

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta stavební

Ústav stavebnin a zkušebních metod

Ing. Miloš Drdácký, DrSc.

**VYBRANÉ METODY DIAGNOSTIKY,
MONITOROVÁNÍ A ANALÝZY PORUCH
HISTORICKÝCH KONSTRUKCÍ A MATERIÁLŮ**

Soubor vědeckých prací (článků a výňatků z oponovaných výzkumných zpráv) doplněný komentářem

**METHODS FOR DIAGNOSTICS, MONITORING AND FAILURE ANALYSIS
OF HISTORIC STRUCTURES AND MATERIALS**

*Volume of selected author's works (papers and reviewed research reports)
provided with a commentary*

ZKRÁCENÁ VERZE HABILITAČNÍ PRÁCE



BRNO 2004

analýza poruch – failure analysis
historické konstrukce – historic structures
historické materiály – historic materials
nedestruktivní metody – nondestructive methods
nestandardní zkoušení – nonstandard testing
monitorování poruch – damage monitoring

Originál práce je uložen v archivu PVO FAST

© 2004 Miloš Drdáký
ISBN 80-214-2723-X
ISSN 1213-418X

OBSAH

1	Úvod	5
2	Analýza poruch	5
2.1	Úvod do teorie vad a poruch historických konstrukcí a materiálů	5
2.2	Analýza vad a poruch historických materiálů a konstrukcí	7
2.3	Poučení z vad a poruch historických materiálů a konstrukcí	10
2.4	Databáze vad a poruch historických materiálů a konstrukcí	10
3	Vybrané metody diagnostiky historických konstrukcí	10
3.1	Úvod – přehled vybraných metod	10
3.2	Speciální NDT diagnostické metody	15
4	Monitorování chování a poruch historických konstrukcí	19
4.1	Úvod – přehled vybraných metod	19
4.2	Příklady sledovaných historických konstrukcí a objektů	21
5	Experimentální analýza poruch historických konstrukcí	22
5.1	Úvod – přehled vybraných metod	22
5.2	Studium chování replik a modelů	22
6	Nestandardní zkoušky tradičních materiálů	23
6.1	Úvod	23
6.2	Materiálové zkoušky na nestandardních vzorcích	24
7	Závěr	28
8	Seznam odkazů na literaturu	28
	Abstract in English	31

PŘEDSTAVENÍ AUTORA



Miloš Drdáký se narodil v roce 1945 v Havlíčkově Brodě. Po maturitě v Telči vystudoval stavební fakultu Českého vysokého učení technického v Praze, obor Pozemní stavby, rozšířený o dvouletý obor Teorie stavebních konstrukcí a získal titul Ing. (1968). V letech 1971-78 absolvoval v Československé akademii věd vědeckou přípravu a obhájil kandidátskou disertační práci (CSc.) v oboru mechanika tuhých a poddajných těles. V říjnu 2001 obhájil na Českém vysokém učení technickém v Praze doktorskou disertační práci (DrSc.) v oboru teorie a konstrukce inženýrských staveb. Speciální vzdělání si doplnil postgraduálními kursy na fakultě strojní ČVUT v Praze (1974-75 Experimentální metody v pružnosti a pevnosti), na pedagogické fakultě University Karlovy v Praze (1976-78 JASPEX – anglický jazyk) a na Ústavu soudního inženýrství VUT v Brně (1980-82 Technické znalectví). V roce 1983 byl jmenován soudním znalcem v oborech stavebnictví a ekonomika.

Autor je od roku 1968 zaměstnán v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky ČSAV v Praze, kde nejprve pracoval v oddělení nelineární mechaniky a po roce 1970 v nově založeném oddělení stability konstrukcí. Zde se věnoval především experimentálnímu výzkumu pokritického chování tenkostěnných desko-stěnových konstrukcí. Výsledky se staly vědeckými podklady části nové čs. normy pro navrhování ocelových konstrukcí. V této oblasti se v nedávné době věnoval optimalizaci tenkostěnných systémů (perforované stěny), výzkumu chování tenkých stěn s náhodnými imperfekcemi (korozní poškození) a problémům poruch tenkostěnných systémů lokální ztrátou stability. V roce 1982 byl pověřen vybudováním Centrální laboratoře experimentální mechaniky, kde pracoval jako vedoucí od roku 1986 do 1993. V tomto oddělení rozvíjel nové experimentální metody bezkontaktního vyšetřování plošných konstrukcí, zejména optické metody jako je stereofotogrammetrie, reflexní fotoelasticimetrie, variace moiré i laserové (LD) interferometrie a emisní metody (akustická a tepelná emise). Dále se zaměřoval na rozvoj modelových a zatěžovacích zkoušek. V roce 1995 založil nové oddělení ARCHISS (*Associated Research Center for Historic Structures and Sites*), zaměřené na mechaniku historických materiálů a konstrukcí a toto oddělení vedl až do doby jmenování ředitelem ÚTAM v roce 1998. Nejvýznamnějším úspěchem v této oblasti bylo dovedení ústavu k uznání a získání grantu Evropské komise jako evropského Centra excelence pro výzkum kulturního dědictví ARCCHIP (*Advanced Research Centre for Cultural Heritage Interdisciplinary Projects*) v roce 2000. Autor řešil nebo řeší 28 domácích nebo zahraničních grantových projektů a výsledky zveřejnil v 236 publikacích a 15 editovaných sbornících a knihách.

Pedagogicky autor působí téměř nepřetržitě od roku 1975 na několika vysokých školách doma i v zahraničí (např. 1975-80 externí asistent na katedře mechaniky FSv ČVUT v Praze, 1984-90 externí přednášející na VŠUP v Praze). V současné době je přednášejícím na fakultě architektury TU Liberec (Konstrukce a forma), na fakultě architektury ČVUT v Praze (Statika) a na fakultě stavební VUT v Brně (Properties and testing of materials). Pravidelně přednáší na UCL Bartlett School v Londýně v kursu pro pracovníky památkové péče.

Autor je členem redakčních rad domácích i zahraničních vědeckých časopisů, např. ASCE Journal of Performance of Constructed Facilities nebo Acta Technica, členem řady mezinárodních organizací (IABSE, ASCE, IASS, CICOP), mezinárodních vědeckých výborů (ICOMOS ISCARSAH, ICOMOS CIVVIH), oborových rad doktorských studijních programů, expertem a evaluátorem projektů Evropské komise.

1 ÚVOD

Předkládaná práce je souborem vybraných autorových publikací a výňatků z oponovaných výzkumných zpráv k dlouhodobým grantovým projektům. Na 159 stranách jsou prezentovány články, které autor vytvořil nebo se na jejich vytvoření podstatně podílel při své vědecké práci v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky Akademie věd České republiky v Praze a jsou tématicky zaměřené na diagnostiku, monitorování a analýzu poruch historických materiálů a konstrukcí.

Toto shrnutí nemůže reprezentativně podat všechny výsledky obsažené v habilitační práci. Proto jsou některé pasáže velmi podstatně zkráceny nebo dokonce zcela vypuštěny. Autor se snažil ponechat ve větším rozsahu zejména ty části, které mohou vyvolat vědeckou diskusi nebo jsou nezbytné pro nezkreslené pochopení předkládaného sdělení. To se týká zejména kapitoly o analýze poruch, která by i v samotné práci vyžadovala mnohem větší rozsah a podrobnější prezentaci.

2 ANALÝZA PORUCH

2.1 Úvod do teorie vad a poruch historických konstrukcí a materiálů [1], [2]

2.1.1 Poznámka k definici vad a poruch a analýze jejich příčin

Úvod

Teoretické práce zabývající se systematickým studiem vad a poruch v oblasti architektury a stavebnictví se začaly s větší intenzitou rozvíjet až s nástupem širšího používání počítačů a tvorby databází. V rámci řešení úkolu základního výzkumu *Provozní chování stavebních konstrukcí s uvážením jejich imperfekcí* byla pod vedením autora v Ústavu teoretické a aplikované mechaniky (ÚTAM) ČSAV navržena, zpracována a uvedena do provozu i banka dat o poruchách stavebních konstrukcí. Na její tvorbě a plnění se významně podílely stavební fakulty ČVUT v Praze i VUT v Brně, TZÚS Praha a Státní výzkumný ústav ochrany materiálu Praha.

Definice a základní klasifikace vad a poruch

Terminologie je v oblasti analýzy poruch stále ještě značně nejednotná. Obvykle však vycházíme z definice vady jako základního pojmu, který se v našich podmínkách odkazuje na názvy ze standardizace řízení jakosti. Vada je zde definována jako „*nedostatek na jednotce (díle) vzhledem k určitému znaku ve srovnání s požadavky (požadovanými vzory)*“ [3]. Obecnější definici užívá Technická rada pro soudní inženýrství Americké společnosti stavebních inženýrů ASCE [4]: „*Porucha je nepříjemný rozdíl mezi očekávanou a pozorovanou skutečností (nebo též mezi očekávaným a pozorovaným působením či chováním jednotky (díla))*“. Autor navrhl změnu této definice ve tvaru „*Porucha je nepříjemný rozdíl mezi **optimálním** a pozorovaným (nebo dosahovaným) působením (chováním) jednotky (díla)*“ [5]. Hodnocení poruchy by totiž mělo umožnit dosažení maximální objektivity při posuzování a „očekávaná skutečnost“ může být sama o sobě, neboli již ve svých předpokladech, vadná.

V každém případě musíme být schopni měřit „přijatelnost rozdílu“ nebo „nedostatek“ a tudíž musíme umět definovat „očekávané působení“ nebo „požadavek“. Vady ve stavebnictví a architektuře jsou obvykle posuzovány porovnáním s ideálními modely nebo vzory, které samy o sobě často vystihují realitu velmi hrubě. Požadované vzory jsou většinou popsány geometrickými charakteristikami, jejich přijatelnými odchylkami, materiálovými charakteristikami a odezvou konstrukce na zatížení. Takový přístup zjednodušuje teoretické posuzování spolehlivosti a bezpečnosti. V oblasti památek, stejně jako v přírodě, se však setkáváme s mnohými konstrukcemi, které nesplňují žádné normy a neodpovídají žádným vzorům a přesto jsou dostatečně bezpečné a schopné odolávat zatížením. Na druhé straně, u těchto jednotek či objektů, nebo dokonce souborů klademe důraz na kvalitu působení a proto je i zde vhodná definice

pracující s kvalitativním hodnocením působení. Kvalitu působení však nemůžeme hodnotit absolutními kritérii a proto hovoříme o optimálním působení.

Optimální působení zahrnuje jak technické tak netechnické aspekty díla a optimalizace je chápána jako *dosazení nejvyššího zobecněného užítku při minimálním vkladu energie či úsilí potřebného pro uskutečnění cíle a při zachování podmínek rovnovážného vývoje přírodního a historického prostředí* [6]. Je třeba zdůraznit, že jak potřebná energie či úsilí, tak užitek jsou vysoce závislé na vědecké, technické, socio-ekonomické a filosofické úrovni společnosti, v níž se proces optimalizace uskutečňuje a jeho výsledky mají být užívány.

Poznámka k hodnocení působení díla

Architektonická a inženýrská díla jsou obvykle posuzována podle odezvy na působící zatížení. Je logické, že v takovém případě je **bezpečnost** měřítkem pro odhalení vad. David Blockley [7], definuje bezpečnost jako „*odpovídající vztah mezi požadovaným stavem světa a skutečným stavem světa*“. I když je bezpečnost příliš úzkým pojmem, přesto představuje nejhodnotnější vyhodnocovací nástroj pro posouzení konstrukční odezvy na zatížení nebo funkčního chování inženýrských systémů. V případě památek je však nezbytné zdůraznit, že se zde, více než kde jinde, musíme naučit hledat a měřit **optimální bezpečnost**. Dosavadní teoretické práce k tomu zvolna přispívají, např. [8] nebo závěry vědeckého výboru ISCARSAH ICOMOS [9].

Dalšími užívanými kritérii jsou spotřeba materiálu, spotřeba energie, funkční odezva, odezva v prostředí, popřípadě estetická, etická, filosofická a jiná. Podrobnější studium těchto otázek se již vymyká zaměření této práce.

2.1.2 Faktory ovlivňující životnost a provozuschopnost architektonického dědictví

Životnost a provozuschopnost materiálů, prvků, objektů a souborů architektonického dědictví je ovlivněna nejrůznějšími faktory, jejichž působení jsou díla vystavena. Největší pozornost je samozřejmě vždy věnována faktorům ovlivňujícím fyzickou existenci díla. Nicméně, téměř u všech památek, zejména pak u historických sídel, může dojít k těžkému poškození nehmotných stránek a hodnot, což je rozhodně poruchou a může se blížit i charakteristikám havárie

Faktory narušující fyzickou existenci památek můžeme rozdělit do tří kategorií podle období jejich působení: i) *před zhotovením díla*, ii) *během zhotovení díla* a iii) *během života díla*. I když historické objekty vykazují velké množství vad a poruch způsobených faktory působícími před zhotovením díla, pro účely hodnocení památek je nejvýznamnější třetí kategorie vlivů, které můžeme dále rozdělit do několika skupin.

Vlivy prostředí (povětrnosti)

Úvodem k této skupině je třeba říci, že vlivy prostředí se mohou projevovat jak v exteriéru, tak v interiéru. Složkami vlivů povětrnosti jsou zejména: záření, teplota, voda, vzduch, vzdušné polutanty a vítr. Povětrnostní vlivy většinou působí na památkové objekty synergicky.

Biologické faktory

Studiu biologických faktorů je věnována rozsáhlá odborná literatura. Omezme se na základní přehled mikroorganismů, rostlin a živočichů, napadajících historické materiály a způsobujících poruchy na památkách. Jsou to: houby a plísně, bakterie, lišejníky, mechy a řasy, vyšší rostliny, hmyz, ptáci, drobní i větší savci a zejména člověk.

Nekompatibilita

Většina stavebních hmot, prvků a konstrukcí je tvořena nehomogenními složenými systémy, které kombinují materiály rozdílných fyzických, chemických a biologických vlastností. Tyto

materiály mají rozdílnou odezvu na působící vlivy a pokud je překročen vzájemný práh tolerance, dochází k vadě nebo poruše. U architektonického dědictví k tomu přistupují ještě faktory nehmotné povahy. Je praktické rozlišovat čtyři druhy nekompatibility: chemickou, fyzikální, architektonickou a sociální.

Zatížení

Na historické objekty působí rozmanitá namáhání, která obvykle dělíme na statická, periodická (opakovaná nebo dynamická zatížení) a pohyby podpor. Původci namáhání jsou vnější síly (např. gravitace, tlaky, vztlaky, síly setrvačné), které mohou mít různý směr, intenzitu a trvání, dále pak deformace (např. vynucené: teplotní či vlhkostní dilatace, pohyby základové půdy, vibrace nebo přirozené – creep, smršťování). Způsobují lokální porušení materiálu smykem, tahem, tlakem či únavou a poruchy konstrukcí.

Užívání (provoz)

Užívání památek obsahuje řadu degradačních faktorů. Jakékoliv užívání přináší běžné opotřebení, které postupně vyčerpává životnost díla. Opotřebení a nebezpečí poruch se zvyšuje při nepřiměřeném užívání, které může působit mechanicky (přetěžováním) ale i v oblasti stavební fyziky (nevhodné změny vnitřního klimatu, vytvoření difúzní bariéry apod.). Opotřebení a nebezpečí poruch se naopak snižuje včasnou a pravidelnou údržbou, která je jedním z nejvýznamnějších faktorů zachování architektonického dědictví.

Koncepce, návrh, provedení a zásahy do díla

Životnost konstrukce bezesporu nejvýrazněji ovlivňuje již prvotní koncepce, návrh a provedení díla. Volba nevhodného staveniště, složité tvary zadržující vodu, sníh nebo nečistoty, chybné detaily, nedostatečné izolace, nedostatečné větrání nebo nevhodný stavební materiál či technologie může velmi podstatně snížit životnost historického objektu. Ve smyslu našeho výše zmíněného přístupu k posuzování vad a poruch je dílo s takovými znaky vadné. V oblasti památkové péče však velmi zřídka dochází k rektifikaci vadné koncepce, návrhu a provedení památky, protože i tyto atributy jsou chápány jako součást kulturního dědictví.

Mimořádné události

Mimořádné události nejsou častou příčinou poruch a havárií, jejich důsledky jsou však většinou velmi ničivé, proto jim věnujeme podrobnější pozornost v třídění i příkladech. Jedná se o povodně, zemětřesení, sesuvy půdy, laviny, vichřice, požár ale též o válečné konflikty, vandalismus, výbuchy, nárazy dopravních prostředků či plovoucích předmětů a další jevy.

2.2 Analýza vad a poruch historických materiálů a konstrukcí

2.2.1 Třídění vad a poruch historických materiálů a konstrukcí

Základní koncepce

Na základě studia údajů o stavebních haváriích navrhl autor [2], [10] kategorizovat vady a poruchy vyskytující se v architektuře a stavitelství do tří skupin. První skupina je charakterizována poruchami stavebních materiálů a konstrukcí ve vztahu k okolnímu prostředí, užívání a uživatelům a je předmětem studia **stavební patologie**. Jinými slovy, zabývá se „chorobami“ konstrukcí a budov nebo jejich konstrukčními či funkčními změnami podobně jako v případě živých organismů. Tato skupina pokrývá vady a poruchy vzniklé během života konstrukce účinky prostředí nebo vnějších sil (jako je únava, kumulace poškození, koroze), materiálovou degradací (stárnutí, chemické změny), provozními podmínkami (chybné užívání, přetížení, neznalost), chybnou údržbou nebo nedbalostí apod.

Druhá skupina „vrozených“ nebo „prenatálních“ vad, zahrnujících i zrůdy a přišernosti je předmětem studia, které nazýváme **stavební teratologie**, abychom zachovali podobnost s lékařstvím. Sem patří všechny vady a poruchy vzniklé ve stadiu tvorby koncepcí, přípravy projektu, v procesu navrhování i výstavby díla. Nevhodná architektonická koncepce nebo stavební řešení vede později k vážným potížím a neekonomickému návrhu. I když nemusí dojít k fyzické havárii, vždy vzniká porucha morální nebo estetická a chyba by se neměla opakovat. Často je obtížné tyto vady definovat a v případě konstrukcí dokonce nalézt, neboť konstrukce není vždy viditelná. Jedná se o velmi důležitou skupinu, protože generuje více než 80 % stavebních havárií.

Poslední skupinu sdružujeme pod název **mimořádné události** a zahrnuje neočekávané jevy, např. přírodní katastrofy, požár, výbuchy, nárazy vozidel nebo jiných dopravních prostředků a další nechtěné výsledky lidské činnosti, jako jsou průmyslové havárie. Snížení rizika a prevence těchto poruch vyžaduje podstatně odlišné přístupy než problémy stavební patologie. Ze statistiky stavebních poruch plyne, že havárie v důsledku mimořádných událostí představují pouze 1,5 % případů, nicméně vždy znamenají obrovské materiální škody, těžká zranění i ztráty na životech.

Hlediska třídění vad a poruch

Vzhledem k obrovské rozmanitosti vad a poruch, můžeme při jejich třídění používat různá hlediska. Poruchy třídíme podle závažnosti, podle materiálů nebo konstrukcí z těchto materiálů vytvořených, podle typu objektu nebo typu konstrukce či konstrukční části, podle funkce konstrukce, na které k poruše došlo. Velmi oblíbené je třídění podle projevů poruchy nebo podle příčin poruchy. S příčinami souvisí i možnost dělení poruch podle období jejich vzniku.

Všechna výše zmíněná hlediska jsou důležitými charakteristikami vad a poruch a proto by měla být vždy obsahem údajů o vadě či poruše při vytváření databází. Pokud není vytvořen zvláštní systém terminologie, doporučuje se používat zavedenou pro jiné účely, např. pro registr památek.

2.2.2 Projevy vad a poruch historických materiálů a konstrukcí

Poznámka k mechanismu poškozování materiálů

Zdravý materiál je prvotní podmínkou fyzické existence architektonického kulturního dědictví. Znalost základních mechanismů poškozování historických materiálů je nutnou podmínkou jejich efektivní ochrany. V zásadě dochází k poškozování historických materiálů třemi způsoby, které v mnoha případech působí současně nebo se alespoň vzájemně ovlivňují, někdy současně a někdy postupně. Jedná se o fyzikální poškozování, chemické poškozování a znečištění povrchu.

Typické projevy poruch

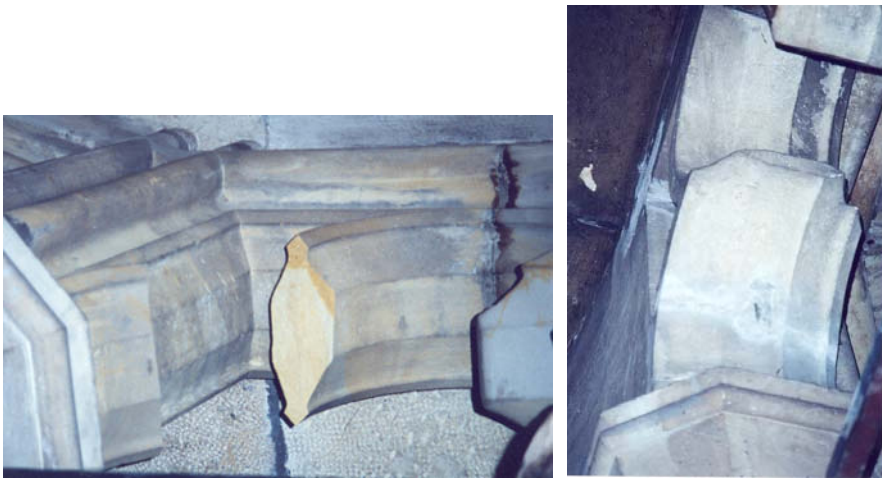
Při třídění vad a poruch podle jejich projevů obvykle rozeznáváme tyto typy: žádná vada či porucha; destrukce, zřícení objektu nebo jeho části; vzájemné posuny nebo pootočení částí nebo posun či rotace celého objektu; deformace – mohou být pružné či trvalé; trhliny v konstrukcích nosných i nenosných; úbytek materiálu; rozpad materiálu; vlhkost; biologické napadení; nestejnorodost materiálu či konstrukce; vzhledová změna; změna struktury; zasolení.

Výše uvedené charakteristické projevy jsou velmi hrubé, někde se i částečně překrývají. Obvykle se dále zjemňují podrobnějším popisem, např. u trhlín uvedením jejich obrazce, sklonu, šířky trhlín a polohy vzhledem k základům, otvorům či jiným podstatným skutečnostem.

2.2.3 Příčiny vad a poruch historických materiálů a konstrukcí

Určení příčin vad a poruch je hlavním cílem analýzy havárií. Na jeho základě se pak navrhuje strategie a konkrétní opatření k nápravě škod a k prevenci vzniku poruch. Z analýzy vad a poruch plyne, že většina poruch nemá pouze jednu příčinu, ale je výsledkem kombinace nepříznivých okolností. Pouze asi třetina poruch může být obvykle přisouzena jedné příčině. Zbylé dvě třetiny

vznikají z více důvodů a statistický počet příčin vychází kolem 2,5. Jsou však známy těžké havárie, kde bylo identifikováno 7-8 příčin.

Vliv prostředí – Vnější klimatické vlivy – Voda
PORUCHA – obecný faktor – vlhkostní a teplotní nerovnoměrná dilatace
<i>Popis poruchy – projevy:</i> úplné oddělení části kružby triforia a její zřícení do hlavní lodi – opakovaná porucha na mnoha kružbách (většinou bez úplného oddělení)
<i>Popis objektu – konstrukce: Identifikace – název, místo – materiál – konstrukční systém (rozměry)</i> Katedrála sv. Víta, vnitřní triforium, původní i nová část objektu (popisovaná porucha vznikla v prvním poli (od transeptu) severní řady sloupů v nové části)
<i>Expozice: využití, poloha, prostředí:</i> vnitřní klima s kolísající teplotou a vlhkostí v širokém pásmu a v závislosti na počasí a návštěvnosti. Porušená subtilní konstrukce přilehlá k masivním prvků s vysokou vlhkostní a tepelnou stabilitou. Zjištěny známky zatékání do objektu.
<i>Historie: stáří objektu, změny objektu, doba vzniku poruchy</i> 14. století, porušená část z 19.století, v posledních letech výrazný nárůst počtu návštěvníků v průběhu celého roku, přesné datum poruchy neznámé – kolem 24. července 1991, v období náhlé změny počasí (podrobný popis viz <i>Drdáček, M.: Materiály pro stavbu, 2/1995</i>)
<i>Grafická dokumentace:</i> 
<i>Původ poruchy:</i> trhliny iniciované pravděpodobně vadou materiálu nebo výrobním postupem, šíření napříč průřezem nejpravděpodobněji díky namáhání od gradientu rozdílné vlhkostní a teplotní objemové změny, (?) s příspěvkem dynamických sil od okolní stavební činnosti a předchozích dopravních vibrací (především přelety nízko letících letadel při vojenských přehlídkách)
<i>Důležité parametry pro určení příčiny poruchy:</i> kvalita materiálu (fyzikální charakteristiky), mikroporuchy, změny vnitřního klimatu a jejich odraz v konstrukci (teplota, vlhkost)
<i>Odstranění:</i> restaurátorská kamenická oprava
<i>Prevence:</i> v zásadě se jedná o prvek s velmi nevhodným detailem, způsobujícím výrobní problémy a vysokou koncentraci namáhání a nerovnoměrnou deformací, (prevence by spočívala ve změně prvku proříznutím kružby uprostřed oblouku přes celý průřez)

2.3 Databáze vad a poruch historických materiálů a konstrukcí

Při hodnocení poruch hrají srovnávací metody velmi důležitou roli a zde jsou neocenitelnou pomůckou databáze a katalogy poruch. Dále uvedený příklad formuláře vychází z prací zaměřených na stavebnictví obecně a uvádí jednu z možností využití pro památky. Studium poruch historických materiálů a konstrukcí však musí být založeno na skutečně interdisciplinárním přístupu a mělo by být pěstováno i v širší mezinárodní spolupráci. Vzhledem k tomu, že v památkové péči se zabýváme záchranou a prodloužením životnosti unikátních materiálů, je poznání mechanismů jejich rozkladu a ničení fundamentálním problémem, často podceňovaným nebo řešeným velmi povrchně.

2.4 Poučení z vad a poruch historických materiálů a konstrukcí

Údaje o vadách a poruchách historických materiálů a konstrukcí dosud nebyly systematicky sbírány a archivovány, přestože se řešením jejich oprav a preventivní ochranou zabývá obrovské množství odborníků. V práci je uveden návrh podrobného záznamu pro katalog vad a poruch historických materiálů a konstrukcí.

3 VYBRANÉ METODY DIAGNOSTIKY HISTORICKÝCH KONSTRUKCÍ

3.1 Úvod – přehled vybraných metod [1]

3.1.1 *Průzkum historických konstrukcí pomocí nedestruktivních metod (NDT)*

Úvod

V této kapitole nepodáváme vyčerpávající přehled všech možných nedestruktivních metod pro průzkum historických konstrukcí a materiálů. Předkládáme pouze typické příklady metod, které mají, podle našeho názoru, širší praktický význam pro záchranu architektonického dědictví, jsou dostupné a autor s nimi má osobní zkušenost.

Nejzákladnější metodou průzkumu stavu historických konstrukcí a materiálů je vizuální prohlídka s dokumentací povrchově viditelného stavu objektu. NDT metody můžeme třídít podle typu informací, které nám poskytují nebo podle principu, na kterém jsou založeny. Použijeme-li první případ, rozeznáváme metody poskytující *morfologické informace a kvalitativní údaje* a metody poskytující *kvantitativní údaje* o historickém materiálu nebo konstrukci.

Povrchový průzkum

Zde se *zaměříme* především na průzkumné práce, předcházející zjištění stavu konstrukcí a materiálů a analýze nalezených poruch. Průzkumné práce obvykle probíhají v několika základních stupních. Jsou to: shromáždění podkladů, podrobná prohlídka objektu, dokumentace nálezů a doplňková šetření (i dlouhodobá).

Zdivo a klenby

Metody poskytující kvalitativní informace

Výsledkem aplikace těchto metod je zlepšená znalost morfologie zdiva, jeho průřezu, poloh dutin nebo defektů. Po konzervačním zásahu jimi lze kontrolovat úspěšnost injektáže. Typickými představiteli těchto metod jsou techniky založené na šíření mechanických impulsů v historické konstrukci. Další úspěšně používanou metodou je *termografie*, využívající rozdílných tepelných vodivostí různých stavebních materiálů nebo různé tepelné kapacity těchto materiálů či nehomogenního zdiva s dutinami apod. Svůj význam si zachovávají i *metody radiografické*, zejména *rentgen*, který umožňuje detekovat kovové předměty popř. i různě hmotné materiály, tedy

i různě vlhké. Velmi užitečné výsledky dává i *endoskopie* ve všech používaných variantách – *boroskopie*, *fibroskopie* a *videoskopie*. Pro nalezení trhlin a vad je možné, kromě výše uvedených vlnových metod použít pro některé typy konstrukcí *dynamické metody modální analýzy*, popřípadě měření diferenciálního kmitání pomocí bezkontaktního měření vibrací, založeném na interferenčních principech. Jednou z nejrozšířenějších metod je měření pomocí *laserového dopplerovského interferometru*, např. zařízením VPI firmy Ometron. Průzkumy skrytých základových konstrukcí lze provádět pomocí dalších *geofyzikálních* metod, zejména tzv. *geoelektrických*, např. *měření potenciálu*.

Metody poskytující kvantitativní informace

V řadě případů požadujeme zjistit stav napjatosti konstrukce, mechanické vlastnosti materiálů, obsah solí nebo vlhkosti. Určité charakteristiky napjatosti konstrukce mohou být zjištěny výše zmíněnými *dynamickými metodami* a zejména měřením *změn deformací* či *změn svislosti při zatížení – monitoring*. Tato měření vyžadují speciální interpretaci a často i doplňkové vyšetření jinými, většinou destruktivními metodami. Kvantitativní údaj o vnitřních rozměrech složených průřezů (vrstvách určitého materiálu) dává *endoskopie*. Nesmírně užitečná jsou měření geometrie konstrukcí pomocí *geodetických* metod, které dnes využívají rozvinuté *laserové třídídimenzionální skenery*, *stereofotogrammetrické techniky* a zaměřování pomocí satelitů, tzv. *GPS*. Pro podrobnou dokumentaci se používají interferenční optické metody, např. metoda *moiré*. Pro zjištění určitých charakteristik napjatosti ve zdivu, např. koncentrací okolo otvorů lze využít některých speciálních metod, např. měření *termoelastického jevu* při cyklickém namáhání. Většina z metod, uvedených v odstavci 3.1.2. je rozvíjena za účasti ÚTAM a FAST VUT Brno.

Dřevěné konstrukce

Metody poskytující kvalitativní informace

Hlavním problémem dřevěných historických konstrukcí je zjišťování jejich zdravotního stavu a rozsahu degradace materiálu. Z NDT metod se uplatňuje především *povrchový průzkum*, *rentgen* a *hloubkové měření vrtného odporu* pomocí mikrovrtáčky, např. německého přístroje RESISTOGRAPH firmy Rinntech. Významnou metodou studia starých dřevěných konstrukcí je *dendrochronologie*, která vyžaduje odběr malého vzorku pomocí dutého vrtáku a dále *endoskopie* ve všech formách. Úspěšné je použití velmi speciálních technik, např. *výcvik psů* pro hledání dřevokazných hub v nepřístupných prostorách.

Metody poskytující kvantitativní informace

Pro dřevěné konstrukce se mohou používat stejné metody jako pro průzkum zdiva.

Historické materiály

Metody poskytující kvalitativní údaje

Kvalita historických materiálů se zjišťuje pomocí mechanických nedestruktivních metod, které využívají korelačních vztahů mezi některou povrchově zjistitelnou charakteristikou materiálu a jeho pevností. Jedná se zejména o korelaci pevnosti s tvrdostí a používané metody se nazývají *sklerometrické*. Na jiných korelačních závislostech je založena řada dalších technik, např. *měření vrtného odporu*, kterým se dá přibližně zjistit pevnost silikátových staviv.

Metody poskytující kvantitativní údaje

Při dostatečné kalibraci (a většinou ještě v kombinaci s destruktivními zkouškami) může být většina *sklerometrických metod* využita pro zjištění dostatečně přesných hodnot mechanických charakteristik potřebných pro inženýrské výpočty na historických konstrukcích. Tahovou pevnost zjišťujeme pomocí *odtrhávání* omítkové vrstvy nebo předem odděleného kruhového jádra od základního materiálu. Některé mechanické vlastnosti pevných staviv lze zjišťovat *metodami dilatometrickými*, např. rozpínáním zatěžovacího přípravku v předem vyvrtaném otvoru. Pro studium degradace materiálu *in situ* existují speciální metody měřící korozní úbytky, např. *laserový profilometr*, měřící s rozlišením okolo 40 mikronů.

3.1.2 Vybrané metody rozvíjené či aplikované na pracovišti habilitanta

Prohlídka

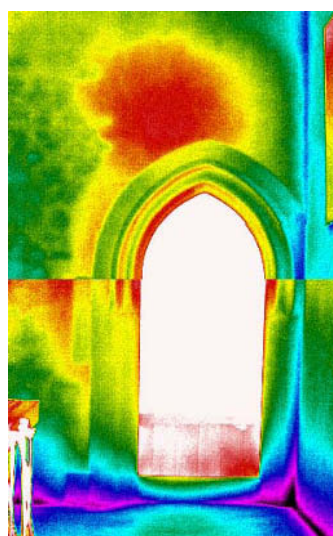
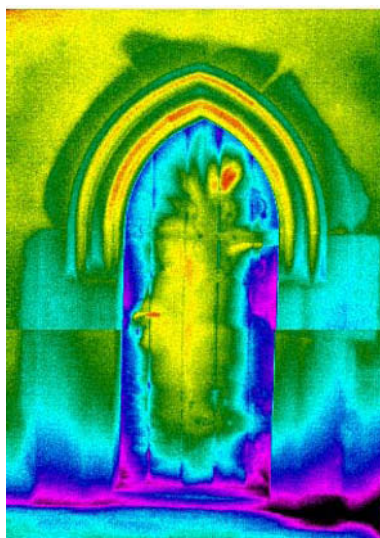
Prohlídka neboli inspekce objektu a konstrukcí je základní a nejužitečnější metodou průzkumu stavu historického materiálu či konstrukce. Vždy musí být doprovázena poznámkami, pořizovanými při prohlídce, a dokumentací nálezů. Můžeme při ní provádět i povrchová šetření některou z výše uvedených metod nebo odebírat malé vzorky pro laboratorní zkoušky. Metodice provádění prohlídek je věnována poměrně rozsáhlá literatura např. [11], [12] a ve shrnutí se jim nevěnujeme, zjišťování projevů změn, deformací a pohybů stavby popisujeme podrobněji níže. Typická šetření zahrnují: zjišťování vlhkosti, nasákavosti při nízkém a vysokém tlaku, tvrdosti povrchové vrstvy, odpor proti vrtání apod.

Termografie [1]

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 nasákavých 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, (podrobněji viz odst. 4.2.2). Studenější jsou obecně i vlhké povrchy vzhledem k jejich ochlazení 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. Interpretace termogramů 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. 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 *impulsní (aktivní) termografii*, při které je konstrukce lokálně zahřívána a sleduje se proces chladnutí. 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. Ilustrativní obrázek ukazuje pohled na gotická ostění hradu Karlštejna, kde je patrný rozdíl mezi původním z nepravidelných kamenných bloků a novým, vloženým při rekonstrukci v 19. století, stejně jako rozdíly ve zdívu, zvýšená vlhkost v koutech a při podlaze.

Radiografie [15]

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. Nízko výkonové rentgeny jsou velmi bezpečné a mají dostatečnou razanci pro vyšetřování dřevěných konstrukcí.

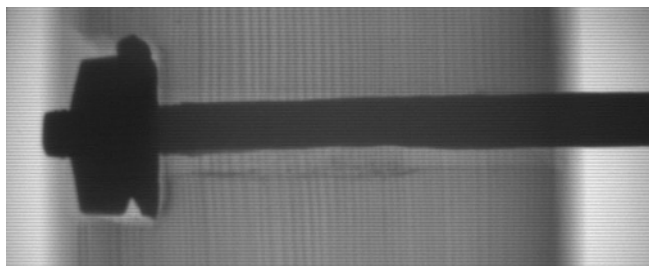
Princip metody a použitá zařízení

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.

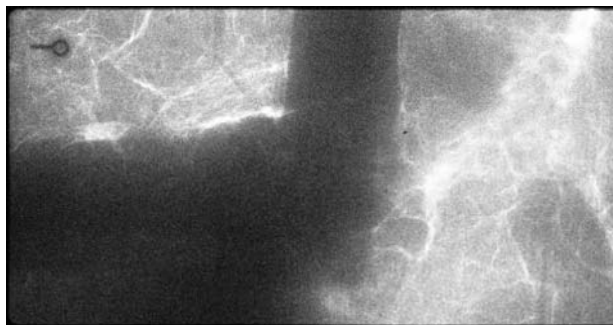
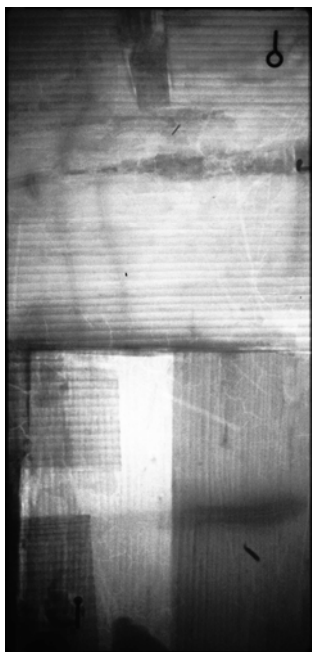
Intenzita záření po průchodu tělesem je vhodným způsobem zviditelněna a zaznamenána. Tradičně se používá osvit filmu nebo zviditelnění záření na světélkující matnici. Dalšími zobrazovacími technikami jsou počítačová radiografie, využívající připojení na video-systém a fotografie na polaroidní filmy. Převratnou techniku přináší fosforové záznamové zařízení, které vyvinula firma EPIX a 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 vybavy převedeno do obrazů, které mohou být dále zpracovávány. Záznamová deska může být znovu opakovaně používána.

Rentgenová diagnostika v památkové péči

Tradiční radiografie užívající film a vysokoenergetický zdroj rentgenových paprsků se používá pro průzkum stavebních konstrukcí již od II. světové války. Zkoušky betonových konstrukcí pomocí záření gama byly v ÚTAM AV ČR prováděny již v roce 1944, dlouho před aplikacemi v cizině [13] a další radiografické aplikace byly v tehdejší ČSR široce rozvinuty již v polovině padesátých let [14]. 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 použití digitální radiografie pracující v reálném čase, které je v oblasti průzkumů poměrně nedávné, se jeví velmi slibným. Radiografie může být využita pro určování míst a rozsahu poškození dřeva biologickými škůdci – hmyzem a hnilobou. 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. Rozdílnost hustoty letního a zimního dřeva umožňuje zaznamenat vzájemně se křížící prvky, což se využívá při zkoumání styků, nebo polohy či stavu dřevěných hmoždinek a spojovacích či zajišťovacích kolíků a trnů. Rentgenování umožňuje sledovat způsob porušení a průběh trhlin uvnitř dřevěných prvků. 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, jako na obrázku dřevěný rám v hliněném zdivu nebo styk roubenice se zárubní (vlevo).



3.1.3 Poznámka k typickým destruktivním metodám a problémům

Úvod

Již v předchozí části jsme uvedli některé metody, které nejsou z hlediska integrity historické konstrukce úplně nedestruktivní. V této části doplníme přehled o techniky, které svým rozsahem sice rovněž podstatně nenarušují památkový objekt, ale jsou takové povahy, že jejich použití na vzácných památkách je vyloučené. Jedná se tedy o šetrné destruktivní metody, zařaditelné do rodiny tzv. MDT (Medium Destructive Testing) metod. Tyto metody byly vyvinuty a jsou používány pro získávání kvantitativních dat, především mechanických charakteristik konstrukcí a materiálů. MDT metody nejsou konečným stupněm zkoušek, prováděných na historických objektech, z nichž některé mohou skutečně vést ke zničení části nebo celého objektu. Jedná se však o velmi výjimečné případy, použitelné prakticky výhradně v situaci, kdy na objekt bylo vydáno demoliční rozhodnutí. V takové chvíli se však historický objekt stává nesmírně cenným zdrojem informací a v každém případě by v rozhodnutí o odstranění stavby měla být podmínka využití demolice ke studijním účelům. Správní orgány památkové péče by takovou podmínku měly klást. Mezi nešetrné destruktivní metody patří *zatěžovací zkoušky*, prováděné až do stadia vyčerpání únosnosti konstrukce. Kromě výše uvedeného případu demolice, některé státy umožňují tyto zkoušky provádět velmi výjimečně na vybraných objektech a na snadno opravitelných částech.

Zdivo a klenby

Odběr vzorků zdiva

Základní destruktivní metodou průzkumu historického zdiva je odběr vzorků pro zkoušení v laboratoři. Velikost odebíraného vzorku pro laboratorní zkoušky se může měnit ve velmi širokém rozmezí, daném památkovými aspekty, potřebami průzkumu a technickými možnostmi odběru a zkoušení – od šetrných odběrů malty ze spár a porušených částí zdiva přes odvrtání válcových vzorků až po vybourání jednotlivých staviv nebo celých částí zdiva, viz níže.

Ploché lisy

Metodu plochých lisů zavedl v Itálii P.P.Rossi [16] na počátku osmdesátých let minulého století, ve Francii ji rozvíjel pro betonové konstrukce Ch.Abdunur a do ČR ji přinesl řešitel grantu v roce 1983 [17] a v současné době ji úspěšně vyvíjí prof. Jiří Adámek, CSc. se svými kolegy na FAST VUT Brno [18]. Metoda se používá ve dvou variantách. V prvním případě se pomocí *jednoho lisu* zjišťuje přibližná napjatost ve zdivu. Ve druhé variantě se na vzorku autentického zdiva bez jeho vyjmutí z konstrukce měří deformační charakteristiky, případně pevnost pomocí *dvou plochých lisů*. V současné době je metoda široce užívána v Itálii, Španělsku a Slovinsku.

Plochý lis o tloušťce několika milimetrů je tvořen tenkou dvojitou ocelovou membránou, svařenou po obvodě do tvaru kruhové úseče nebo obdélníka a opatřenou dvěma nátrubky pro připojení hadic s tlakovým olejem. Tyto lisy se vkládají do úzkých štěrbin vyřezaných okružní pilou (pro kruhové lisy) nebo vyvrtaných hustou sítí těsně vedle sebe položených otvorů (pro obdélníkové lisy). Postup měření je pro jednotlivé varianty následující:

1) Na zdivo se před měřením umístí dvojice mosazných terčů pro přiložení měřidla a změří jejich přesná vzdálenost. Pak se provede štěrbina, která způsobí uvolnění napětí v okolí řezu a změnu polohy měřicích terčů. Do štěrbiny je vložen plochý lis a nafukován takovým tlakem oleje, který způsobí obnovení původního deformačního stavu měřeného původní vzdáleností osazených terčů. Z výše tohoto tlaku se pomocí kalibračních křivek určuje pravděpodobná napjatost zdiva před zkouškou.

2) Na zdivo se před měřením umístí dvojice terčů pro upevnění nebo přiložení měřidel ve vodorovném i svislém směru do definovaných vzdáleností. Dvojice plochých lisů je vložena do zdiva do dvou rovnoběžných štěrbin provedených ve vzdálenosti okolo 400-1000 mm. Tlak v plochých lisech je postupně zvyšován a měřena odpovídající deformace zdiva. Z naměřených hodnot lze určit deformační charakteristiky zdiva. Pokud zvyšujeme tlak až do okamžiku porušení, lze odhadnout napětí na mezi porušení (tlak. pevnost). Tohoto stavu není vždy možno dosáhnout.

Dřevěné konstrukce

Pro diagnostiku dřevěných konstrukcí lze v zásadě použít stejných principů destruktivních metod, jako pro zdivo a klenby. Můžeme z dřevěné konstrukce odebírat větší vzorky materiálu nebo celé prvky či styčníky. Můžeme též provádět zatěžovací zkoušky, např. pomocí plochých lisů vložených mezi konstrukci a zděnou podporu a měřit vyvolaná přetvoření. Odběr vzorků materiálů a zkoušení v laboratoři je stručně popsáno níže, odběry prvků jsou u památek značně omezeny a proto se při zkouškách konstrukcí či konstrukčních uzlů často uchylujeme k výrobě a zkoušení replik, pokud možno zhotovených z autentického materiálu, viz kapitola 5.

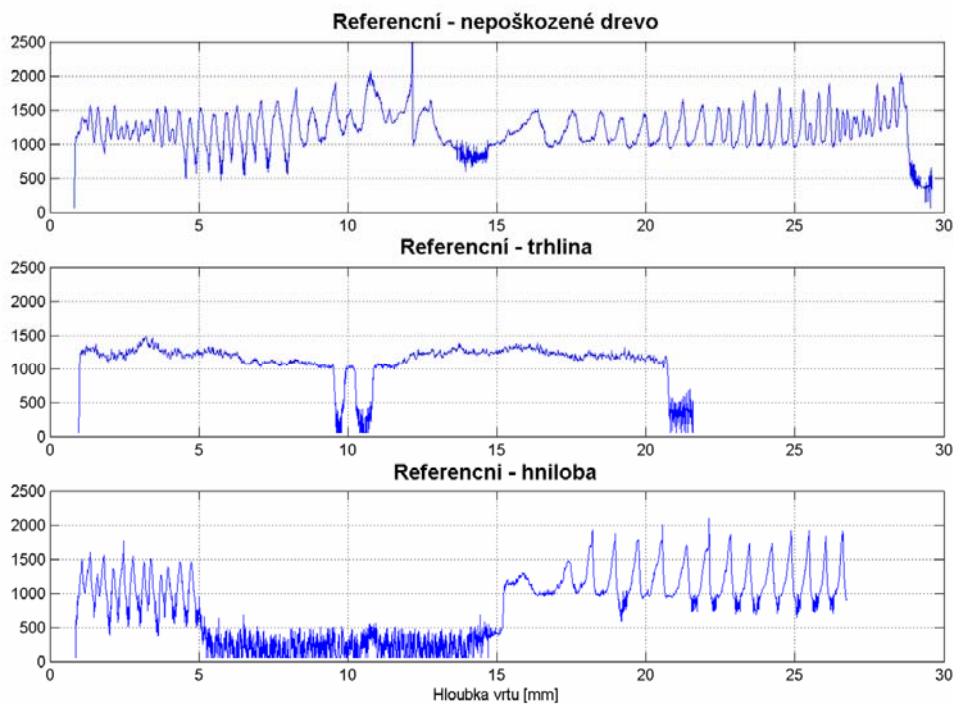
3.2 Speciální NDT diagnostické metody

3.2.1 Měření odporu při vrtání [1], [19]

Techniky založené na měření vrtného odporu stavebních materiálů patří v současnosti mezi jedny z nejoblíbenějších tvrdoměrných metod. Pro průzkum stavu dřevěných prvků historických konstrukcí je vhodné vrtání do velkých hloubek (až do 1000 mm) vrtákem o průměru 1-3 mm, které umožňuje sledovat změnu vrtného odporu v závislosti na hustotě dřeva. V ÚTAM AV ČR je používán Resistograph 2450-p německého výrobce Dr. F. Rinna.

Referenční záznamy z měření jsou ukázány na obrázku a můžeme na nich názorně vidět typické rozdíly mezi naměřenými odpory průniku vrtáku zdravým dřevem, při průchodu trhlinou nebo dutinou a při průniku dřevem narušeným degradací, např. hnilobou.

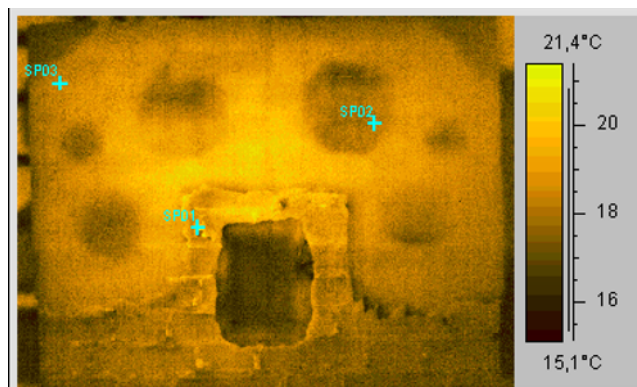
Je třeba poznamenat, že tato metoda neposkytuje údaje o absolutních hodnotách mechanických vlastností dřeva, např. o pevnosti, pouze o hodnotách relativních.



3.2.2 *Bezkontaktní metody detekce podpovrchových defektů* [1], [21], [22], [23]

Termografie

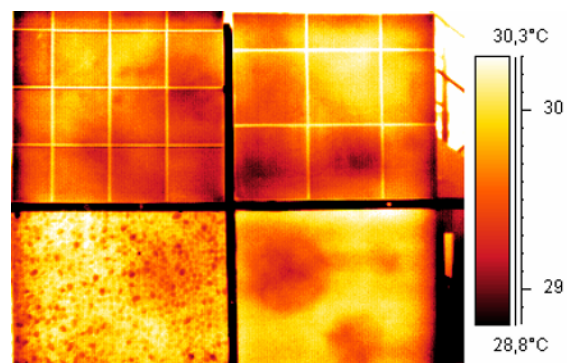
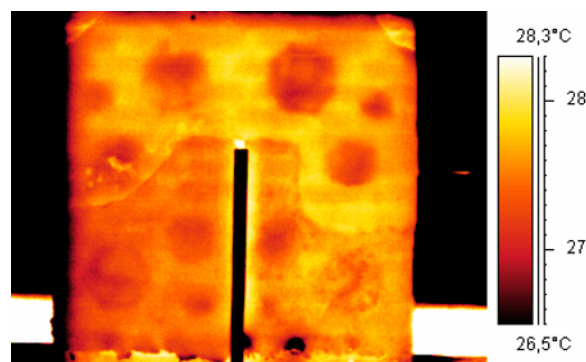
Analýza procesů oteplování a chladnutí nekovových těles při nebo po zahřívání vnitřním nebo vnějším zdrojem je teoreticky dobře propracována, nicméně ve stavebnictví se většinou aplikace termografie omezovaly na pasivní variantu. Aktivní termografie je vhodná pro zjišťování defektů uvnitř málo vodivých materiálů a proto byly zkoumány její možnosti při hledání uvolněných povrchových vrstev. Experimenty probíhaly ve dvou variantách. Při první byla zeď s defekty tepelně aktivována několika způsoby. První obrázek ukazuje případ, kdy zeď byla předehřívána na maximální teplotu 24 °C po několik hodin a měření probíhalo při chladnutí. V tomto případě části omítky kryjící defekty chladnou rychleji a projevují se tmavými skvrnami. V druhém případě se měřilo při lokálním zahřívání sálajícím zdrojem (lampou o výkonu 1000 W po dobu asi 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 zahřívané části se jeví teplejší než na nezahřívané, neboť z nich není odváděno teplo dovnitř zdi tak rychle, jako z omítky pevně spojené se zdí. K metodě je nutno poznamenat, že pořízení termovizní kamery je velice nákladné, nicméně aplikace při měření je nenáročná, levná a při vhodné teplotě i neinvazní a bezpečná. Z obrázku je názorně vidět, že i citlivost je velmi dobrá. I u této metody je důležité znát vliv různé kvality a materiálu povrchu na její citlivost. Proto výzkum pokračoval na upravené modelové zdi. Zároveň se zkoušela druhá varianta vyvolání skokové změny zahřívání zkušebního tělesa. Experiment probíhal v letních měsících (v srpnu) roku 2003, 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. Při pohledu na zeď vidíme v horní části původní omítkové vrstvy (bez ulámaných volných rohů a bez nalepené omítkové desky), 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 termogramu velmi dobře vidět i struktura zdiva (cihly a spáry) pod omítkou. Měření ruší povrchové defekty, např. v levé horní polovině u středního puchýře světlé skvrnky. Velmi dobré výsledky lze získat i na povrchu z jiných materiálů, (na obrázku zleva nahoře obkladačky, dlažba, oblázková mozaika a poslední vpravo dole nastavovaná omítka.

Poučení z vývoje aktivní termografie

Aktivní termografie, někdy též nazývaná impulsní 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. Interpretace měření vyžaduje zkušenost a důsledné pořizování fotografické dokumentace povrchové kvality. Nedostatečně prozkoumaný problém představuje vliv vlhkosti, která se může v puchýřích omítky shromažďovat a výrazně měnit obraz rozložení teplot.



Dynamická identifikace pomocí měření rychlostí kmitání povrchu

Při ztrátě soudržnosti povrchové vrstvy s podkladem se výrazně mění její ohybová tuhost. Održená 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 využívány při optickém vyšetřování ztráty soudržnosti povrchových vrstev bezkontaktními metodami. Nejzajímavější výsledky jsou dosahovány 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. Pro aplikaci na omítky jsou rozvíjeny dvě varianty, které se zásadně liší pouze způsobem vybudování kmitání měřeného objektu. Na universitě 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 i 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, např. v katedrále v Orvietu nebo na deskových ikonách, [20].

Na pracovišti habilitanta byla rozvíjena varianta této metody při aplikaci mechanického rozkmitávání stěny s poškozenou omítkou [22], [23]. Pozornost byla soustředěna zejména na poznání vlivu fázového posunu na citlivost metody a na studium vlivu různých povrchů a materiálu omítek. Pro tyto experimenty byly připraveny zděné cihelné stěny s modelovými defekty, využitě později i pro výše zmíněnou termografii.

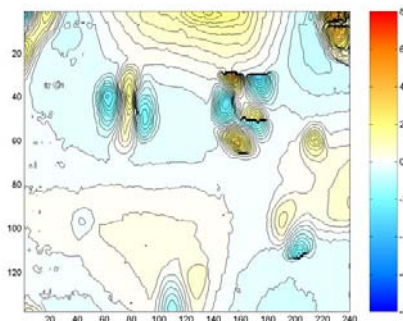
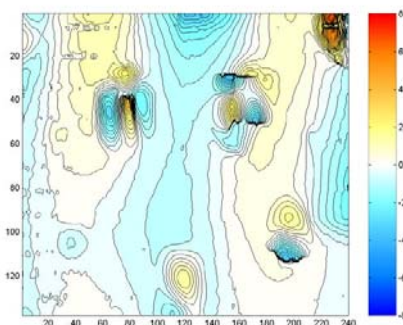
Zed' s umělými defekty byla rozkmitávána elektromagnetickým budičem pružně propojeným s cihelnou zdí pomocí tenké tyčky, planžety a hmoždinky. Budicí signál byl přiváděn z funkčního generátoru a obraz kmitání zdi s omítkou byl měřen pomocí skenovacího laserového čidla (kamery), využívající Dopplerova jevu.

Reprezentativní výsledky jsou uvedeny na obrázcích. Obrázky ukazují tvary kmitání celé soustavy při frekvenci, (v daném případě 940 Hz), odpovídající maximální amplitudě rychlosti kmitání, zjištěné většinou v horním rohu cihelné stěny, přičemž tvar na spodním obrázku odpovídá fázovému posunu o 90°. Je vidět, že viditelnost defektů je silně závislá na fázi, zejména u menších vad.

Při výše popsaných experimentech bylo poměrně snadné rozkmitat stěnu nesoucí omítku. Bylo třeba prozkoumat, jak se situace změní při větší tuhosti zdi a jaký má vliv na měření různý povrch. Modelová zed' 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. Tyto vrstvy zpevnily cihelnou zed' tak, že nebylo možné dosáhnout jejího rozkmitání ve stejných frekvencích, jako v prvním případě.

Poučení z experimentů s metodou měření rozdílného kmitání

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 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 používaná na Universitě Ancona, kde se akusticky budí pouze uvolněné části omítky, je citlivější a má širší uplatnění.



4 MONITOROVÁNÍ CHOVÁNÍ A PORUCH HISTORICKÝCH KONSTRUKCÍ

4.1 Úvod – přehled vybraných metod [1]

4.1.1 Úvodní poznámka

Všechny historické objekty vykazují větší či menší vady a poruchy. Jejich nejtypičtějším projevem bývají trhliny nebo materiálové změny. Určení pravé příčiny vzniku poruchy a předpověď dalšího vývoje není většinou jednoznačná a jednoduchá úloha a vyžaduje dlouhodobější sledování chování poruchy nebo porušené stavby a její reakci na vnější zatížení a vzruchy. Velikost poruchy sama o sobě nedává spolehlivou informaci o její nebezpečnosti. Známy je příklad Brunelleschiho dómu ve Florencii, jehož kopule se porušila trhlinami před několika staletími a objekt je s přestávkami sledován od roku 1695 [24]. Šířka trhlín dosahuje téměř 6 cm, nicméně díky soustavnému monitoringu v posledních 30 letech je rychlost růstu trhliny odhadována na 6 mm za rok a může být včas rozpoznáno nebezpečné zrychlení. Dlouhodobý a kontinuální monitoring poruch a chování historických objektů je proto jednou z nejdůležitějších metod diagnostiky památkových objektů.

4.1.2 Monitorované parametry

Pro hodnocení stavu objektu potřebujeme znát, zda je porucha stabilní, tj. neměnná nebo nestabilní, tj. měnící se v odezvě na působení okolních vlivů a zatížení. Stabilitu odhadujeme na základě geometrických měření tvaru a polohy objektu, konstrukce nebo prvku a vzájemných relací poruchou oddělených částí objektu. Nejčastěji tedy monitorujeme pohyb v okolí trhlín. Důležité je měřit též náklon zdí nebo věží, vertikální pohyby (poklesy nebo zvedání) a rozpínání nebo smršťování objektů či prvků.

Výše zmíněné pohyby jsou vždy ovlivněny změnami teploty a těmito změnami jsou ovlivněna i měřidla, proto je průběh teploty v konstrukci a okolí základním monitorovaným parametrem.

Rada stavebních materiálů je velmi citlivá na změny vlhkosti ať již z hlediska změny objemu (např. dřevo, pískovce, papír, ...) nebo z hlediska změny mechanických vlastností a vyšší přichylnosti k biologickému nebo chemickému napadení. Vlhkostní charakteristiky proto musí být též sledovány. Obvykle se měří relativní vlhkost vzduchu v exteriéru i interiéru, ideálně též objemová vlhkost přímo ve stavebním materiálu.

Z povětrnostních parametrů je vhodné na konstrukcích měřit i rychlost větru, např. na věžích. Další meteorologické údaje lze získat z archivů a pravidelného měření meteorologické služby.

Pro hodnocení agresivity prostředí a odhady prognózy vývoje obecně korozního poškození historických materiálů jsou důležitá specializovaná měření čistoty ovzduší.

Jednotlivé specifické problémy mohou vyžadovat zvláštní nebo doplňková sledování dalších parametrů, např. kolísání hladiny spodní vody.

Součástí monitoringu jsou i zápisy o událostech, které mohou způsobit změny chování objektu, např. o restaurátorských nebo sanačních zásazích, stavebních pracích v okolí objektu, zejména výkopech a o činnosti s vyšší intenzitou dopadů na okolní prostředí (doprava, prašnost apod).

Délka časového období monitorování poruch

Délka monitoringu závisí na typu problému a jeho rozvoji. Některé poruchy se mohou rozvíjet velmi rychle a vyžadují okamžitý zásah, aby se předešlo větším škodám či haváriím. Pak se doporučuje měřit i po sanační práci alespoň po dobu jednoho ročního klimatického cyklu. V ostatních případech pomalého rozvoje účinků vady nebo poruchy je vhodné provádět měření po dobu pěti let, protože kratší doba většinou nedává dostatek údajů pro spolehlivou aproximaci předpovědi budoucího vývoje. Pokud se nestabilní porucha zhoršuje s výraznou tendencí

zpomalování rozvoje, můžeme takové měření po pěti letech ukončit. Pokud je aproximace lineární, zrychlující se nebo na významném defektu bez tendence či jen nevýrazně zpomalená, doporučuje se v měření pokračovat. Monitoring se pak stává systémem varování před havárií.

Metody monitorování poruch

Podle typu poruchy a někdy též podle odhadu pravděpodobné příčiny jejího vzniku se používají různé techniky a metody monitorování. Nejčastěji se měří změny přetvoření a pohyb trhlin. Pro sledování aktivity trhlin byla ve starší literatuře doporučována metoda osazení *kontrolní sádrové destičky*, na níž bylo vyhodnocováno zda se porušila či nikoliv. Tato metoda má velmi omezené použití a pro monitorování je bezcenná. Pokud je dobře aplikována, poskytuje pouze jedinou informaci a sice, že trhlina je nebo není stabilní. Destička musí být upevněna na spojitě zdivo, (nikoliv na omítku nebo uvolněné cihly či kameny) a opatřena datem osazení. Je užitečná zejména po haváriích, kdy došlo k náhlému vzniku poruchy např. účinkem zemětřesení nebo jiného pohybu základové půdy a chceme se přesvědčit, že se situace stabilizovala. Další metodou je využití měřidel s *mechanickou indikací* pohybu nebo přetvoření. Používá se celá řada přístrojů a měřidel, např. měření změny vzdálenosti pevně osazených trnů pomocí posuvného měřidla nebo velmi efektivní a přesné měření vzdálenosti osazených terčů pomocí tzv. *mechanických sázečích tenzometrů*, u nás metodicky rozvíjené na FAST VUT v Brně [25]. Tyto techniky však vyžadují operátora, který měření provádí.

Další užitečné metody jsou založeny na optickém měření. Zahrnují měřicí lupy pro určení šířky trhlin a měřicí mikroskopy, tedy opět techniky vyžadující přítomnost kvalifikovaného operátora nebo průzkumníka. Do této kategorie patří i geodetická měření. Je však i řada optických snímačů založených na interferometrii nebo digitální analýze obrazu.

Pro dlouhodobý monitoring se většinou používají měřidla, využívající převodu deformace na elektrickou veličinu a její digitalizace. V takovém případě totiž můžeme měřit opravdu spojitě nebo v hustých časových řadách a navíc bez potřeby lidské obsluhy nebo s obsluhou, která pouze vyprázdňuje zásobníkové datové ústředny (data loggery). Automaticky snímaná data mohou být bezdrátově zasílána přímo ke zpracovateli nebo vlastníkovi či správci objektu a dále využita pro systém včasného varování.

4.1.3 Monitorování s bezdrátovým přenosem dat

Automatizovaný systém měření používá jako přenosové trasy bezdrátových GSM modemů. Vyšší cena modemů je kompenzována možností okamžité instalace a nezávislostí na možnostech realizace pevné telefonní linky. Jako první krok bylo realizováno propojení měřicí ústředny DAM2 a GSM modemu M20 firmy Siemens. Průmyslový GSM modem M20 svojí vysokou kvalitou zaručuje spolehlivost funkce a dobrou kompatibilitu s ostatními zařízeními. Tato volba se osvědčila i v praxi, neboť v této oblasti nenastaly žádné problémy. Dalším krokem bylo vytvoření centra pro sběr dat z objektů. Toto centrum je provozováno na běžném PC s minimálními hardwarovými nároky, obvykle postačí i počítač kategorie 486. V našem případě bylo použito Pentium MMX na 90 MHz. Jako operační systém byl zvolen Linux, vzhledem k jeho vysoké stabilitě, hardwarové nenáročnosti a dobré integrovatelnosti do heterogenního síťového prostředí. Vlastní systém je pak napsán v jazyce Perl s využitím modulů CPAN. Prezentace shromážděných dat a uživatelský interface jsou realizovány formou webového rozhraní. Jako webový server je použit Apache web server s podporou PHP. Neoddiskovatelnou výhodou takového řešení, založeného výhradně na volně šířitelném softwaru, je maximální finanční úspora a nezávislost na komerčních softwarových firmách. K tomuto PC je opět připojen průmyslový GSM modem M20. Sběrný systém je aktivován na tomto PC automaticky, prostřednictvím procesu 'cron'. Díky tomu, že pro každou komunikaci s jednotlivým objektem je spouštěn samostatný proces, může správce systému zcela libovolně nastavit i periodu snímání dat z objektů tak, aby byla zajištěna dostatečná

rezerva paměťové kapacity v měřicích ústřednách. Při každé relaci jsou data sejmuta, je ověřena jejich integrita, poté jsou z ústředny smazána a je restartováno měření. Díky tomuto přístupu je dále minimalizováno nebezpečí ztráty dat chybami při přenosu. Modemy samozřejmě užívají zabezpečený protokol přenosu, zásadně snižující pravděpodobnost chyb. Vůči uživateli jsou data prezentována formou webové stránky, poskytující možnost stažení jednoho, konkrétního souboru dat, nebo vytvoření uživatelské sestavy z libovolného počtu těchto souborů. Uživatel tedy může využít běžného www prohlížeče a data získává ve formě strukturovaného textu. Tím je opět zajištěna nezávislost na konkrétní platformě zpracovávajícího počítače. Systém je aplikován a dlouhodobě testován při monitorování poruch NKP Novoměstské radnice v Praze 2.

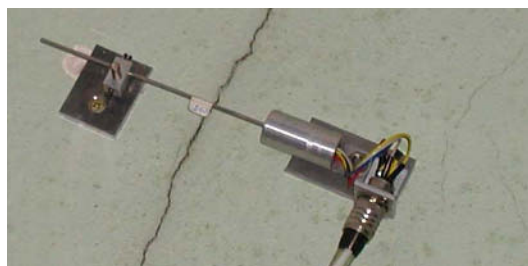
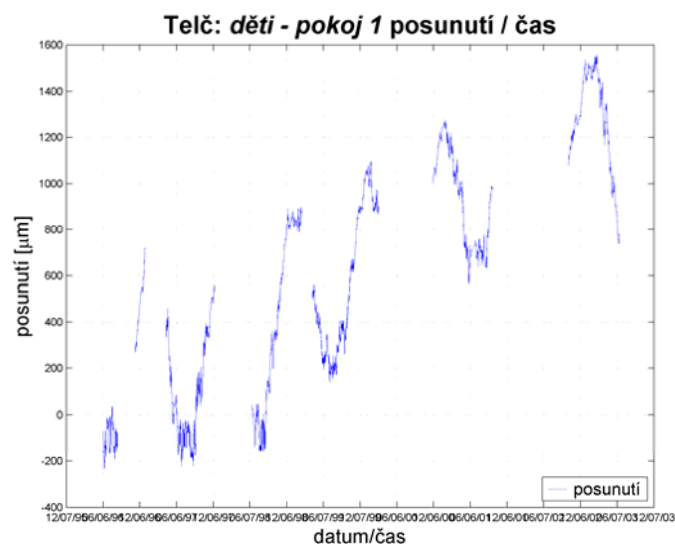
4.2 Příklady sledovaných historických konstrukcí a objektů [1], [26], [27], [28], [29], [30]

4.2.1 Telč – zámek

Na tomto objektu jsou údaje sbírány již od roku 1996. Některá místa se postupem doby měnila podle účelu monitorování a odezvy konstrukce. V Telči se měří na 8 místech a měření probíhá automaticky pomocí měřicích ústředí domácí firmy ROKLAN.

Hlavním problémem monitoringu je skutečnost, že naměřená data jsou zatížena vlivem změny teploty, vlhkosti a složitostmi pohybu stavebních částí oddělených trhlinou. Pro opravu těchto měření bylo třeba nalézt vhodný stavový model, což se podařilo a v dalších obrázcích jsou uváděna data po

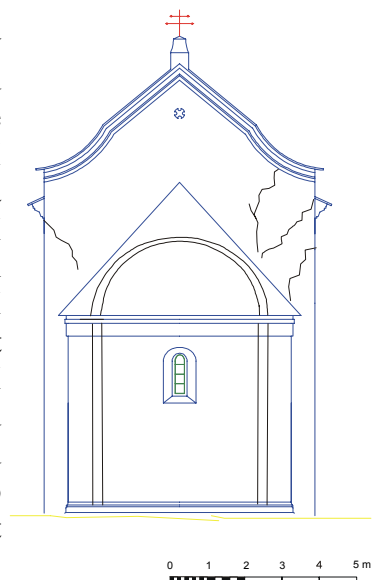
očistění od těchto vlivů. Z obrázku je zřejmé, že manuální měření nemůže zcela vyloučit výpadky dat, způsobené různým selháním lidí nebo techniky. Při automatickém snímání jsou tyto chyby rychle indikovány a mohou být neprodleně napraveny.



4.2.2 Další objekty

Monitoring probíhá či probíhal na dalších památkách a získané výsledky jsou uvedeny v habilitační práci. Ve většině případů jsou pohyby poruch ovlivněny především klimatickým působením. Někdy zhorší podmínky působení konstrukce nevhodný restaurátorský zásah, např. odstranění bílé omítky z tmavšího kamenného zdiva. Dalším nepříznivým faktorem je nekompatibilita konstrukčních prvků z různých materiálů a jejich rozdílná teplotní, případně vlhkostní roztažnost. Jako příklad můžeme uvést románský kostelík v Rovné u Stříbrné Skalice, kde zřejmě vložené dřevěné prvky (trám ve štítě nad vítězným obloukem a novější barokní strop) brání volné teplotní dilataci zdiva a způsobuje vznik trhlin.

Dalším zajímavým příkladem jsou poruchy v triforiu katedrály sv. Víta. Z průzkumu vyplynulo, že více než třetina vadných prvků kružeb triforia je porušena trhlinami přes celý profil, zejména ve spodním čtvrtoblouku. Ke vzniku těchto trhlin přispělo namáhání oblouků tahem v kombinaci s ohybem při přetvořeních, která způsobily teplotní vlivy a objemové změny od proměnné vlhkosti kamene. Zvýšení vlhkostí zároveň způsobuje změnu mechanických vlastností pískovce, především snížení jeho pevnosti. Relativní přetvoření způsobené změnami vlhkostí dosahuje u pískovce hodnot okolo 100 až 300 mikrojedinotek a může způsobit vznik napětí okolo 0,6 až 1 MPa. Při rozdílu teplot mezi masivní částí prvku kružeb triforia (sloupkem a trámečkem) a jemnou kružbou o velikosti okolo 8 stupňů Kelvina vznikají v kružbě napětí stejného řádu, tj. cca 1 MPa. Teplotní rozdíly však mohou lokálně dosáhnout i desítek stupňů. (Porucha je popsána na str. 8).



5 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA PORUCH HISTORICKÝCH KONSTRUKCÍ

5.1 Úvod - přehled vybraných metod [23]

Experimentální metody hrají důležitou roli ve třech třídách problémů analýzy poruch obecně: i) při objasnění nebo nalezení pravděpodobné příčiny poruchy, ii) při studiu chování částečně porušené konstrukce a iii) při zjišťování materiálové nebo konstrukční kvality a spolehlivosti. Při těchto úlohách zkoumáme v prvním případě na fyzikálních modelech (včetně replik historických konstrukcí) následující situace:

- rekonstrukci pravděpodobného stavu napětí v okamžiku havárie (vzniku poruchy),
- odhad vlivu počátečních nebo okrajových podmínek,
- analýzu možných scénářů průběhu poruchy směřujících ke známému výslednému projevu poruchy,
- demonstraci mechanismu zhroucení pro případné soudní projednávání.

Ve druhém případě se za pomoci zatěžovacích zkoušek zaměřujeme na:

- odhad únosnosti nebo zbytkové životnosti porušené konstrukce,
- odhad její bezpečnosti a spolehlivosti,
- zjištění nebo ověření chování konstrukce po opravě či stabilizaci.

Poslední skupina zahrnuje experimentální vyšetřování skutečných konstrukcí s cílem zjistit:

- skryté defekty,
- skutečné rozložení napjatosti konstrukce,
- skutečné tvary kmitání,
- skutečné materiálové charakteristiky,
- charakteristiky šíření poruch, případně únavové vlastnosti (na modelech a vzorcích).

5.2 Studium chování replik a modelů [31], [32], [33]

Pro analýzu poruch i teoretické modely odezvy historických konstrukcí jsou cenné poznatky o jejich chování, získané experimentálním vyšetřováním jejich replik nebo modelů. Ideálním studijním materiálem jsou konstrukce určené k demolici, kde můžeme provádět destruktivní zatěžovací zkoušky. Takových příležitostí je však velmi málo. Častěji jsme schopni získat pro výzkum konstrukční prvky nebo části konstrukcí, například styčníky krovů. Chování historických

tesařských spojů zkoumáme i na jejich replikách. Mohou být zhotoveny z autentického dřeva starého i několik století. Jeho opracování tradičními nástroji je však obtížné a proto obvykle nedosáhneme reprodukce jemných technologických detailů. Příklad takového výzkumu je uveden v článcích [31], [32], [33] a na obrázku typické chování historického tesařského spoje. Samozřejmě u takového materiálu musíme provádět zkoušky materiálových vlastností, protože se liší od čerstvého řeziva.

Klasické tesařské spoje provedené z nového řeziva využívají možností technologicky podobného provedení včetně použití tradičních a často i autentických nástrojů. Získáme tak modely, které reprodukuje typické nedokonalosti historických spojů. Na obrázku vpravo je příklad výsledků studie chování plátového spoje s dvou-směrně podkosenými čely, dřevěnými hmoždíky a kolíky, provedeného čistě tesařskou technologií bez kovových spojovacích prvků a porovnaných s chováním plátového spoje moderního typu, s ocelovými svorníky a zazubenými hmoždíky typu „Bulldog“. Spojované prvky byly zkoušeny při zatížení čistým ohybem. Výsledky ukazují, že tesařské spoje jsou plnohodnotnými variantami, neboť splňují lépe požadavky památkové péče. Dokonce je v průběhu zatěžování jejich deformační chování příznivější, než u spoje svorníkového. Na grafu jsou čísla 13, 14 označeny celistvé trámy, čísla 1, 2, 5, 9, 11, 12 trámy nastavené pomocí svorníkové spoje a zbývající čísla označují tesařské spoje s různým podkosením.

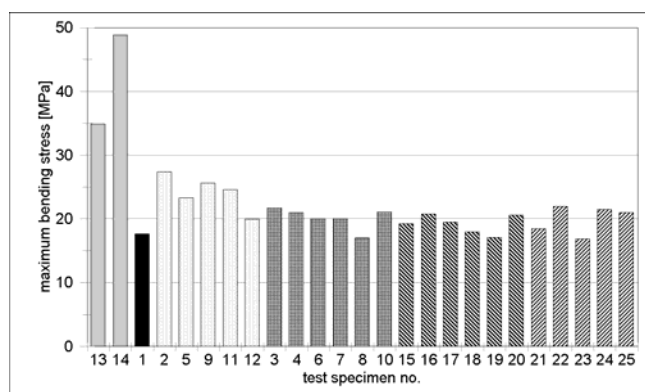
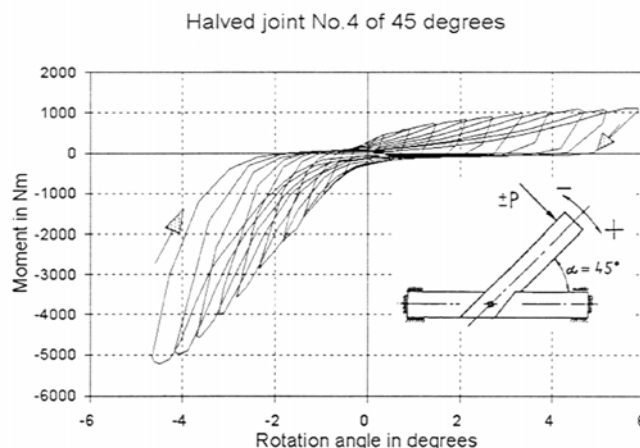
Modely historických konstrukcí nebo objektů ve zmenšeném měřítku jsou dále využívány pro studium jejich aerodynamických a aeroelastických vlastností. Uvedme příklad studia proudění vzduchu kolem části oblouku gotického opěrného systému katedrály sv. Víta v Praze. Pískovcové kvádry oblouku jsou v okolí krabů značně poškozeny erozí a v aerodynamickém tunelu bylo zkoumáno, jak k této erozi přispívá proudění vzduchu, nosoucího plynné, kapalné a pevné polutanty. (Nepublikováno).



6 NESTANDARDNÍ ZKOUŠKY TRADIČNÍCH MATERIÁLŮ

6.1 Úvod

Na pracovišti habilitanta probíhá práce na několika grantových projektech zaměřených na specifické oblasti historických materiálů a konstrukcí. Tato kapitola habilitační práce proto využívá výsledků výzkumu publikovaných v rámci oponovaných grantových zpráv i článků na jejich základě sepsaných. Práce obsahují především vývoj metodiky zkoušek na nestandardních vzorcích z historických materiálů umělých i přírodních.



6.2 Materiálové zkoušky na nestandardních vzorcích [1]

6.2.1 Nestandardní zkoušky malt [35], [36]

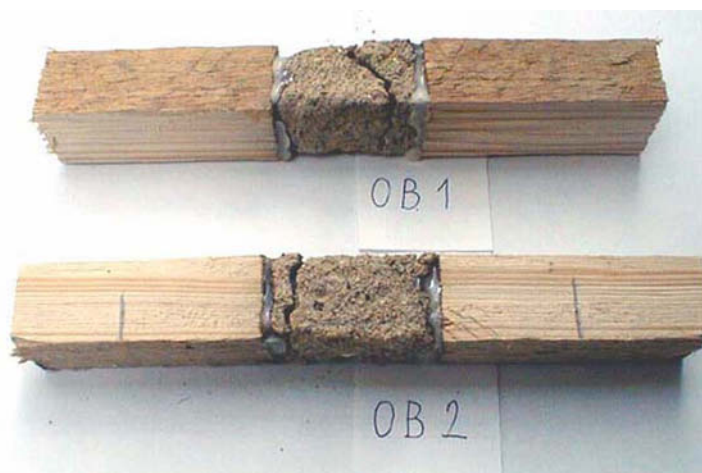
Obecně

Zkoušení malt historických objektů je stále předmětem diskuzí, neboť tradiční pojetí zkoušení malt dává v podstatě nesmyslné výsledky, které jsou pro posouzení skutečné bezpečnosti nebo naopak ohrožení historické konstrukce prakticky nepoužitelné. 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. V poslední době proto sílí požadavky na změnu metodiky zkoušení malt odebraných z historického zdiva a je snaha aplikovat zkušenosti z mechaniky zemin a hornin [34]. To znamená zkoušet maltu v podmínkách *trojosé napjatosti*, což je samozřejmě mnohem náročnější a vyžaduje potřebné přístrojové vybavení. Dále popisovaná metodika využívá jednodušších přístupů a je ovlivněna několika faktory. Především tím, že reálná velikost odebraného vzorku malty z historické konstrukce – zdiva – obvykle nedosahuje ani dvoucentimetrové tloušťky. 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 sádrou na konstantní rozměr. Pro měření modulu pružnosti z koláče vyrábíme tělesa na zkoušku ohybem. 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. Velikost vzorku je však stále malá pro ohybovou zkoušku. Proto jsme navrhli a používáme nastavení vzorku jiným materiálem, tzv. *protézování*.

Protézování

Při protézování je vzorek odebraného materiálu doplněn 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.

Vliv protézování je zanedbatelný podle výsledků zkoušek porovnávacích 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. celo-maltovému dosahoval při zkouškách hodnot od 0,98 do 1,02 [36], pokud došlo k porušení vzorku v jeho střední části (v nenarušené maltě). Při hodnocení výsledku je nutné poznamenat, že se protézované vzorky většinou porušují



protézovaného vzorku ku „standardnímu“, tj. celo-maltovému dosahoval při zkouškách hodnot od 0,98 do 1,02 [36], pokud došlo k porušení vzorku v jeho střední části (v nenarušené maltě). Při hodnocení výsledku je nutné poznamenat, že se protézované vzorky většinou porušují

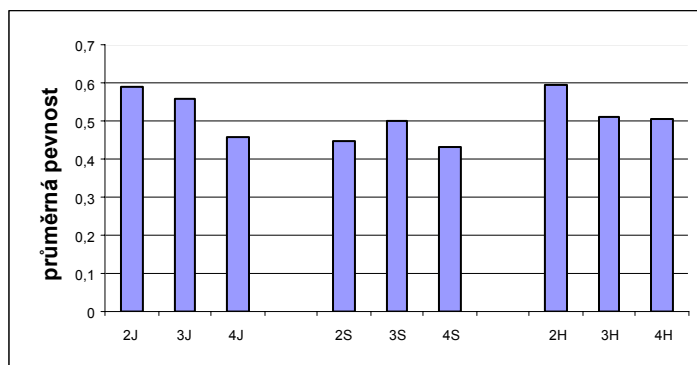
v těsné blízkosti dřevěné protézky, nebo se od ní odtrhnou v tenké přechodové vrstvě malty. V takovém případě je zjištěná pevnost nižší a pohybuje se okolo 65-70 % pevnosti maltového vzorku pro tělesa o průřezu cca 2 × 2 cm, 80-100 % pro tělesa se stranami průřezu 3 × 3 cm. Jak již bylo řečeno, při výrobě 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. Při naší experimentální práci byl tento problém vyřešen bandáží lepené spáry mezi maltou a dřevěnou protézou, viz obrázek. Zkušební tělesa se pak lámala v místě největšího namáhání trámečku. Metoda byla úspěšně použita i pro výzkum lomových charakteristik vápenných malt vyztužených organickými vlákny.



Obecně můžeme říci, že pro informativní hodnoty pevností historických malt odebraných z konkrétních lokalit je metoda protézování dostatečně spolehlivá. Výhodou je zejména snadný odběr vzorků a objektivní výsledek.

Faktor velikosti

Při použití nestandardních vzorků se dále musíme vyrovnat s tzv. faktorem velikosti, tj. vlivem rozměrů vzorku na jeho chování a naměřené mechanické vlastnosti. V době psaní zprávy byl tento faktor nejlépe prozkoumán pro vápenné malty a jejich ohybovou pevnost pilotní sérií zkoušek [36]. Pro trámečky o stranách 2 cm, 3 cm, 4 cm a různé zrnitosti písku (jemná, střední, hrubá) jsou výsledky uspořádány do přiloženého grafu. Je z něj zřejmá očekávaná závislost na velikosti vzorku, tj. na menších vzorcích zjišťujeme větší ohybové pevnosti a pro porovnání s normativními hodnotami musí být korigovány. (Nutno říci, že pro zkoumané spektrum rozměrů průřezu trámečků je tento vliv velmi malý a srovnatelný s rozptylem naměřených hodnot v jednotlivých sadách. Nicméně, nejnovější série testů ukazují, že je tato závislost velmi citlivá na technologii výroby zkušebních tělísek a proto je i nadále předmětem systematického výzkumu.



6.2.2 Cihly a kámen

Obecné doplnění přehledu diagnostických metod

Historické materiály se destruktivně zkoušejí buď v laboratoři na odebraných vzorcích z historických objektů nebo přímo na objektech bez vyjmutí z konstrukce. Jak již bylo řečeno, velikost odebíraného vzorku pro laboratorní zkoušky se může měnit ve velmi širokém rozmezí, daném památkovými aspekty, potřebami průzkumu a technickými možnostmi odběru a zkoušení – od šetrných odběrů malty ze spár a porušených částí zdiva přes odvrtání válcových vzorků až po vybourání jednotlivých staviv. Poslední případ většinou přichází v úvahu při analýzách havárií, kdy máme dostatek materiálu pro zkoušení.

Nejrozšířenější metodou odběru vzorků je jádrové vrtání. Průměr jádra v silikátových stavivech a horninách bývá v mezích 25 mm až 150 mm, obvykle však mezi 50 mm až 100 mm. Pro vrtání se používají duté diamantové vrtáky a elektrické nebo hydraulické vrtačky. Dřevěné jádrové

vývrty jsou obvyklé o průměru několika milimetrů. Odvrtaná jádra ze všech materiálů se do laboratoře přepravují v pouzdrech, které je chrání před změnou vlhkosti a mechanickým poškozením. Jádrové vrtání může být výhodně využito pro další nedestruktivní či destruktivní zkoušky. Především je vhodná aplikace boroskopie pro průzkum vnitřních vrstev konstrukce. Lokálně destruktivně může být otvor využit pro *dilatometrickou zkoušku*, pro vložení rozpěrného zařízení na zkoušku tlakovou a podobné zkoušky, známé z mechaniky hornin. Otvor se dá využít i pro vložení čidel pro dlouhodobý monitoring.

Speciální zkouškou je měření změny deformace při odvrtání jádra, které se provádí buď přímo na odvrtávaném jádře nebo na materiálu v okolí otvoru. Tímto způsobem lze teoreticky zjistit stav napětí ve zdivu před vyvrtáním otvoru, praktické výsledky však nejsou příliš nadějně.

Z dalších destruktivních zkoušek zmíníme zkoušky *odtrhové* a *vytrhávací*. Odtrhové zkoušky již byly zmíněny při popisu šetrně destruktivních zkoušek omítek. U většiny památkových objektů je to také jejich hlavní oblast použití.

Odebraný materiál se používá pro širokou škálu laboratorních analýz, zjišťujících vlastnosti fyzikální včetně mechanických, chemických, mineralogických, biologických na úrovních makro, mikro a dnes i nano pomocí speciálních zařízení a metod, pomocí nichž můžeme určit nejen „zdravotní“ stav materiálů ale i např. historii jeho změn.

Zkoušení malých vzorků

Zkoušení malých vzorků připravených z materiálu odebraného vývrty z cihelného nebo kamenného zdiva přináší rovněž specifické problémy. Především vzorek odebraný obvyklým vodorovným vývrtem je orientován kolmo k poloze, typické pro jeho namáhání v konstrukci. Přitom vlastnosti většiny staviv, pálené cihly nevyjímaje, jsou orientované a závisí na směru zatížení při zkoušce. Vyňatý válec by bylo logické zkoušet ve svislé poloze, výsledky by však nebyly reprezentativní.

V oblasti mechaniky hornin byla vyvinuta zkouška těchto válcových vzorků zatěžováním dvěma proti-lehlými osamělými silami působícími v paprsku průměru. Byl odvozen tzv. *index osamělé síly* (Point Load Index). Zkoušky se provádí na vzorcích o minimální délce 1,5 D. Smykovou pevnost lze z kruhových disků získat pomocí metody tzv. *brazilského disku*, kdy zjišťujeme sílu při porušení disku zatíženého na dvou poruchových přímkách liniovým zatížením tlakem, působícím v paprsku průměru proti sobě. Metoda brazilského disku je v literatuře dobře popsána [37]. I zde je třeba uvažovat vliv faktoru velikosti [38]. Pevnostní zkoušky tohoto typu se provádí na válcích o průměru cca 50 mm a délka tělesa by měla být nejvýše rovna průměru [39].

Jádrové vývrty lze provádět i přes ložnou spáru. Průměr vrtu pak bývá okolo 100 mm a válcový vzorek se zkouší stejným způsobem jako homogenní jádro. Z velkých jádrových vývrťů můžeme vyrobit i válcová tělesa o menších průměrech – cca 30 až 50 mm – dalším vývrtem kolmo na osu válce a získáme tak vzorky pro klasické tlakové zkoušky na válcích, jejich štíhlost (poměr výšky ku průměru) by měla být minimálně 1,5.

Dřevo

Metoda odběru a zkoušení malých vzorků pro určení mechanických vlastností dřeva, především jeho pevnosti, je metodou polodestruktivní vzhledem k statickému ovlivnění vyšetřovaného prvku, neboť odebíraný vzorek je z tohoto hlediska svou velikostí zanedbatelný. Vzorek sám je pak zkoušen destruktivně. Velikost vzorku zároveň není v rozporu s obvyklými požadavky památkové péče na šetrnou intervenci. Výhodou metody je to, že vzorek může být odebrán z míst určených vizuální prohlídkou jako nevhodnější, že se jedná o metodu přímou, že výsledek může být korelován s jinými lokálně aplikovatelnými nepřímými metodami a že můžeme určovat nezávisle tlakovou i tahovou charakteristiku. Dřevo má totiž velmi slabou korelaci mezi tahovou a tlakovou pevností. Autor rozvíjí v mezinárodní spolupráci dvě techniky: metodu *jádrových vývrťů* a metodu *nestandardních tahových zkoušek* [40]. Při metodě jádrových vývrťů se postupuje podobně, jako

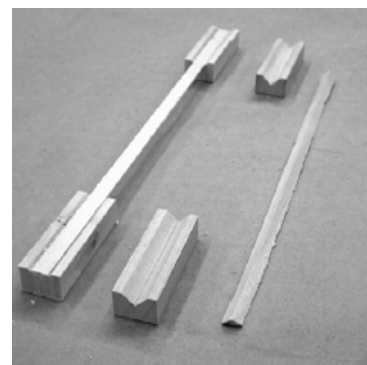
u výše zmíněných zkoušek na cihelném zdivu, kamenu či betonu. Jediným rozdílem je, že povaha dřeva jako velmi anisotropního materiálu s výrazně rozdílnými směrově orientovanými vlastnostmi, vyžaduje speciální přístupy. Studujeme-li pevnosti dřeva, zajímá nás zejména pevnost ve směru vláken, neboť určuje další mechanické vlastnosti prvku, jako je jeho ohybová, tahová nebo tlaková pevnost. To platí pro zdravé a čerstvé řezivo. Historické dřevo má ještě složitější chování vzhledem k časovým změnám jeho vlastností a s ohledem na obvykle značný rozsah biologického poškození. Je si proto třeba uvědomit, že pevnost čerstvého řeziva není totožná s pevností historického dřeva a ani materiálová anisotropie nemá stejný charakter. Nicméně je důležité, že pevnost napříč vlákny je výrazně nižší, než podél vláken a snažíme se proto namáhání, které by způsobilo tah napříč vlákny v konstrukci eliminovat. Vzorek pro jádrovou tlakovou zkoušku odebíráme na pracovišti řešitele vyvinutým přípravkem na vrtačku a dutým vrtákem o vnitřním průměru 4,5 mm ve směru kolmém na letokruhy v délce větší než 40 mm. Vnější průměr vrtáku je 11 mm a tento otvor v dřevěném prvku po odběru jádra je zazátkován dřevěným kolíkem. Jádro je přeneseno do laboratoře ve schránce,



která brání jeho poškození a změně vlhkosti. Pro vlastní zkoušku byl vyvinut přípravek umožňující zatěžování tlakem kolmo na osu jádra a ve směru vláken dřeva, viz obrázek nahoře. Sklon změřené funkční závislosti mezi působící silou a měřenou deformací sice nepředstavuje klasickou závislost podle Hookova zákona, ale s modulem pružnosti materiálu koreluje. Podobně koreluje i počátek tečení a výrazné změkčení materiálu.

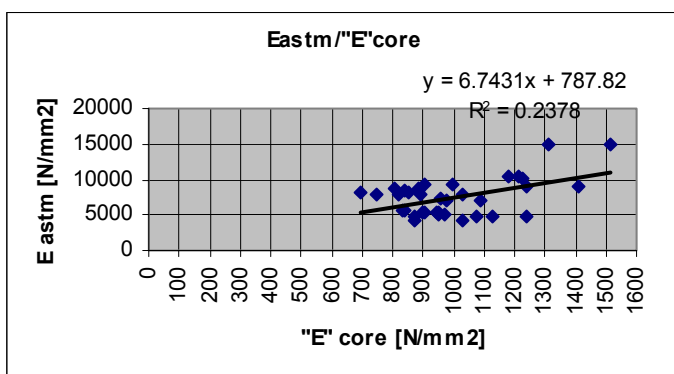


Pro určení tahové pevnosti se odebírá jednoduchým způsobem pomocí přestavitelné okružní pilky trojúhelníková lišta. Opatří se přilepenými koncovkami, viz obrázek, a je připravena k nestandardní zkoušce tahem. Tahový vzorek se vkládá do jednoduchých čelistí, navržených pro tento účel a zatěžuje v běžném zkušebním stroji. Tato zkouška je sice nestandardní, ale svým pojetím se standardní zkoušce podle ASTM [41] velmi blíží, neboť používá podobnou velikost průřezové plochy vzorku (8 mm² oproti 20 mm²) a stejně jednoduché uspořádání, eliminující parazitní ohyb.



Výsledky dosažené touto zkouškou není třeba korelovat a mohou být prohlášeny za srovnatelné se standardním testem. Pro zajištění požadovaného porušení ve střední části tahového tělíka se doporučuje lehce zmenšit průřez obroušením při zachování konstantního profilu na střední části a hladkým přechodem ke koncům.

Mechanické charakteristiky určené výše popsanými zkouškami musí být pro posuzování bezpečnosti konstrukce a dimenzování převedeny na technické vlastnosti řeziva, které berou v úvahu redukci lokálně zjištěné pevnosti na čistém dřevě v důsledku defektů, které se běžně vyskytují na velkých prvcích (suky, praskliny a další vady dřeva).



Korelace modulu pružnosti v tlaku podle normy ASTM a sklonu pracovního diagramu („modulu pružnosti“) zjištěného na jádrových vývrtech („E“_{core}) je na obrázku.

6.2.3 Speciální materiály

Poslední část kapitoly je věnována příkladu zjišťování mechanických vlastností netypického materiálu – zvířecích chlupů

při výzkumu vápenných historických malt vyztužených organickými vlákny. Pro měření byl využit optický mikroskop s digitální video kamerou pro natáčení průběhu deformace vlákna při zatěžování. Vlákno bylo opatřeno kontrastními značkami a v mikroskopu se sledoval posun dvou rozhraní mezi značkou a vláknem. Posuny pak byly vyhodnocovány automaticky z digitalizovaných záznamů. Podrobněji je experiment popsán v publikaci [42]. Dosažené pevnosti zvířecích vláken jsou dostatečně vysoké pro účinné zapojení vláken jako mikrovýztuže zvyšující tahovou pevnost kompozitu po zatvrdnutí matrice. První větev bilineárního typu pracovního diagramu je typická pro úroveň napětí, která značně přesahuje tahovou pevnost vápenné matrice malty. Materiály nevykazují homogenní chování a jejich pracovní diagramy ukazují na výraznou závislost na uspořádání pevnostních fibril uvnitř vlastní struktury chlupu. Zjištěná prodleva se zpevněním je typická pro přeorientování méně deformovatelných fibril během přetváření vlákna.

7 ZÁVĚR

Výsledky v obecné části práce přispívají k rozvoji teorie analýzy poruch a jsou aplikovatelné ve forenzním inženýrství. Ve speciální části jsou rozvíjeny metody, které zohledňují jak specifika historických materiálů a konstrukcí, tak požadavky památkové péče. Vytváří se tak svébytná část oboru nedestruktivního a polodestruktivního zkušebnictví, kde nelze použít řadu přístupů a zásad, běžných v klasických NDT aplikacích. Například je velmi obtížné získávat statisticky významné soubory dat nebo používat standardní zkušební tělesa. Objevují se otázky, které je třeba dále vědecky zkoumat. Nicméně dosažené výsledky jsou již dnes využívány pro zkvalitnění záchranu evropského kulturního dědictví a výchovy specialistů pro obor památkové péče.

8 SEZNAM ODKAZŮ NA LITERATURU

- [1] Drdácký, M., Bryscejn, J., Lesák, J., Slížková, Z., Urushadze, Sh.: Monitorování vlivů prostředí na kulturní památky a diagnostika jejich poruch, *ÚTAM AV ČR*, Prosinec 2003, 170 stran
- [2] Drdácký, M.F.: Learning from failures – experience, achievements and prospects, in *“Forensic engineering – the investigation of failures”* (ed. B.S.Neale), Inst. Of Civil Engineers, T.Telford Publishing, London, 2001, str. 165-174
- [3] Olšák, P., Kuda, R., Kos, J.: Vady, poruchy, údržba a změny staveb, VUT Brno, září 1978
- [4] Carper, K.L. (ed.): Forensic Engineering, Elsevier, 1988
- [5] Drdácký, M., Kratěna, J.: Forensic practice in the Czech Republic, *Proc. of the 2nd Congress “Forensic Engineering”* (ed. Rens, Rendon-Herrero, Bosela), ASCE Reston, 2000, str. 322-331.
- [6] Drdácký, M.: Trends in development of optimum design of steel structures, *Proc. Int. Conf. “Metal Constructions”*, Vol. 3, Katowice, 1979, str. 95-98
- [7] Blockley, D.I. (ed.): Engineering Safety, McGraw-Hill Book Europe, 1992

- [8] Schmidt, W.: Engineering sciences and the preservation of historic buildings – Structural safety calculations: Introduction, *Unpublished communication ISCARSAH ICOMOS*, 2003
- [9] Charta ICOMOS “Analysis, conservation and structural restoration of cultural heritage, ICOMOS General Assembly, Victoria Falls, Zimbabwe, November 2003
- [10] Drdáký, M.: Comments on evaluation of failures in civil engineering, in “*Lessons from Structural Failures 3*” (ed. M.Drdáký), *Proc. of the 3rd Int. Conf.*, Prague, 1993, str. 1-4
- [11] Hollis, M.: *Surveying Buildings*, Rics Books, 4.vydání, 2001.
- [12] Clancy, B. (ed.): *Surveys and inspections of buildings and similar structures*, The Institution of Structural Engineers, 1991.
- [13] Hacar, B., Waitzman, K. 1944. Vyšetřování stavebních hmot a konstrukcí paprsky gama. *Technický obzor* č. 15 a 16.
- [14] Höning, A., Zapletal, V.: Nedestruktivní zkušebnictví, *VUT Brno – neprodejná skripta pro PGS „Technické znalectví“*, 1982.
- [15] Anthony, R., Drdáký, M., Jirovský, I., Kasal, B.: Rentgenová diagnostika dřevěných historických konstrukcí, *Proc. 4th Int. Conf. “Building Materials and Testing”*, str. 138-140, ORGWARE Stupava, 2003
- [16] Rossi, P.P.: Analysis of mechanical characteristics of brick masonry tested by means of non-destructive in situ tests, *ISMES Publication No. 167*, 1982, 9 str.
- [17] Drdáký, M.: Vybrané metody stavební diagnostiky, *Sborník EAN' 85*, Košice, 1985, s. 24-26.
- [18] Adámek, J., Stehlík, M.: Experimentální ověřování metody plochých lisů pro zjišťování napjatosti a modulů pružnosti cihelného zdiva, *Zpráva ke grantu „Historické konstrukce a materiály při opakovaném namáhání“ GAČR 103/97/S051*, VUT Brno, 1999, 38 str.
- [19] Drdáký, M., Jirovský, I., Lesák, J.: Nedestruktivní průzkum zděných a dřevěných konstrukcí Mariánské věže na hradě Karlštejně, *Zpráva ÚTAM AV ČR*, prosinec 2003, 63 str.
- [20] Castellini, P., Paone, N., Tomasini, E. P.: The Laser Doppler Vibrometer as an Instrument for Non-Intrusive Diagnostic of Works of Art: Application to Fresco Painting, *Optics & Lasers in Engineering*, Vol. 25, pp. 227-246, May 1996.
- [21] Michoinová, D., Lesák, J., Drdáký, M., Urushadze, Sh.: Inspection and efficiency of consolidation of delaminated parts of historic lime plasters, (invited lecture) *Proc. Of the 5th International Congress CICOP “Restoration of Architectural Heritage Firenze 2000”*, Florence, 2000, CD ROM
- [22] Drdáký, M., Lesák, J., Michoinová, D., Svoboda, J., Urushadze, Sh.: Contact-Less Methods for Identification of Cohesion Loss in Lime Mortar Renders, *Proc. “Experimental Stress Analysis 2001”*, str. 41-46, CTU Prague, 2001.
- [23] Drdáký, M.: Structural failures and experimental investigations of lightweight structures, (invited key-note lecture), in “*Lightweight Structures in Civil Engineering – Contemporary Problems*” (ed. J.B.Obrebski), Warsaw, 2002.
- [24] Bartoli, G., Chiarugi, A., Gusella, V.: Monitoring systems on historic buildings: The Brunelleschi Dome, *Journal of Structural Engineering*, June 1996, str. 663-673
- [25] Cikrle, P.: Diagnostika poruch staveb – dlouhodobé sledování trhlin ve zdivu a měření posunů, *Doktorská disertační práce*, VUT Brno, 2002
- [26] Drdáký, M.: Monitorování poruch zdiva Novoměstské radnice v Praze 2 – Novém Městě, *Zpráva ÚTAM AV ČR*, Praha/Telč, listopad 2002, 29 str.

- [27] Drdácký, M.: Monitorování a analýza poruch kostela sv. Jakuba Většího ve Stříbrné Skalici-Rovné, Zpráva ÚTAM AV ČR, srpen 1999, 30 str.
- [28] Drdácký, M.: On two damage problems of sandstone sacral buildings – St. Vitus in Prague and St. Jacob in Rovné, *Proc.Int. Congr. „Quarry-Laboratory-Monument“*, Vol. II, Pavia 2000
- [29] Drdácký, M.: Notes on failures of stone elements, *Proc. 2nd International Workshop on „Lessons from Structural Failures 2“*, Aristocrat Telč, str. 59-66, 1992
- [30] Drdácký, M.: Poruchy kamenných prvků svatovítské katedrály, *Materiály a technologie pro stavbu*, č.2, str.6-10, 1995
- [31] Drdácký, M., Wald, F., Sokol, Z.: Sensitivity of historic timber structures to point response, *Proc. Of the 40th Anniversary Congress of IASS Madrid (ed. R.Astudillo and A.J.Madrid)*, Vol. II, pp.G1-G10, CEDEX Madrid, 1999.
- [32] Drdácký, M., Wald, F., Mareš, J., Sokol, Z.: Component method for historical timber joints, in *"The Paramount Role of Joints into the Reliable Response of Structures (ed. C. C. Baniotopoulos and F. Wald)*, NATO Science Series, ISBN 0-7923-6701-4 (PB), ISBN 0-7923-6700-6 (HB), pp. 417-424, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 2000
- [33] Drdácký, M.: Zkoušky historických tesařských spojů, *Sborník odborného semináře "Křivoklát 2002 – Netradiční způsoby oprav historických tesařských konstrukcí"*, Hrad Křivoklát, 19. září 2002, str. 22-23, STOP 2002
- [34] Van Balen, K.: Weaker may be better: insights into the durability of lime, prezentace na http://www.kuleuven.ac.be/bwk/materials/Research/KVB/GCI_2/GCI_2.htm
- [35] Drdácký, M., Michoinová, D., Procházka, P.P.: Maltovinové směsi vyztužené vlákny pro obnovu a záchranu uměleckých památek, *Výzkumná zpráva ÚTAM AV ČR*, Pros. 2002, 146 str.
- [36] Drdácký, M.F., Michoinová, D.: Lime mortars with natural fibres, in *Proc. Int. Symp. "Brittle Matrix Composites 7"*, A.M.Brandt, V.C.Li and I.H.Marshall, eds., ZTUREK RSI and Woodhead Publ., Warsaw 2003, pp. 523-532
- [37] Olesen, J.F., _stergaard, L., Stang, H.: Fracture mechanics and plasticity modelling of the split cylinder tests, *Proc. Int. Symp. "Brittle Matrix Composites 7"*, A.M. Brandt, V.C.Li and I.H.Marshall (eds.), Warsaw, Oct.13-15, 2003, Woodehead Publish, Warsaw 2003, pp. 467-476
- [38] Rocco, C., Guinea, G.V., Planas, J., Elices, M.: Size effect and boundary conditions in the Brazilian test: theoretical analysis, *Materials and Structures*, 32, 1999, pp. 437-444
- [39] Egermann, R.: Tragfähigkeitsuntersuchungen an Bauwerken aus Naturstein, in "Historische Bauwerke", Arbeitshefte des Sonderforschungsberieches 315, Heft 14/1996, Universität Karlsruhe, str. 99-106
- [40] Kasal, B., Drdácký, M., Jirovský, I.: Semi-destructive methods for evaluation timber structures, *Proc. STREMAH VIII, Series: Advances in Architecture*, Vol. 15, WIT Press, 2003, str. 835-842
- [41] ASTM D 143
- [42] Vavřík, D., Drdácký, M.: Experimental determination of stress-strain dependence for thin fibres, CD ROM "Engineering Mechanics 2003", National Conf. with Int. Participation, Svratka, May 12-15, ISBN 80-86246-18-3, ITAM CAS CZ, Prague, 2003

ABSTRACT

The habilitation thesis summarises author's selected works published in professional books, journals and proceedings of international conferences as well as parts of reviewed research reports, mainly concerned with problems of diagnostics of historic materials and structures, grouped into four main thematic areas.

The first part is focused on failure analysis and presents theoretical comments on definition of failure, criteria for their assessment and a new classification system based on pathology, teratology and exceptional events' features. There are discussed influences and forces acting on historic materials and structures, and typical causes of their damage or failure. This part contains also a proposed catalogue form for damage or failure documentation and for creation of a database.

The next part is concentrated on selected methods of diagnostics of historic structures. After a brief survey of typical methods, the author presents results of research into thermography (passive as well as impulse or active one), radiography, differential surface vibration measurements and special NDT methods (microdrilling). There are described tests on lime mortar rendering with artificially made detachment defects. Differential vibration analysis takes advantage of differences in rigidity of loosed parts of plaster against firmly fixed parts to a stiff wall, which generates differences in modes of vibration. These modes can be recorded using laser Doppler interferometry and a scanning camera to pick up signals across the measured field. The determined defects were further compared to indications given by thermal radiation measurements on the test specimen which was cooled after prior long term heating.

The following chapter gives a review of the author's monitoring measurements on defects of important Czech monuments. It discusses monitored parameters, duration period of monitoring, necessary for reasonable results, monitoring methods and equipment, including remote control and automatic data acquisition. It further presents examples of damages caused mainly by temperature and humidity variations in sandstone churches – the St. Vitus Cathedral in Prague and St. Jacob's Church in Rovné, monitoring of damages caused by a heavy flood and some other examples.

Structural failures and their analysis represent a valuable source of information on structural performance under real loading and operational conditions. There are presented selected typical examples of failures and defects classified according to the above mentioned author's system. In the first group namely the following items are discussed: repeated environmental or force action on structures, e.g. corrosion of thin-walled structures and cumulation of damage and fatigue, material degradation, e.g. delamination of thin surface layers, service conditions, insufficient knowledge, construction and structural assembly problems (thin-walled scaffolding systems). In the second group, there are analyzed examples of conceptual errors, design errors. The last group is concentrated on damages due to extreme wind, fire and collision with vehicles. In all discussed cases, a useful role of experimental and testing methods in the investigation process is demonstrated. Problems of traditional carpentry joints are discussed in detail.

The last group of papers is focused on non-standard testing of traditional materials – mortars, stones, wood and fibres. Testing of small samples of mortar using their prolongation by means of timber "prostheses" is accompanied by results of recent investigations into behaviour of lime mortars modified with natural fibres or fibrous particles. Further, newly developed semi-destructive testing methods that can be used to examine the in-situ mechanical properties of timber structural members are described. The methods can be used to measure tensile modulus of elasticity and strength, density and moisture content. Special devices to extract micro-tensile and compression specimens were developed and tested in laboratory as well as in practice. The technique gives direct measurements of tensile strength and modulus of elasticity of the material without compromising the integrity and strength of the structure under investigation. The last paper presents experimental determination of mechanical properties of different types of animal hair, using an optical method developed especially for this purpose.