kontinua. Jedná se zejména o transport vlhkosti porézním prostředím a o mechaniku lomu v nekovových materiálech.

### Ing. Pavel Beran, Ph.D.

Magisterské studium na Fakultě stavební ČVUT ukončil v roce 2005, v diplomové práci se zabýval teplotními účinky na katedrálu sv. Víta v Praze. V roce 2012 dokončil doktorské studium na Fakultě stavební ČVUT v Praze, tématem disertační práce byl vliv teploty na historické konstrukce. V roce 2007 absolvoval čtyřměsíční stáž na Helsink University of Technology ve Finsku a v roce 2009 absolvoval tříměsíční stáž na Pennsylvania State University, USA. Zaměřuje se na analýzu teplotních vlivů na stavební konstrukce a materiály. V současné době pracuje jako vědecký pracovník Laboratoře pro mechanické analýzy a monitoring materiálů a konstrukcí ÚTAM AV ČR, v. v. i., Centrum excelence Telč, kde se věnuje převážně studiu degradace povrchových vrstev materiálů historických konstrukcí.

### Ing. Riccardo Cacciotti, MSc

Ukončil studium v roce 2007 na katedře stavebního a environmentálního inženýrství na University College Cork, v Corku, Irsko. V roce 2008 získal titul MSc v „Rozvoj a plánování měst a budov“ na Ústavu plánování a rozvoje, University College London. V roce 2010 obdržel titul „advanced MSc“ v oboru Konstrukční analýza památek a historických konstrukcí „SAHC“ ČVUT v Praze. Jeho dřívější odborné zkušenosti zahrnují odborné poradenství v konzervátorské činnosti v Irsku a Londýně. V současné době se zabývá výzkumem zaměřeným na znalostní hodnocení poškození památek a zejména pak diagnostikou a mechanismy poškození ve zdivu. Dokončuje doktorské studium na Stavební fakultě ČVUT.

### Ing. Martin Čerňanský, Ph.D.

Martin Čerňanský absolvoval magisterské i doktorské studium na Fakultě stavební ČVUT v Praze v oboru pozemní stavby. Po praxi v architektonických i projektových ateliérech nastoupil na generální ředitelství NPÚ. Od roku 2007 je členem Českého národního komitétu ICOMOS, od roku 2009 členem ISC CIAV, Mezinárodní vědecké rady ICOMOS pro lidovou architekturu. Kromě statutární odborné činnosti vypracovává oponentní posudky a překlady mezinárodních dokumentů k uvedené problematice a připravuje externí přednášky pro studenty VŠ (ČVUT, ČZU). V rámci vědecko-výzkumné činnosti se věnuje problematice pohyb a poškození nemovitých památek.

### **Prof. Ing. Miloš Drdácký, DrSc., dr. h. c.**

Vystudoval Fakultu stavební ČVUT v Praze, aspiranturu absolvoval v ČSAV, habilitoval se na VUT v Brně, na ČVUT v Praze obhájil DrSc. v oboru Teorie konstrukcí a byl zde jmenován i profesorem. Je světově uznávaným vědcem v oboru teorie konstrukcí, zejména v oblasti historických materiálů a konstrukcí a experimentální mechaniky. Od roku 1998 je ředitelem ÚTAM AV ČR, kde je i vědeckým garantem nově vybudovaného Evropského centra excelence Telč. Celoživotní pedagogická činnost zahrnuje zejména působení na ČVUT Praha, TU Liberec, VŠUP Praha, dále pak v zahraničí na magisterských nebo doktorských programech UPC v Barceloně, UNIPD v Padově, UMinho v Portugalsku (Guimarães), Universitním centru v Ravello, na Corvinus University ISES v Köszegu v Maďarsku, na Dunajské univerzitě v Krems. Je členem redakčních rad několika zahraničních časopisů a členem řady mezinárodních profesních organizací, kde pracuje v několika vědeckých výborech (RILEM a ICOMOS). Je předsedou Rady ministra kultury ČR pro výzkum a českým reprezentantem pro Joint Programming Initiative v oblasti priority výzkumu kulturního dědictví. Výsledky práce na domácích (23) i zahraničních (23) grantových projektech publikoval ve více než 470 člancích, vydal 26 knih a sborníků mezinárodních konferencí, je držitelem několika patentů a užitných vzorů.

### **Mgr. art. Jakub Ďoubal, Ph.D.**

Vystudoval restaurování na Institutu restaurování a konzervačních technik v Litomyšli a Vysoké škole výtvarných umění v Bratislavě. V roce 2011 absolvoval v Římě kurz pro profesionály v oboru restaurování kamene Stone Conservation, pořádaný organizacemi ICCROM a The Getty Conservation Institute. V roce 2013 dokončil doktorské studium na Fakultě stavební ČVUT v oboru Fyzikální a materiálové inženýrství. Je vedoucím ateliéru restaurování kamene a souvisejících materiálů na Fakultě restaurování Univerzity Pardubice.

### **Mgr. Dita Frankeová**

Vystudovala Přírodovědeckou fakultu Univerzity Karlovy v Praze (1992), nyní se věnuje doktorskému studiu na Kloknerově ústavu ČVUT v oboru Nauka o nekovových materiálech a stavebních hmotách. Od roku 2008 pracuje jako vedoucí Laboratoře partikulárních látek ÚTAM AV ČR na evropských i národních projektech zaměřených na výzkum v oblasti ochrany stavebních památek. D. Frankeová se věnuje především studiu chemicko-mineralogického složení stavebních materiálů. Dále se podílí na vývoji optimálního konsolidačního postupu pro vápenné omítky a různé druhy kamene při použití tradičních i nových zpevňovacích prostředků.

### **Mgr. Petr Gláser**

Absolvoval Institut restaurování a konzervačních technik v Litomyšli, obor restaurování a konzervace kamene a souvisejících materiálů a Univerzitu Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem, obor stavební historie. Od roku 2002 se samostatně věnuje restaurátorské praxi. Dlouhodobě spolupracuje s Národním památkovým ústavem a Fakultou restaurování Univerzity Pardubice. Od roku 2013 působí také v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR.

### **Ing. Hana Hasníková**

Vystudovala Fakultu stavební ČVUT v Praze, obor Konstrukce a pozemní stavby. Na katedře ocelových a dřevěných konstrukcí pokračuje v doktorském studiu, které je zaměřeno na nedestruktivní testování konstrukčního dřeva. V ÚTAM AV ČR, v. v. i., působí od roku 2011 a podílela se na výzkumu vlastností přírodního kamene i vývoji nových metod k jejich měření. Dále se podílela na vývoji metodiky návrhu celodřevěných spojů.

### **Bc. Jan Chlád**

Vystudoval Fakultu stavební ČVUT v Praze, obor ekonomika a řízení ve stavebnictví. Na Masarykově ústavu vyšších studií pokračuje v magisterském studiu, které je zaměřeno na Podnikání a management v průmyslu. V ÚTAM AV ČR, v. v. i., pracuje od roku 2012.

### **Ing. Karel Juliš**

Dlouhodobě se zabývá vývojem speciální elektroniky, mimo jiné i zařízením pro telemetrické sledování technických procesů a fyzikálních dějů pro průmyslové i vědecké účely. Dále pak problematikou interoperability systémů, čidel a akčních členů v hybridním a víceprocesorovém prostředí, sběrem a vyhodnocováním dat v takovýchto prostředích a v neposlední řadě i diagnostikou a optimalizací chodu takovýchto sestav jako celku. Vytvořil řadu originálních, pro specializované užití navržených zařízení pro získávání, přenos a záznam parametrů a jejich počítačem podporované vyhodnocení a prezentaci.

### **Ing. Petr Justa**

Absolvoval VŠCHT v Praze v roce 1981 na Ústavu chemické technologie restaurování památek se specializací restaurování kamene. Postgraduální studia zahrnovaly pobyty v Itálii (ICCROM), Velké Británii (University of London) a Japonsku (TNRCIP Tokyo). Do roku 1992 pracoval ve Středočeském muzeu v Rostkách jako vedoucí Konzervačních laboratoří a Konzervačního ozařovacího pracoviště. Od roku 1992 jako samostatný restaurátor a technolog v oboru restaurování kamene a štuku s licenci MKČR. Spolupracuje na výzkumných a restaurátorských projektech EU, WMF, US Government, MZV ČR, MKČR a dalších, specializuje se na restaurátorské projekty pod hlavičkou UNESCO na Středním východě. Je členem ICOM, ICOMOS, APT, WTA-CZ.

### **Ing. Michal Kloiber, Ph.D.**

Výzkumný pracovník Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., CET Telč, který se dlouhodobě zabývá poruchami, preventivní péčí a ochranou stavebních konstrukcí, hodnocením rozsahu poškození dřevěných konstrukcí, diagnostikou mechanických vlastností dřeva a návrhy oprav zabudovaného dřeva ve stavebních konstrukcích. Disertační práci na téma „Nedestruktivní zjišťování vlastností dřeva“ obhájil v roce 2008 na Lesnické a dřevařské fakultě Mendelovy univerzity v Brně. Je autorem nebo spoluautorem více než 100 publikovaných výsledků aplikovaného nebo základního výzkumu, držitelem dvou patentů v oblasti nedestruktivního zkoušení dřeva. V posledních 10 letech dále provedl více než 100 stavebně-technických průzkumů dřevěných konstrukcí. V CET vede Laboratoř pro mobilní diagnostiku a výzkum dřeva.



### **Doc. Ing. Zdeněk Kouba, CSc.**

Zdeněk Kouba v roce 1983 dokončil studium oboru technická kybernetika na Fakultě elektrotechnické Českého vysokého učení technického v Praze. Po absolvování vědecké aspirantury ve Středisku výpočetní techniky Československé akademie věd a na Fakultě elektrotechnické Českého vysokého učení technického obhájil v roce 1991 disertační práci a získal vědeckou hodnost kandidáta technických věd v oboru technická kybernetika. V roce 2003 obhájil habilitační práci a byl jmenován docentem pro obor technická kybernetika. Mezi jeho odborné zájmy patří zejména návrh složitých informačních systémů a technologie sémantického webu.

### **Ing. Jiří Kunecký, Ph.D.**

Vystudoval Dopravní fakultu ČVUT v Praze, kde se specializoval na studium poréznych materiálů zejména pro dopravní použití. Doktorát získal na katedře mechaniky a materiálů disertační prací na téma „Numerická a experimentální analýza ochranných sportovních přileb“. Dlouhodobě se specializuje na numerické modelování a pokročilé, zejména optické experimentální metody. V letech 2012–2015 byl odpovědným řešitelem projektu výzkumu chování tesařských celodřevěných spojů a spoluautorem metodiky jejich navrhování. V ÚTAM AV ČR, v. v. i., působí od roku 2003 – nejprve v oddělení biomechaniky, nyní v oddělení partikulárních látek.

### **Prom. fyz. Jaroslav Lesák**

Vystudoval Matematicko-fyzikální fakultu UK v Praze, obor fyzika se specializací elektronika. Po studiích pracoval rok na fakultě a později ve Výzkumném ústavu zemědělské ekonomiky, kde se zabýval plánováním a vyhodnocováním experimentů. V dalších letech pracoval ve vývojovém oddělení podniku INOVA Praha, kde řešil programování řídicí elektroniky pro hydraulické stroje pro únavové zkoušky materiálů a konstrukčních celků. Od roku 1989 působí v ÚTAM AV ČR, v. v. i., kde spolupracoval na řadě složitých laboratorních i terénních experimentů. Je zapojen do vývoje a rozvoje speciálních experimentálních metod diagnostiky stavebních materiálů a konstrukcí.

### **Ing. Štěpán Major**

Absolvoval obor Fyzikální inženýrství na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Věnuje se vývoji zařízení na zkoušení stavebních materiálů. Další oblastí jeho činnosti je studium vlivu povrchových úprav na únavovou životnost kovů a některých problémů medicínského inženýrství, jako jsou např. páteřní implantáty.

### **Mgr. Cristiana Lara Paulos Nunes**

Pracuje v ÚTAM AV ČR, v. v. i., od roku 2011 na výzkumu vlastností vápenných a vápeno-metakaolinových malt s přísadou lněného oleje. Je absolventkou Technické univerzity v Lisabonu (2008) a oboru Restaurování a konzervování stavebních památek na Nové universitě v Lisabonu (2004). Praxi získala pod vedením Dr. J. Delgado Rodriguese ve výzkumu v National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) v Lisabonu a jako koordinátorka několika konzervačních projektů v Portugalsku. Dokončuje doktorské studium na FSv ČVUT v Praze, kde se v disertační práci zaměřuje na studium degradačních procesů a konzervačních postupů porézních materiálů.

### **Doc. Ing. Stanislav Pospíšil, Ph.D.**

Vystudoval Fakultu stavební ČVUT v Praze. V roce 1994 až 1995 působil jako odborný asistent na katedře konstrukcí pozemních staveb Fsv, ČVUT, od roku 2001 vyučuje dynamiku stavebních konstrukcí na katedře stavební mechaniky, FAST, VŠB TU Ostrava, jako externí přednášející. Dále je přednášejícím v programu Advanced Masters in Structural Analysis of Monuments and Historical Constructions na Fsv ČVUT Praha a na UPC v Barceloně. V rámci svého odborného zaměření na dynamiku a stochastickou mechaniku se orientuje zejména na obory větrného inženýrství a stavební aerodynamiky a aeroelasticity. Byl řešitelem či spoluřešitelem 8 grantových úkolů, 2 rezortních projektů (MD a MPO), dále 5 zahraničních projektů EU. Je členem České společnosti pro mechaniku a předsedou vědecké společnosti „Větrné inženýrství“, členem a zástupcem za ČR v IAWE (International Association for Wind Engineering) a členem IAAS Working Group for Mast and Towers. Od roku 2004 je zástupcem ředitele ÚTAM a od roku 2009 předsedou rady pracoviště ÚTAM. Stanislav Pospíšil je autorem nebo spoluautorem více než 110 odborných publikací a dvou učebních textů, jednoho zahraničního (TU Delft). V CET garantuje výzkum v klimatickém větrném tunelu „Vincenc Strouhal“.

### **Ing. Zuzana Slížková, Ph.D.**

Vystudovala VŠCHT na Ústavu chemické technologie restaurování památek (1985) a později obhájila doktorát v oboru Materiálové inženýrství na ČVUT FSv (2007). V diplomové i disertační práci se věnovala metodám konzervace porézních stavebních historických materiálů, zejména tématu zpevňování omítek a kamene. Praxi získala ve výzkumné oblasti i při realizacích oprav historických staveb na řadě pracovišť (Pražská stavební obnova, Státní restaurátorské ateliéry, Národní památkový ústav, Aqua obnova staveb, s. r. o.). Od roku 2003 pracuje v ÚTAM AV ČR, v. v. i., na evropských i národních projektech zaměřených na výzkum v oblasti konzervace stavebních památek. Zabývá se především metodikou materiálových analýz a konsolidací stavebních materiálů. Přednáší na FSv ČVUT, na Univerzitě v Padově a na Univerzitě Minho v Portugalsku v mezinárodním magisterském studiu SAHC (Erasmus Mundus). V ÚTAM vede oddělení partikulárních látek a v CET Telč je garantkou materiálového a konzervačního výzkumu pro záchranu a zachování kulturního dědictví.

### **Ing. Jan Tippner, Ph.D.**

Akademický pracovník Ústavu nauky o dřevě, Lesnické a dřevařské fakulty, Mendelovy univerzity v Brně, kde působí jako výzkumník a pedagog. Zabývá se fyzikálními a mechanickými vlastnostmi dřeva a materiálů na bázi dřeva „od stromu po výrobek“, zejména metodami hodnocení vlastností a kvality materiálu. Zaměřuje se na vibro-akustické metody a využití numerických simulačních metod pro popis odezvy materiálu. V této oblasti je autorem či spoluautorem publikací ve vědeckých časopisech či příspěvků na konferencích, užitečných vzorů a patentů, garantuje výuku několika předmětů a vede závěrečné práce studentů.

### **Ing. Renata Tišlová, Ph.D.**

V roce 2006 ukončila mezinárodní doktorské studium na Polskiej Akademii Nauk, Instytutu Katalizy i Fizykochemii Powierzchni v polském Krakovic. Od té doby působí jako odborná asistentka na katedře chemické technologie Fakulty restaurování Univerzity Pardubice. V oboru ochrany památek se zabývá zejména výzkumem anorganických porézních materiálů, tj. historických malt, omítek, štuků a hornin. V této souvislosti také systematicky provádí výzkum na jejich ochranu – testuje nové i tradiční materiály a postupy pro jejich restaurování. Dlouhodobě se zabývá studiem tradičních i novodobých pojiv historických malt, výzkumem a replikami tradičních štukových receptur od renesance do počátku 20. století. V oblasti restaurování kamene se zaměřuje na hodnocení účinku nových a tradičních materiálů a postupů aplikovaných v různé fázi obnovy, zejména konsolidace nebo doplnění umělým kamenem.

### **Ing. Jaroslav Valach, Ph.D.**

Jaroslav Valach dokončil doktorské studium na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské ČVUT v roce 2003 v oboru fyzikální inženýrství. Od roku 1993 pracuje v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd ČR, kde se zabývá především vývojem speciálních optických metod pro experimentální mechaniku. Současně se věnuje i metodám detekce poškození a monitorování stavu historických konstrukcí a materiálů a také informačním technologiím pro dokumentaci poruch a vad v objektech kulturního dědictví. Spolupracoval na řadě grantových projektů včetně mezinárodních (např. HISTOCLEAN, CULTSTRAT, CHEF). Je vedoucím Laboratoře optických metod.

### **Ing. Jan Válek, Ph.D.**

Stavební inženýr v oboru architektura a stavitelství. V současnosti vědecký pracovník a vedoucí Centra vápenných technologií, Centrum excelence Telč. Zabývá se výzkumem historických stavebních materiálů, konstrukcí a technologií. Kromě základního výzkumu se zaměřuje i na aplikaci znalostí zejména v oblasti památkové péče. Spolupracoval na mezinárodních výzkumných projektech ONSITEFORMASONRY, CHIC a je aktivním členem technického výboru organizace RILEM. Přednáší pro studenty evropského magisterského studia SAHC Erasmus Mundus na ČVUT FS.

### **Ing. Daniel Vavřík, Ph.D.**

Absolvoval Fakultu strojní Technické univerzity v Liberci, poté Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou Českého vysokého učení technického v Praze, doktorské studium završil tamtéž (obor materiálové inženýrství). Věnuje se vývoji a aplikaci různých optických a rentgenografických experimentálních metod a související instrumentace, zaměřených na mechaniku kontinua, lomovou mechaniku a defektoskopii. Podííl se na různých projektech z oblasti nelineární lomové mechaniky, biomechaniky a záchraný kulturního dědictví. Je autorem a spoluautorem řady odborných publikací a několika patentů. Spolupracuje s Ústavem technické a experimentální fyziky ČVUT v Praze. Je vedoucím oddělení mechaniky kontinua ÚTAM AV ČR, v. v. i., a vědeckým garantem výzkumu v Laboratoři RTG a neutronové tomografie Centra excellence Telč.

### **Mgr. art. Jan Vojtěchovský**

Působí jako vedoucí ateliéru Restaurování a konzervace nástěnné malby a sgrafita na Fakultě restaurování Univerzity Pardubice. Jako pedagog a vědecký pracovník se zabývá především oblastmi restaurování a materiálového zkoumání nástěnných maleb a povrchů architektury či jejich historických technik a technologií. Jako praktikující restaurátor se věnuje kromě uvedených oblastí i restaurování závěsného obrazu. Dokončuje doktorské studium na Fakultě stavební ČVUT v oboru Fyzikální a materiálové inženýrství.

### **Benjamin Wolf**

Zabývá se návrhem, vývojem a realizací kompaktních či přenosných měřicích zařízení určených především pro dlouhodobá měření a záznam neelektrických veličin. Má rozsáhlé zkušenosti s vývojem a instalací zařízení pro měření veličin, jako jsou tlak, teplota, vlhkost, síla, poloha a otřesy a také v oblasti regulace, pohonů a bezdrátového připojení. Navrhuje řešení obvodů, plošné spoje, prototypovou výrobu a programuje firmware pro vyráběná zařízení.

### **Ing. Pavel Zíma**

Vystudoval Elektrotechnickou fakultu ČVUT v Praze, obor Měření a automatizace. Po studiu pracoval 13 let ve vývojovém oddělení podniku INOVA Praha, kde se podílel na vývoji řídicí elektroniky pro hydraulické stroje pro únavové zkoušky materiálů a konstrukčních celků. V dalších letech se podílel na vývoji a výrobě měřicích zařízení pro stavební geologii a stavební firmy. Od roku 1999 spolupracuje s firmou GTM Praha, s.r.o., na elektromontážích strojů pro kalibraci tenzometrických siloměrů. Od roku 2001 působí v ÚTAM AV ČR, v. v. i., kde se podílel na praktické realizaci měření při experimentech v laboratoři a na stavebních objektech v terénu. Spolupracuje také na vývoji měřicích metod při diagnostice stavebních materiálů.

## **Ing. Jan Žemlička**

Absolvoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou Českého vysokého učení technického v Praze (obor Dozimetrie a aplikace ionizujícího záření). Věnuje se především aplikacím polovodičových pixelových detektorů z rodiny Medipix pro zobrazovací metody využívající ionizující záření. Svou disertační práci připravuje na Ústavu technické a experimentální fyziky ČVUT v Praze. Předmětem práce je kombinace transmisní radiografie a tomografie s energetickou informací získanou plošným rentgen-fluorescenčním mapováním. Dále se účastní řešení projektů zaměřených na zkoumání objektů z oblasti kulturního dědictví, materiálových věd a biomedicínského výzkumu pomocí metod detekce fotonů či pomalých neutronů.

# **Příspěvek technických věd k záchraně a restaurování památek**

**Vydal:** Ústav teoretické a aplikované mechaniky AV ČR, v. v. i., Praha v roce 2015

**Recenzent:** Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Dipl. Arch. ETH Christian Hanus

**Redakce, předmluva a editor:** Miloš Drdáčký

**Fotografie:** Ron Anthony, Pavel Beran, Rudolf Bruner-Dvořák, Riccardo Cacciotti, Václav Douša, Miloš Drdáčký, Tomáš Drdáčký, Milan Dropka, Dita Frankeová, Hana Hasníková, Michal Hřčka, Michal Jánský, Bo Kasal, Michal Kloiber, Jiří Kunecký, Jaroslav Lesák, Štěpán Major, Cristiana Lara Nunes, Stanislav Pospíšil, Zuzana Slížková, Olga Trmalová, Shota Urushadze, Jaroslav Valach, Jan Válek, Daniel Vavřík, Michal Vopálenský, Benjamin Wolf, Pavel Zíma, Jan Žemlička, Národní galerie, <http://www.ntm.cz/projekty/vysouseci-pracoviste/index.html>, <http://www.ikaros.cz>, Die Hausbücher der Nürnberger Zwölfbrüderstiftungen, Amb. 317, fol. 36r

**Editoři:** Miloš Drdáčký, Zuzana Slížková, Jaroslav Valach

**Autoři textů:** Pavel Beneš, Pavel Beran, Riccardo Cacciotti, Martin Čerňanský, Miloš Drdáčký, Jakub Ďoubal, Dita Frankeová, Petr Gläser, Hana Hasníková, Jan Chlád, Karel Juliš, Petr Justa, Zdeněk Kouba, Jiří Kunecký, Jaroslav Lesák, Štěpán Major, Cristiana Lara Nunes, Stanislav Pospíšil, Zuzana Slížková, Renata Tišlová, Jaroslav Valach, Jan Válek, Daniel Vavřík, Jan Vojtěchovský, Benjamin Wolf, Pavel Zíma, Jan Žemlička

**Grafická úprava a technická redakce:** Jiří Jabulka, nakladatelství Typ, České Budějovice

**Sazba a zlom:** Daniela Šafránková

**Jazyková úprava:** Zuzana Straková

**Tisk:** Tiskárna PROTISK s.r.o., České Budějovice

**Náklad:** 1 000 kusů

**e-ISBN 978-80-86246-49-9**

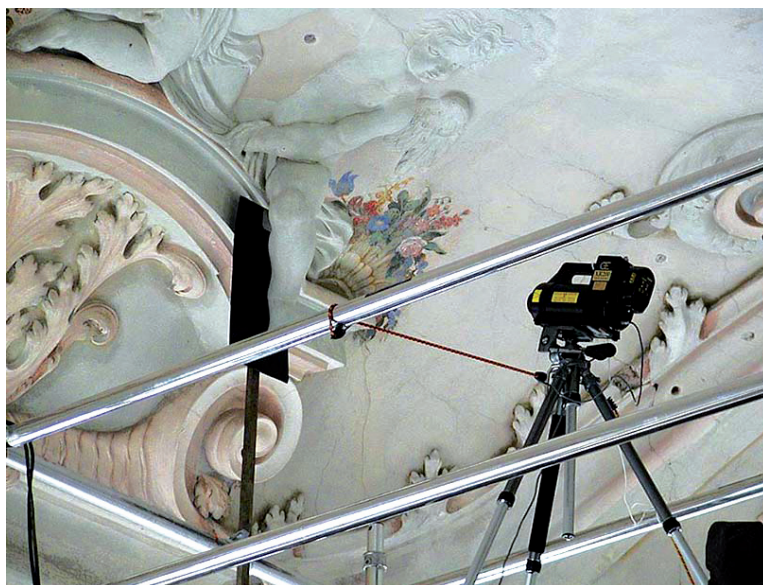
**DOI 10.21495/49-9**











Kniha přináší přehled vybraných výsledků mezioborového výzkumu na pracovištích Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR v moderně rozvíjené oblasti památkových věd. Památkové vědy patří mezi mladší vědecké obory, jejichž vývoj je silně ovlivněn současným bouřlivým rozvojem informačních technologií, miniaturizací a pokročilostí výrobních postupů, které jsou podmínkou aplikace metod a technik dříve pro památkovou péči nedosažitelných. Prolomení technických i ekonomických bariér umožňuje využívání nanomateriálů a nanotechnologií pro záchranu, zachování i zhodnocení památkových a dalších historických objektů.

Kniha je rozdělena do pěti oddílů volně sdružujících kapitoly s příbuznou náplní v oblastech určování materiálových charakteristik historických konstrukcí, poruch a možností jejich předcházení, historických materiálů a technologií, materiálové, technologické a metodické podpory restaurování památek a udržitelnosti sbírek v muzeích a galeriích.

ISBN 978-80-86246-43-7  
e-ISBN 978-80-86246-49-9