

# Pokročilé technologie průzkumů historických konstrukcí

Miloš Drdácák, Jaroslav Lesák, Jan Válek

Při průzkumech historických konstrukcí i památkových a uměleckých objektů je většinou velmi užitečná možnost zobrazení údajů, která nejsou na první pohled rozpoznatelná nebo dokonce nejsou na povrchu viditelná. V této kapitole se proto zaměřujeme na technologie a techniky umožňující vidět ve větší ploše stav historických konstrukcí a jejich materiálů.

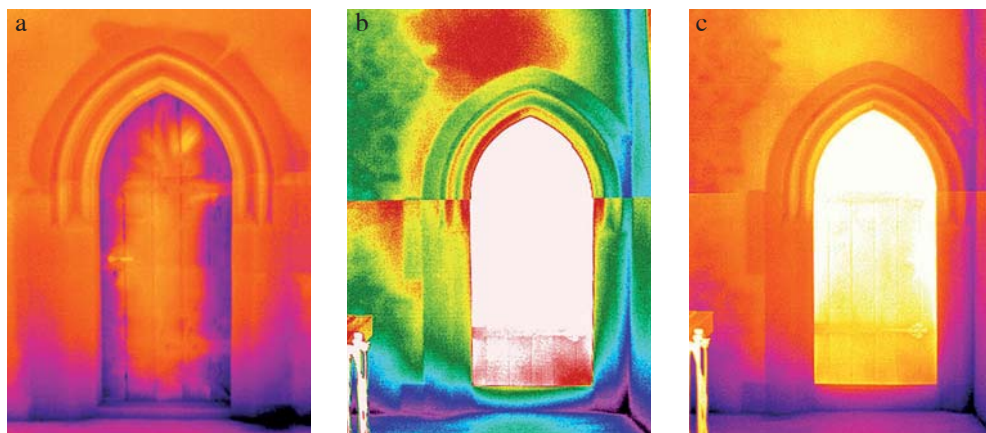
## Termografie

Rozložení povrchových teplot na objektu ukazuje na jeho vnitřní vlastnosti nebo stav. Každý objekt má jistou schopnost odrážet, přijímat, akumulovat, vést a vyzařovat tepelnou energii. Intenzita těchto jevů je závislá na kvalitě povrchu tělesa, na fyzikálních, popřípadě chemických vlastnostech materiálu, na přítomnosti dutin nebo diskontinuit a na vlhkosti nasákových materiálů. Uvedené charakteristiky jsou na většině historických konstrukcí velmi proměnné, a proto můžeme pozorovat na povrchu objektu rozdílné rozložení teplot, ze kterého můžeme odvozovat pravděpodobné vnitřní vlastnosti nebo stav tělesa.

Povrchová teplota tělesa je ovlivněna vedením tepelného toku uvnitř konstrukce – izolanty a pórovité materiály vedou teplo hůře, proto se takové části konstrukce při chladnutí jeví studenější, při zahřívání naopak teplejší. Stejně se projevuje i přítomnost dutin. Studenější jsou obecně i vlhké povrchy vzhledem k jejich ochlazování při odpařování. Tepelná vodivost je závislá na specifické hmotnosti jednotlivých složek konstrukce, a proto jsou při termografii velmi dobře viditelné rozdíly mezi cihlou a maltou, zazdívkou otvorů a zdivo různého stáří nebo složení, omítkou skrytá kamenná ostění nebo ocelová či železná táhla, kleštiny, skryté betonové prvky apod.

Povrchovou teplotu můžeme měřit kontaktním způsobem, různými čidly a kontaktními teploměry, nebo bezkontaktním způsobem v infračervené oblasti pomocí termovizních kamer. Tento druhý způsob je mnohem efektivnější a v oblasti průzkumů památek se používá asi již třicet let.

Interpretace termogramů však vyžaduje určitou zkušenost a znalost materiálových charakteristik, popisujících zářivost, odrazivost a pohltivost. Hlavním referenčním parametrem je součinitel intenzity zářivosti, který se u stavebních materiálů pohybuje ve velmi úzkém pásmu hodnot mezi 0,85 až 0,95. Z toho plyne, že pro průzkum architektonického dědictví je třeba používat zařízení poskytující termogramy s vysokým rozlišením. Typický přístroj sestává z kamery převádějící infračervené záření na zesílený elektrický signál, dále zpracováváný do obrázků z výrazněných různou úrovní šedi nebo falešným obarvením.



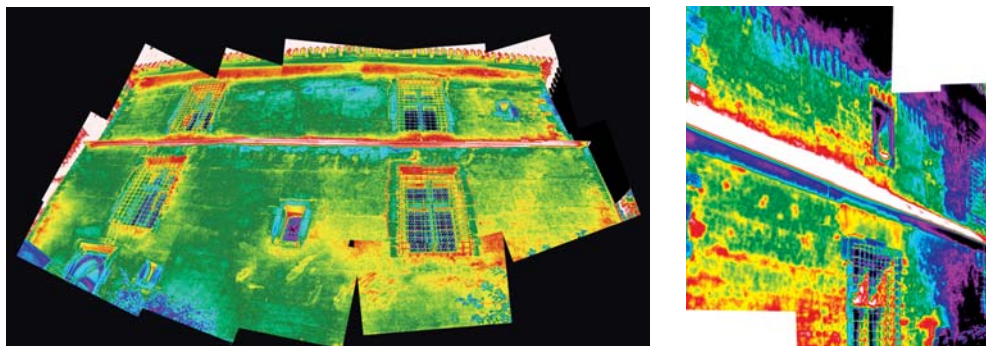
**OBRÁZEK 173:** Příklady termogramů ostění dveří hradu Karlštejna v Mariánské věži. (Na obrázku je ukázáno, že naměřené termogramy vyžadují další úpravy dat pro získání kvalitních vizualizací.)

Povrchová teplota objektu samozřejmě nejlépe zobrazuje situaci na povrchu, ale je ovlivněna vlastnostmi a stavem materiálu v hloubce několika centimetrů, přibližně okolo 10 cm, pod povrchem. Rozlišujeme tzv. pasivní termografii, tj. takovou, která využívá přirozených rozdílů teplot mezi objektem a vnějším prostředím pro vznik tepelného toku, ovlivňujícího rozložení povrchových teplot, a aktivní (impulsní) termografií, která může mít ještě různé varianty. Při aktivní termografii je konstrukce lokálně zahřívána a sleduje se proces zahřívání nebo chladnutí (Laurens 1983).

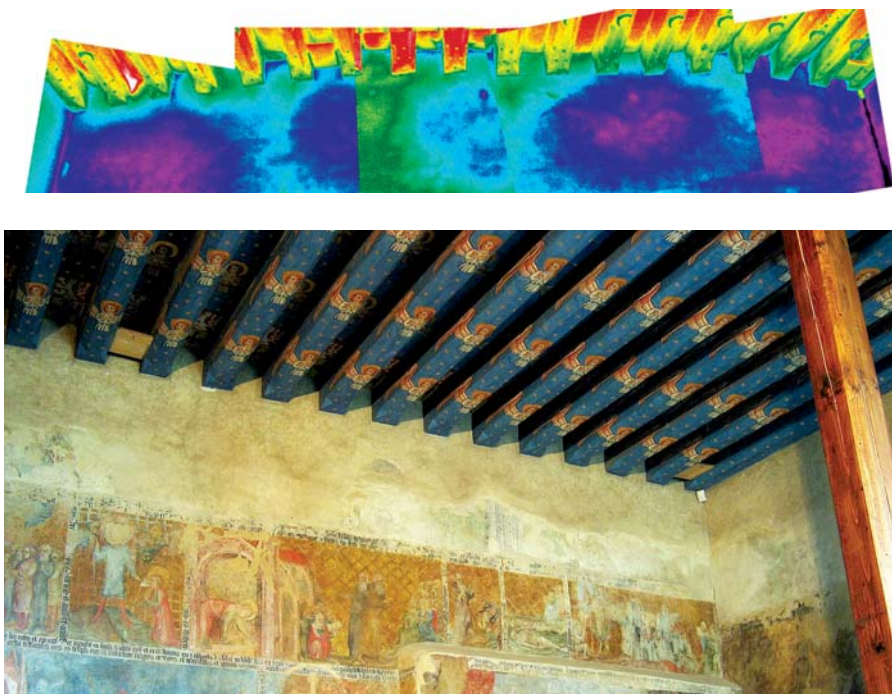
Při vyhodnocování termogramů musíme mít na paměti, že do výsledného rozložení teplot se sčítají všechny parametry, které mohou povrchovou teplotu ovlivnit. Jedná se o tepelné technické charakteristiky přítomných materiálů, vnitřní defekty a dutiny, vlhkost, nerovnoměrné působení okolního prostředí (např. oslunění nebo zastínění a proudění vzduchu okolo objektu). Vlhkost je dále silně závislá na pórovitosti materiálu, jeho chemickém složení a na přítomnosti biofilmu, který obecně většinou vlhkost zvyšuje (Maierhofer a Leipold 2001).

Pro aplikaci je dobré vědět, že existuje prahová hodnota okolo 0,1 °C, která určuje mez, nad kterou naměřený rozdíl mezi povrchovou teplotou omítky a okolí indikuje problémy. V rámci grantového úkolu MK byl v minulých letech proveden dosti podrobný termografický průzkum Mariánské věže hradu Karlštejna. Jeho cílem bylo nalézt skryté stopy po stavebních úpravách a zejména prvky, důležité pro statický návrh probíhajících restaurátorských prací a oprav. Na termogramech je velmi dobře viditelné armování zdiva kamennými prvky pod stávající omítkou (např. **obr. 173a**). Potvrzuje se novost některých ostění gotických dveřních otvorů, neboť jejich kamenné prvky jsou opracovány bez přečnívajících do zdiva zavázaných částí (**obr. 173b**). Na tomto obrázku je zároveň velmi dobře vidět, že při vkládání nového ostění byla nově vyzděna část nadpraží. Na termogramu je dobře viditelná struktura kamenného zdiva včetně rozlišitelné vzdálenosti pracovních spár. Samozřejmě jsou výrazně zaznamenána místa se zvýšenou vlhkostí u podlahy a v koutech místností. Technologické a materiálové vlivy byly dobře rozpoznatelné i na termogramu fasády (**obr. 174**).

Dále bylo pod stropem v kostele identifikováno skutečné umístění železných táhel nad schodištěm do věže (**obr. 175**).



**OBRÁZEK 174:** Termogramy fasád s viditelnou strukturou zdiva pod omítkou, pracovními spárami zdění, doplňováním zdiva, kamennými ostěnými, umístěním táhel apod.

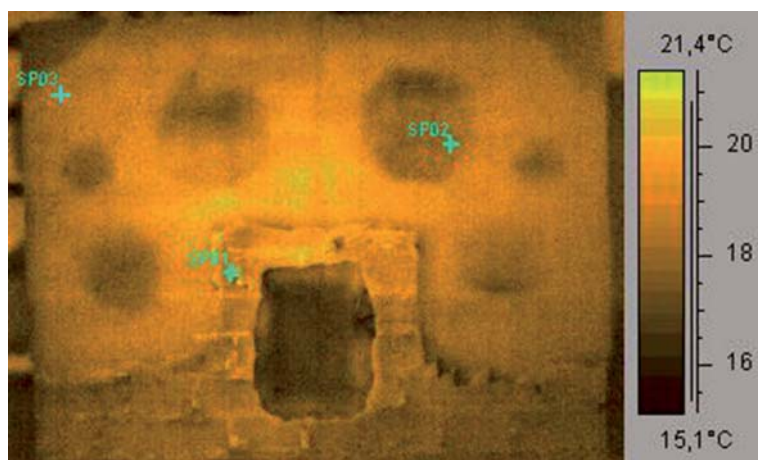


**OBRÁZEK 175:** Na termogramu dobře patrné umístění táhel ve zdivu kostela

Významným oborem aplikace termografie je diagnostika podpovrchových poruch. Analýza procesů oteplování a chladnutí nekovových těles při nebo po zahřívání vnitřním nebo vnějším zdrojem je teoreticky dobře propracována. Ve stavebnictví se většinou aplikace termografie omezovaly na pasivní variantu zjišťování tepelných mostů. Aktivní termografie je vhodná pro zjišťování defektů uvnitř málo vodivých materiálů, a proto byly zkoumány její možnosti při hledání uvolněných povrchových vrstev nebo hlubších podpovrchových defektů.



**OBRÁZEK 176:** Příprava modelové zdi se separačními fóliemi, které zabráňovaly kontaktu omítky se zdivem a tak modelovaly odtržení omítky nebo obkladu od povrchu (vlevo), zeď při omítání (střed) a kombinace omítky s obklady a mozaikou

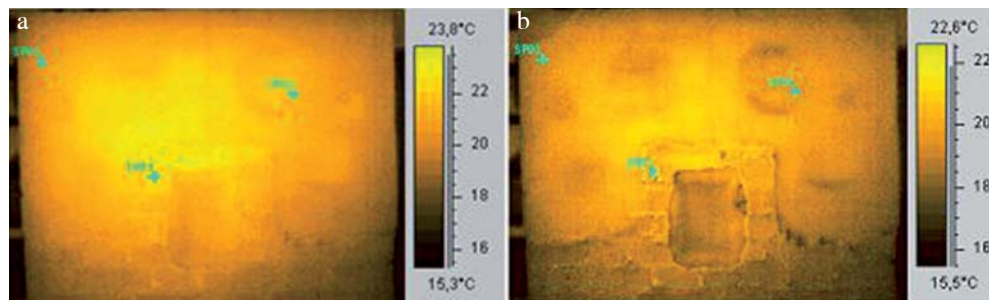


**OBRÁZEK 177:** Rozdělení teplot na vyhřáté zdi. Velmi dobře jsou vidět rozdílné vrstvy materiálu (spáry, lepicí omítka pod přilepenou deskou)

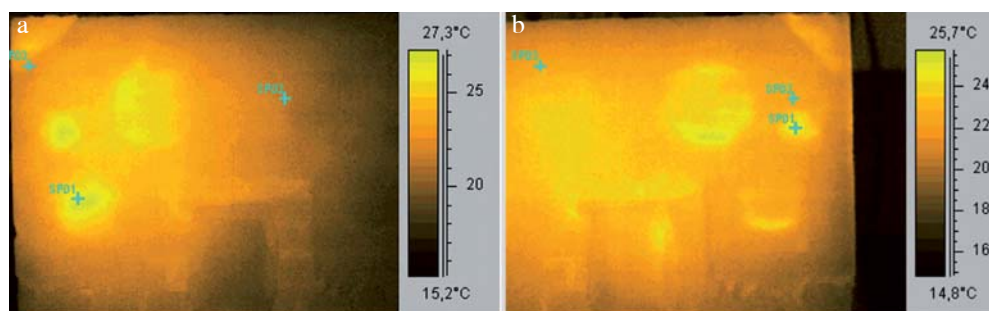
Pro tento výzkum byla pořízena modelová zeď s dobře definovanými defekty (**obr. 176**) a na ní se testovaly různé metody bezkontaktní diagnostiky poruch skrytých pod povrchem.

Při detekci poruch se nejlépe osvědčil postup, při kterém je prohřátá stěna vystavena rychlému chladnutí, např. po teplém dnu je vystavena večernímu chladu. Při chladnutí se velice výrazně projevují nejen podpovrchové defekty, ale většinou je zřetelně vidět i struktura zdiva, maltové spáry a jiné materiálové nehomogenity, **obr. 177** (Drdácký a Lesák 2006).

V tomto případě byla zeď předehřívána na maximální teplotu 24 °C po několik hodin a měření probíhalo při chladnutí. Části omítky, kryjící defekty, chladnou rychleji a projevují se tmavými skvrnami. Je obtížné zvolit okamžik měření pro dosažení maximálního efektu. Většinou se u běžně omítaného zdiva jedná o několik minut až přibližně hodinu. Čas je samozřejmě závislý na rychlosti ochlazování.



**OBRÁZEK 178:** Rozložení teplot na povrchu zdi s defekty přilnavosti omítky při počátku chladnutí (vlevo) a po hodině v laboratorním prostředí cca 20 °C (vpravo)

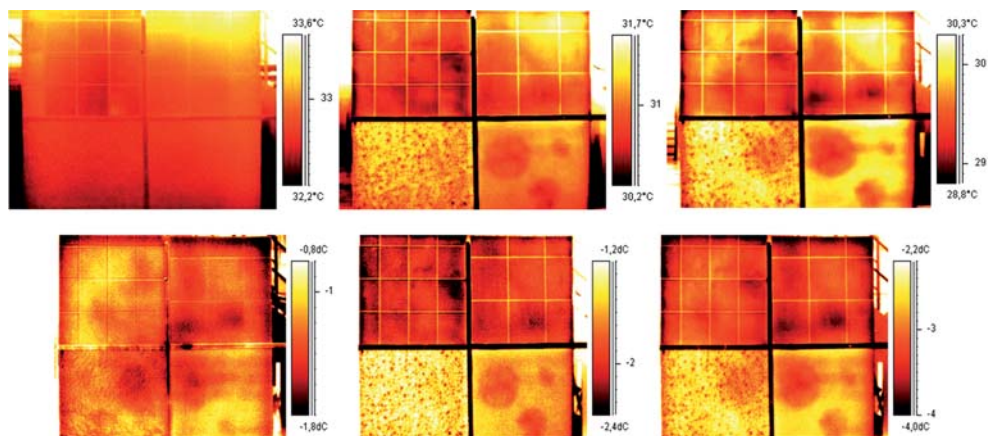


**OBRÁZEK 179:** Rozdělení teplot při zahřívání zdi (a). Na obrázku je vidět, že toto měření je silně ovlivněno úhlem normály povrchu vzhledem ke kameře. Zahřívání části s nastavovanou omítkou (b).

Vytvoření rozdílné povrchové teploty v omítce pevně spojené se zdívkem a omítce odtržené lze získat i lokálním zahříváním povrchu sálajícím zdrojem. To je ukázáno na **obr. 179**, kdy byla modelová zeď ohřívána lampou o výkonu 1000 W po dobu 2–3 minut. Zde se nejdříve zviditelnily trhliny a posléze i defekty. Při vyhodnocování je nutno uvážit, že při zahřívání je zobrazení nejteplejšího místa ovlivněno také odrazem tepla zdroje. Je tak možno kontrolovat, kam zdroj skutečně sálá. Defekty na zahříváné části se jeví teplejší než na nezaříváné, neboť z nich není odváděno teplo dovnitř zdi tak rychle jako z omítky pevně spojené se zdí (**obr. 179a** zachycuje část s vápennou omítkou, **obr. 179b** pak část s cementovou omítkou). Úhel sklonu povrchu silně ovlivňuje měření. Poslední dvojice obrázků ukazuje sekvenční změny obrazu teplot v průběhu chladnutí zdi po celonočním zahřívání.

Vyhřátá zeď na počátku chladnutí je ukázána na **obrázku 178a**. Rozdělení teplot je nevýrazně rozloženo, přesto můžeme rozeznat rozdílné materiály. Další **obrázek 178b** dokumentuje postup chladnutí a zvýrazňování defektů. Poslední fáze z této série byla již ukázána na prvním **obrázku 177**. K metodě je nutno poznamenat, že pořízení kvalitní termovizní kamery je velice nákladné, nicméně aplikace při měření je nenáročná, levná a při vhodné teplotě i neinvazivní a bezpečná. Z obrázků je názorně vidět, že i citlivost je velmi dobrá.

U této metody je důležité znát vliv různé kvality a materiálu povrchu na její citlivost. Proto výzkum pokračoval na upravené modelové zdi, opatřené dalšími povrchy. Zároveň se zkoušela druhá varianta vyvolání skokové změny zahřívání zkušebního tělesa. Popisovaný

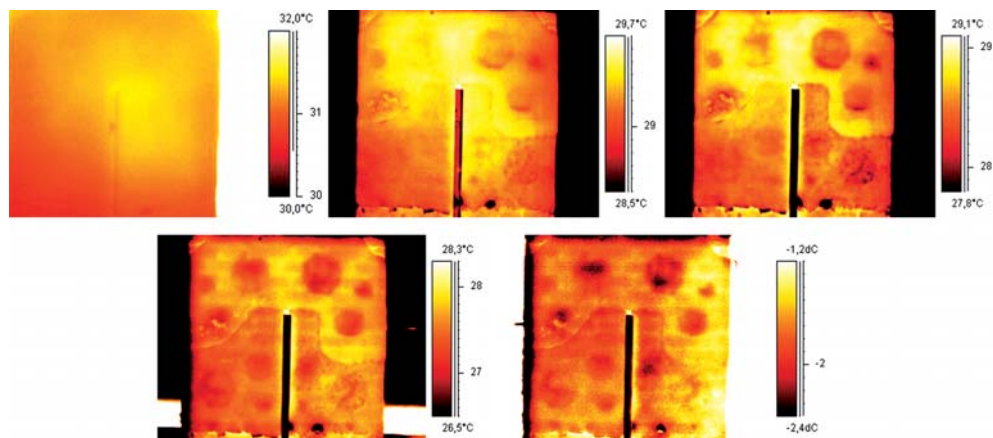


**OBRAZEK 180:** Rozložení povrchových teplot při postupném chladnutí zdi (nahore), rozdíly naměřených povrchových teplot při postupném chladnutí zdi (dolní řada)

experiment probíhal v letních měsících, kdy se denní teploty v laboratoři pohybovaly okolo 33 °C a zeď byla touto okolní teplotou prohřátá i ve večerních hodinách. V té době venkovní teplota klesla na cca 25 °C a bylo možno tohoto přirozeného rozdílu využít pro ochlazení zdi.

Na **obrázku 180** jsou ukázány výsledky měření na straně zdi s dalšími povrchovými vrstvami. Ochlazování probíhalo tak, že vyhřátá zeď byla umístěna v laboratoři před vjezdová vrata a ta byla ve večerních hodinách otevřena. Na zeď začal pronikat studený vzduch a měnil obrazec povrchových teplot. Při popisovaném experimentu bylo zaznamenáno rozložení teplot před zahájením ochlazování a je ukázáno na **obr. 180** vlevo nahoře. Ochlazování začalo ve 21.31 hod., další prezentovaný snímek byl pořízen po 6 minutách a poslední ve 22.14 hod. Snímkování probíhalo v intervalech 3 minut. Při pohledu na zeď vidíme v levé horní části bělinový obklad, pod ním mozaiku z kačírku, v pravé horní části keramický obklad a pod ním vápeno-cementovou omítku. V dolní řadě jsou prezentovány vypočtené rozdíly stavů z předchozího obrázku v pořadí: rozdíl mezi druhým a prvním stavem, mezi posledním a druhým stavem a mezi posledním a prvním stavem. Měření má vysokou citlivost a přesnost určení velikosti, tvaru a umístění defektů přilnavosti omítky.

Druhý líc zdi s původními obrazci defektů a dalšími dvěma typy povrchů byl zkoušen po týdnu po otočení zdi zkoušenou stěnou k vratům laboratoře. Ochlazování začalo ve 20.01, druhý snímek byl pořízen ve 20.04, třetí ve 20.07 a poslední ve 20.55 hod. Rozložení teplot při počátku chladnutí a po třímínutových intervalech je prezentováno na **obr. 181**, kde je i výsledný stav přibližně po hodině a rozdíl mezi posledním a druhým stavem. Při pohledu na zeď vidíme v horní části původní omítkové vrstvy, v dolní části nově pořízené vrstvy sádkové štukové omítky (vlevo) a hliněné omítky s řezankou (vpravo). Po vychladnutí se zvyrazňují černými skvrnami otevřené nespojitosti – trhliny, které nejsou na počátku patrné. Dále je na posledním termogramu velmi dobře vidět i struktura zdíva (cihly a spáry) pod omítkou. Měření ruší povrchové defekty, např. v levé horní polovině u středního puchýře světlé skvrnky, které však lze snadno odlišit od hledaných vad odtržené omítky.



**OBRAZEK 181:** Rozložení teplot při chladnutí zdi, snímáno v intervalu 3 minut (horní řada), výsledné rozložení teplot na povrchu zdi (vlevo dole) a rozdíl oproti počátečnímu stavu (vpravo dole)

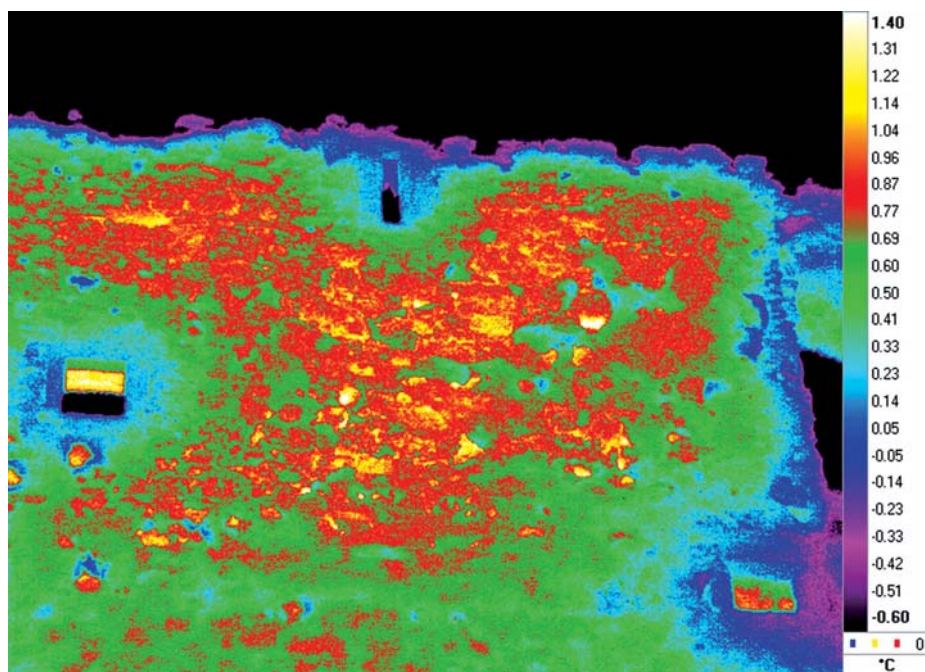
Aktivní termografie, někdy též nazývaná impulzní termografie, je velmi vhodná pro zjišťování podpovrchových dutin do hloubky několika centimetrů. Měření je závislé především na fyzikálních charakteristikách materiálu povrchové vrstvy i podkladu, dále pak na kvalitě povrchu, zejména jeho odrazivosti. Spolehlivé výsledky lze získat na omítaných površích libovolného typu, pokud nejsou příliš hlazené (umělý kámen). Měření je velmi obtížné na kamenných mozaikách a všech typech obkladů. Výše uvedené příklady však ukazují i zde slušnou citlivost, kromě lesklého bělínového obkladu. Termografie v jakékoliv variantě (pasivní nebo aktivní) je obecně vhodnější pro zjišťování delaminace povrchových vrstev než jiné metody především z hlediska jednoduchosti a rychlosti měření a jeho ceny.

Interpretace měření vyžaduje zkušenost a důsledné pořizování dokumentace povrchové kvality, nejlépe pomocí normální fotografie. Nedostatečně prozkoumaný problém představuje vliv vlhkosti, která může výrazně měnit obraz rozložení teplot (Li et al. 2000).

Využití přirozené fluktuace teplot během dne je vhodný způsob dosažení teplotního rozdílu pro měření. Nicméně, ve venkovním prostředí vyžaduje vhodné počasí a zejména v chladných měsících mohou nastat problémy s realizací takového měření. **Obr. 182** ukazuje příklad měření na zřícenině Hollenburg v Rakousku na začátku zimy, kdy po teplých dnech přišly první ranní mrazy. Druhý den již byla kamenná zeď tak vychlazená, že nebylo možno dosáhnout kvality tohoto snímku. Výsledný snímek je sestaven z devíti záběrů, protože prostorový úhel snímání termokamery je velmi malý a nezabere celý objekt. Dokonalá montáž s vyrovnáním teplot vyžaduje vlastním softwarem podpořenou úpravu dat.

## Radiografie

Nedávný vývoj nových lehkých pulsních rentgenů napájených baterií a průmyslová výroba fosforových desek pro záznam rentgenogramů výrazně zvýšily využitelnost této nedestruktivní metody pro diagnostiku stavebních konstrukcí. Nízkovýkonové rentgeny jsou velmi bezpečné a mají dostatečnou razanci pro vyšetřování dřevěných konstrukcí. Uvedme vybrané možnosti aplikací při výzkumu historických dřevěných staveb a prvků.



**OBRÁZEK 182:** Termogram stěny zříceniny se zviditelněným charakteru zdiva zakrytého omítkou (na-  
hoře), detail měření s barevným zvýrazněním rozdílu teplot (dole)

Elektromagnetické záření známé jako rentgenové záření (též paprsky X) je tvořeno to-  
kem fotonů a vzniká při nárazu elektronů, pohybujících se vysokou rychlostí, na překáž-  
ku. Při pronikání rentgenových paprsků látkou dochází k řadě interakcí, které ovlivňují



jejich průchod materiálem a záření pohlcují. Zeslabení rentgenového záření závisí na fyzikálně-chemickém složení látky, přibližně na její měrné hmotnosti a na tloušťce prozařovaného materiálu.

Při rentgenové diagnostice je intenzita záření po průchodu tělesem vhodným způsobem zviditelněna a zaznamenána. Tradičně se používá osvit filmu nebo zviditelnění záření na světlující matnici. První způsob je velmi pracný, druhý velmi obtížně použitelný při diagnostice staveb, přestože jeho nespornou výhodou je možnost přímého pozorování prozařovaného objektu. Dalšími zobrazovacími technikami jsou počítačová radiografie, využívající připojení na videosystém, a fotografie na polaroidní filmy.

Převratnou techniku přináší fosforové záznamové zařízení, které umožňuje opakovaný záznam a snadnou digitalizaci obrazu. Desku tvoří velmi tenká vrstva fosforových krystalů, vzájemně spojených a nanesených na ohebnou plastovou podložku. Fosforové krystaly pohlcují a uchovávají energii rentgenového záření ve formě skrytého obrazu. Množství pohlcené energie je úměrné intenzitě rentgenového záření, kterému byly krystaly vystaveny. Uložená energie je pak z krystalů uvolňována pomocí ozáření červeným laserem. Krystaly se dostanou do nestabilního stavu a vyzařují modré viditelné světlo při přechodu do základního stabilního stavu. Toto světlo je zaznamenáno skenerem a pomocí jeho programové výbavy převedeno do obrazů, které mohou být dále zpracovávány.

Záznamové desky nejsou při čtení ve skeneru<sup>1</sup> plně smazány a některé krystaly stále zadržují určitou energii. Tato informace může být zcela vymazána vystavením desky působení denního světla. Při několikrátěřinové manipulaci s exponovanou deskou, tj. při jejím vkládání do skeneru, není ovlivněna kvalita rentgenogramu. Po smazání předchozí informace může být záznamová deska znovu opakovaně používána. Fosforová deska se dodává ve dvou rozměrech: 20,3 × 25,4 cm a 20,3 × 43,2 cm s rozlišením 300 DPI a je uložena v plastovém obalu. Obrovskou výhodou fosforové desky je její malá tloušťka a ohebnost, což umožňuje rentgenovat objekty ve velmi stísněných podmínkách, např. trámy těsně probíhající okolo zdí.

Pro ozařování je výhodně používán nízko-výkonový pulzní laser XR200 dodávaný firmou Golden Engineering, Inc. Přístroj má velikost cca 32 cm × 12 cm × 19 cm a váží 5,4 kg. Je schopen produkovat 25 pulzů za vteřinu o délce 60 nanosekund. Velikost zdroje záření je okolo 3 mm a maximální energie fotonů 150 KVP. Rentgen je napájen baterií s kapacitou 4000 pulzů. Obsluha rentgenu je velice jednoduchá. Po vložení nabitě baterie se nastaví počet potřebných pulzů a provede ozáření dálkovým spouštěčem. Rentgenogram je možno získat výše popsáním způsobem na EPIX skeneru nebo na připojeném video systému. Také lze použít Polaroid pro expozici filmu a získat obrázek přibližně během dvou minut.

Typická sestava měření v terénu je uvedena na **obrázku 187**, kde je napravo od vazby rentgenový zářič a na styčnicku krovové vazby je upevněna záznamová deska. Příslušný rentgenový obrázek je uveden na **obr. 187** uprostřed, vlevo pak pseudobarevné zvýraznění hnilobou poškozené krokve. Na obou záznamech jsou dobře viditelné zbytky hřebů z odstraněného bedněního krovu.

<sup>1</sup> Obvykle se používá EPIX skener, který má přibližné rozměry 40 × 50 × 27 cm, váží 15 kg, jeho příkon je max. 100 W a pomocí kabelu USB může být propojen s počítačem, který by měl mít následující minimální konfiguraci: Pentium CPU 1,0 GHz, 256 MB RAM, Display 24-bitový s rozlišením 800 × 600, O.S. Windows 2000 nebo XP a harddisk s minimálně 5 dedikovanými GB.

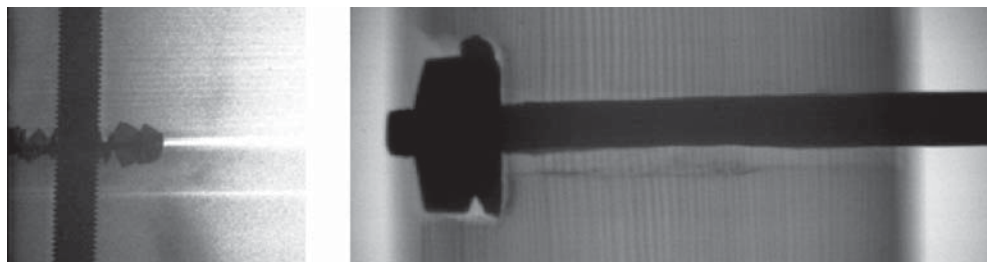
Tradiční rentgenografie užívající film a vysokoenergetický zdroj rentgenových paprsků se používá pro průzkum stavebních konstrukcí již od 2. světové války. Zkoušky betonových konstrukcí pomocí záření gama byly v ÚTAM AV ČR prováděny již v roce 1944, dlouho před aplikacemi v cizině (Hacar a Waitzman 1944) a další radiografické aplikace byly v tehdejší ČSR široce rozvinuty již v polovině padesátých let (Hönig a Zapletal 1982). Užití radiografie v památkové péči je z důvodu bezpečnosti a nákladnosti méně rozšířené. Použití bránilo také to, že klasická zařízení byla velmi těžká a obtížně dopravitelná do prostor historických objektů, kde se vyskytují problémy, které je třeba řešit. V současné době je většina těchto nevýhod odstraněna a jak již bylo řečeno výše, rentgenové paprsky vyzařované z tradičních vysokoenergetických elektromagnetických zdrojů radiace jsou schopny proniknout většinou materiálů užívaných ve stavebnictví. V závislosti na materiálových vlastnostech objektu určeného k inspekci se vytváří fotografie, která odráží hustotu, tloušťku, absorpci energie a chemické vlastnosti materiálu. Současné digitální technologie v reálném čase nebo kvazireálném čase nabízí významné výhody pro hodnocení historických konstrukcí vzhledem k tradičním rentgenovým technikám. V památkové péči se rentgenové metody užívaly sporadicky od sedmdesátých let (Anthony et al. 2003). Příklady využití jsou poučné i pro dnešního čtenáře.

Před rozvojem digitální radioskopie používali výzkumníci pro zkoumání historických konstrukcí vysokoenergetické rentgenové zdroje. Hart (1974) užíval rentgenových paprsků pro analýzu konstrukce tzv. Narbonne House v Salemu v Massachusetts. Cílem průzkumu bylo zjistit přítomnost a uspořádání ztužení stěn, pokud možno odhalit původní okenní rámy a určit, zda některé z ráků tvořily původní obvodovou stěnu. Využil přenosný generátor rentgenových paprsků a kameru Polaroid pro terénní průzkum. Práce úspěšně odhalila uspořádání skrytých konstrukčních ztužidel. Dále tento postup ukázal typ spojovacího materiálu a také to, že dřevo nevykazuje známky poškození. Průzkumem obvodových stěn Hart ukázal, že se nezachovaly žádné původní okenní rámy. Poslední otázka, týkající se původní funkce ráků v obvodových stěnách, nemohla být zodpovězena z důvodu přestaveb a omezeného přístupu zařízení ke konstrukci.

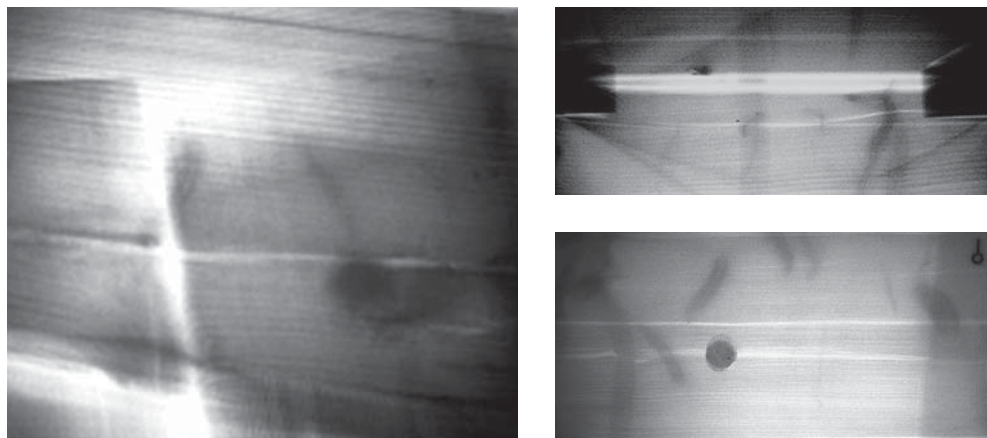
Aplikace rentgenových paprsků při průzkumu tzv. House of Seven Gables byla popsána Wrennem (1976). S využitím práce Davida Harta diskutoval Wrenn přínosy použití rentgenu pro hodnocení stavu dřevěných konstrukcí historických budov. Schopnost určit stav materiálu i stavby bez nutnosti vstupu do konstrukcí byla shledána jako nejvýznamnější výhoda. Nicméně Wrenn poznamenal, že technika je omezena nemožností přímého průchodu rentgenových paprsků objektem s pořízením nerušeného obrazu.

Zájem o stavbu haly typu de l'Ormeova dómu v Monticello podle návrhu Thomase Jeffersona vedla k rentgenovému průzkumu popsanému Harnsbergerem (1981). Pro záznam rentgenových obrazů střechy haly byla použita Polaroid kamera. Přenosný zářič byl umístěn na trojnožce pod stropem haly a přijímač signálu nad střechou haly. Rentgenová inspekce odhalila typ a rozmístění spojovacích prvků, užitých v dřevěných žebrech podporujících kupoli. Průzkum umožnil interpretaci Jeffersonova použití de l'Ormeova inovačního dřevěného rámového systému.

Diskuse užití radiografie v památkové péči je dostupná též v knize Langa a Middletona (1997). Je zde uvedeno několik příkladů aplikací na dřevo, ale i použití radioskopie pro jiné materiály typické pro umělecké a hmotné památky kulturního dědictví ukazuje na silný aplikační potenciál v oblasti dřeva. Např. stereoradiografie poskytující trojrozměrné obrazy objektů je slibná pro mapování konfigurací skrytých styčnic dřevěných konstrukcí a artefaktů (Halmsaw, 1995). Digitální zobrazování v reálném čase pomocí radioskopie se ideálně hodí pro tyto aplikace.



**OBRÁZEK 183:** *Zazubená hmoždinka (vlevo), korodovaný svorník s viditelným otlacením dřeva (vpravo)*



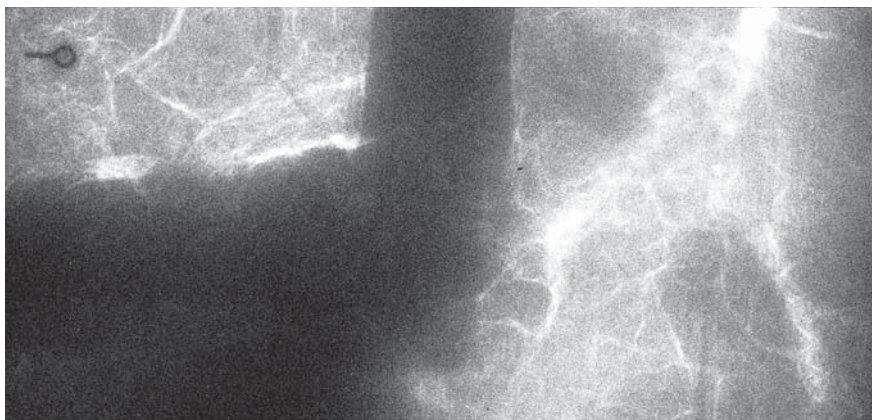
**OBRÁZEK 184:** *Rentgenogram styku sloupku, příčle a krokve rámové vazby ve věži Jakobínce – hrad Rožmberk (vlevo), půdorysný a boční pohled na plátový spoj s dřevěnými kónickými hmoždíky a zajišťovacím kolíkem po porušení styku (viz viditelné trhliny)*

Radiografie může být využita pro určování míst a rozsahu poškození dřeva biologickými škůdci – hmyzem a hnilobou. V rámech historických uměleckých děl byla hledána přítomnost dřevokazných hub a poškození hmyzem (Lang a Middleton, 1997). Tento způsob vyšetřování dosud nebyl využit na dřevěných konstrukcích užitím radioskopie. Úspěšnost tradičního rentgenového zobrazování pro tyto aplikace je příslibem pro digitální radioskopii při plném využití možností a omezení této technologie. V poslední době se rozvoji metody v USA věnuje R. Anthony et al. (1999), který s autory úzce spolupracoval na výzkumu diagnostiky historických dřevěných konstrukcí. V rámci společného česko-amerického projektu zaměřeného na zkoušení historického dřeva a diagnostiku dřevěných konstrukcí byl autory a jejich spolupracovníky proveden rentgenový průzkum několika českých a moravských historických dřevěných objektů a laboratorní testy v ÚTAM AV ČR. Několik typických příkladů slouží k ilustraci možností radiografie v oblasti dřevěných konstrukcí.

Klasickým technickým použitím rentgenu je nedestruktivní kontrola spojovacích prvků a spojů. U dřevěných konstrukcí je snadné zejména zjišťování kovových spojovacích prvků. Rentgenováním můžeme odhalit typy spojovacích prvků a jejich účinnost, deformaci či korozní poškození (**obr. 183**).



**OBRAZEK 185:** Rentgen styku sloupku a překladu dřevěné zárubně pod nátěry vápnem (Trstenice). Dobře je patrné zapuštění vodorovných dřev roubené stěny do sloupku zárubně (vlevo). Rentgenovaná zárubeň v Čisté (vpravo). Dřevo zárubně i roubenice je skryté pod vrstvami vápenných pačoků.



**OBRAZEK 186:** Obraz dřevěného rámu zazděného v hliněném zdivu (Čistá)

Rozdílnost hustoty letního a zimního dřeva umožňuje zaznamenat vzájemně se křížící prvky, což se využívá při zkoumání styků (**obr. 184a**) nebo polohy či stavu dřevěných hmoždinek a spojovacích či zajišťovacích kolíků a trnů (**obr. 184b**).

Rentgenování umožňuje sledovat způsob porušení a průběh trhlin uvnitř dřevěných prvků (**obr. 184**). Metoda byla použita pro zkoušky a porovnání chování spojů provedených na základě tradičních tesařských technologií (podkosené plátování, dřevěné hmoždíky a spojovací kolíky) se spoji, užívanými moderní ocelové spojovací prvky – svorníky se zazubenými hmoždinkami.



**OBRAZEK 187:** *Uspořádání rentgenového měření v krovu kostela sv. Anny v Praze (vlevo) – na krokvi je snímač záření (černá deska), z druhé strany záříč. Snímky dále ukazují rentgenový záznam snímané krokve (uprostřed) a místa na jiné krokvi s nalezenou hnilobou (vpravo) po barevném zvýraznění intenzit procházejícího záření.*

Velmi významná je možnost studia provedení skrytých tesařských spojů, zejména stavu dlabů a čepů. Pro stavebně historické průzkumy je důležité, že takové studium je možno provádět i bez obnažení dřevěného prvku zakrytého vrstvy vápenných nátěrů nebo omítky či dokonce zazděného (**obr. 185, 186**).

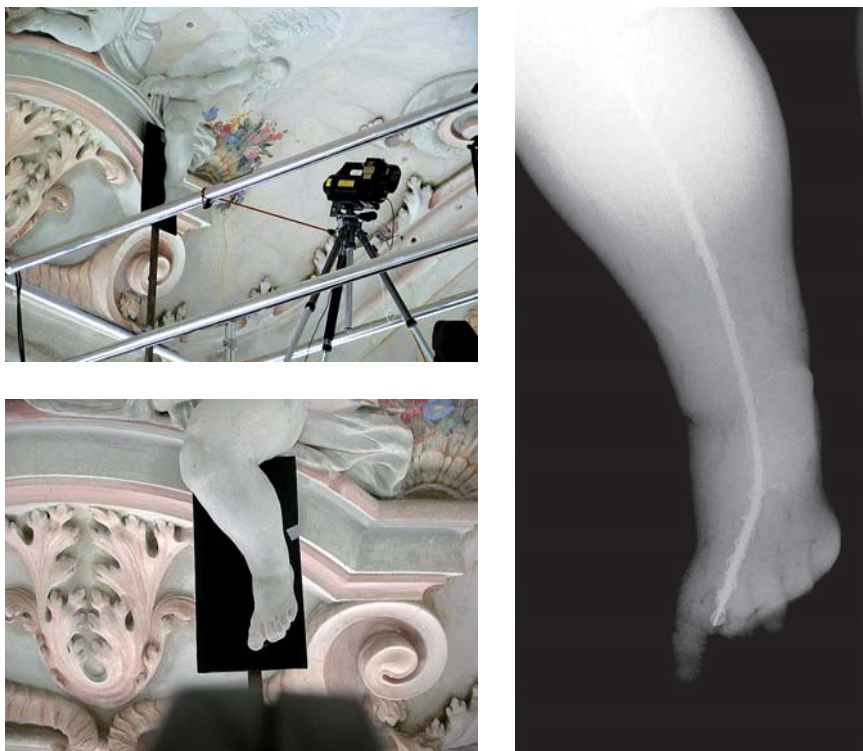
Jednou z nejdůležitějších vlastností této metody je schopnost rozpoznávat rozsah částí narušených hnilobou nebo jinou degradací, vzhledem k výrazné změně hustoty (**obr. 187**).

Byly činěny i pokusy s rentgenováním masivnějších konstrukcí, např. kamenného zdiva o tloušťce 250 mm a kamenných prvků gotického opěráku chrámu Sv. Barbory v Kutné Hoře. Výkonově však tyto bezpečné rentgeny pro podobné úlohy nedostačují. Výkon je dostatečný pro měření menších kamenných nebo betonových plastik či štukové výzdoby (**obr. 188**). Rentgenová diagnostika má široké možnosti využití v oblasti záchrany památek i restaurování. Přenosné rentgeny jsou dostatečně citlivé k odhadu rozsahu poškození i u subtilních konstrukcí, např. podhledových prken, která lze prozařovat i přes vrstvu omítky (**obr. 189**).

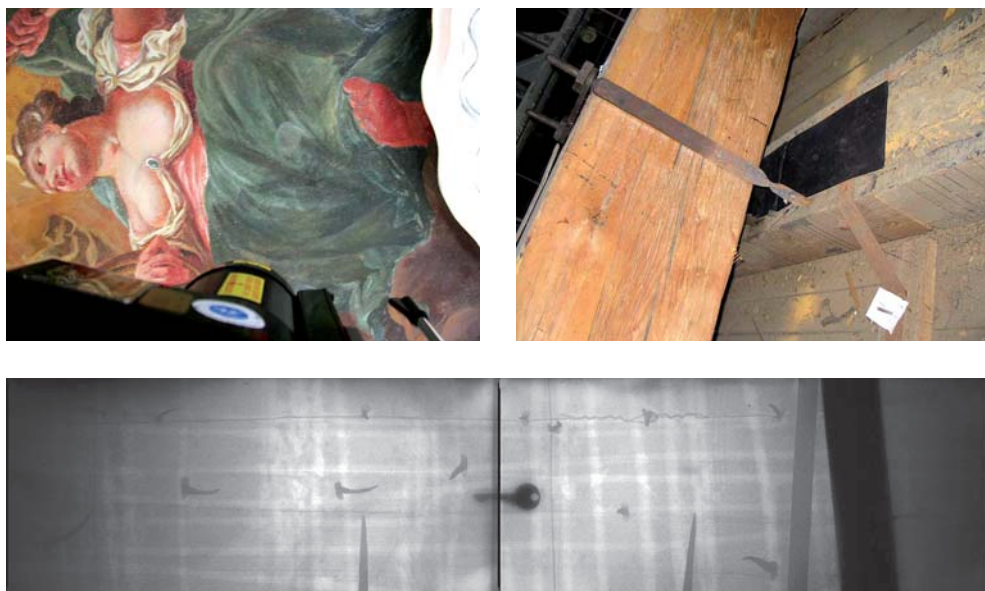
### Dynamická identifikace podpovrchových poruch omítek

Při ztrátě soudržnosti povrchové vrstvy s podkladem se výrazně mění její ohybová tuhost. 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. Nejzajímavějších výsledků je dosahováno pomocí měření rychlosti kmitání laserovým dopplerovským interferometrem. Toto zařízení může monitorovat povrch objektu z relativně velkých vzdáleností – bez speciálních úprav ze vzdálenosti několika metrů – a poskytuje údaje o rychlosti pohybu povrchu v rozsahu do řádu 1 MHz. Skenování pak usnadňuje měření na větších plochách a přiřazuje k údaji o rychlosti kmitání také údaj o poloze bodu na měřeném objektu. Prostorové dosažitelné rozlišení je pro běžné vzdálenosti možné okolo 1 mm.

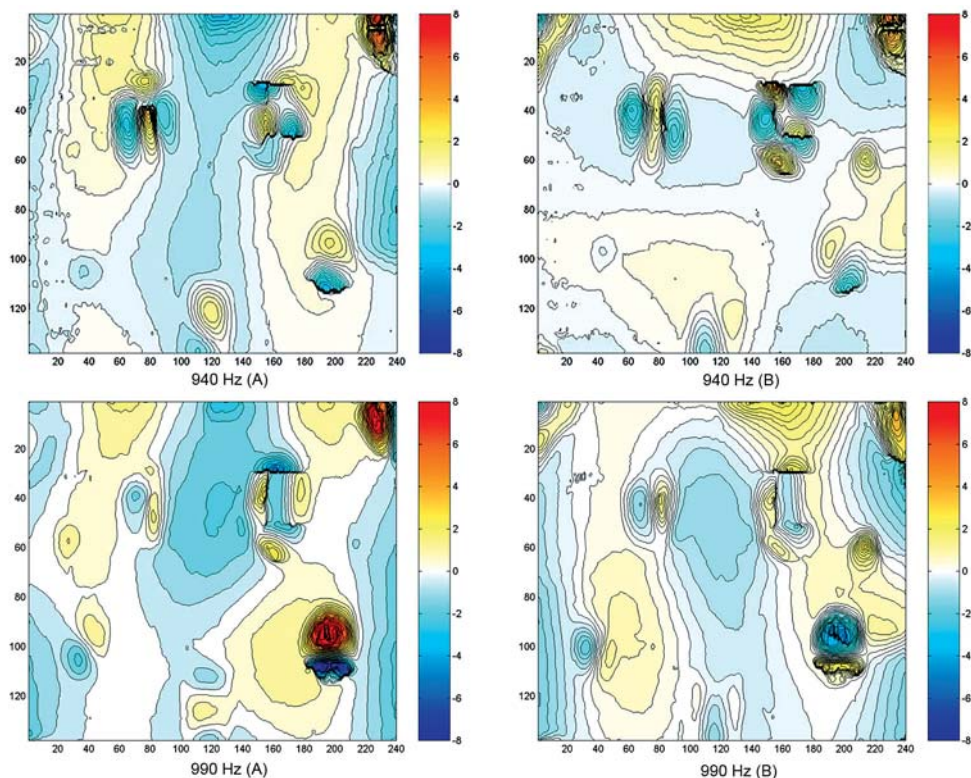
Princip metody spočívá v rozkmitání povrchu zkoumaného objektu a měření rychlostí kmitání jednotlivých bodů povrchu pomocí speciálního skenovacího laserového interferometru.



**OBRÁZEK 188:** Příklad zkoumání způsobu vyztužení nohy andělka na zámku Veltrusy



**OBRÁZEK 189:** Příklad rentgenového snímku malovaného stropu s dobře viditelným vyztužením omítky pletivem, roztečí připevňovacích hřebíků i biodegradcí prkna (zámek Veltrusy)



**OBRAZEK 190:** Tvary kmitání povrchové vrstvy omítané stěny s defekty

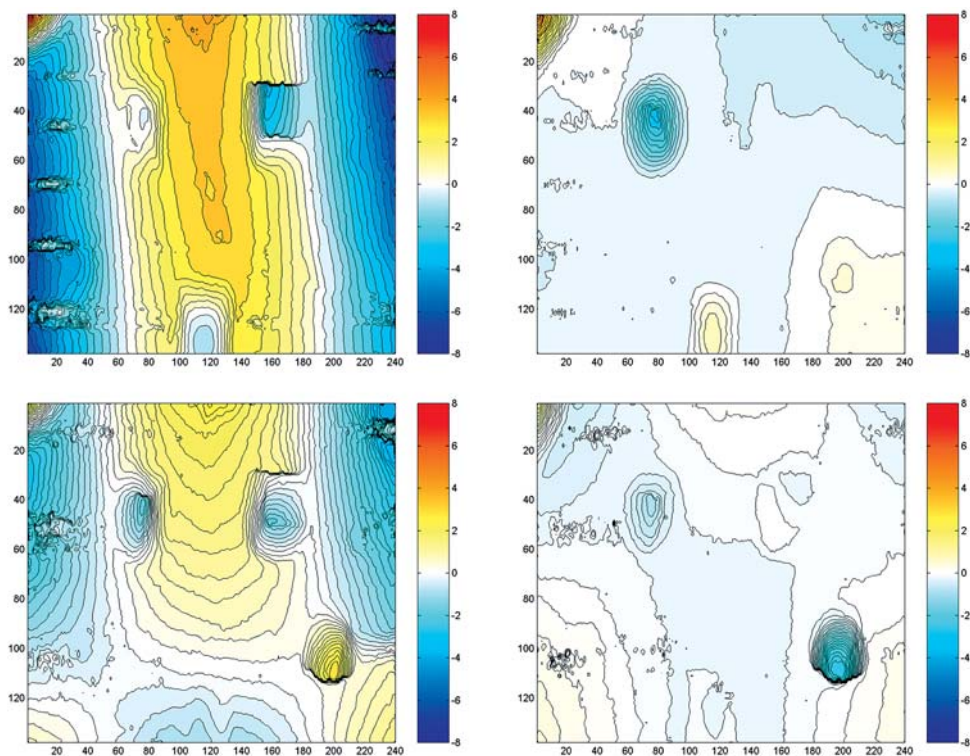
Pro aplikaci na omítky jsou rozvíjeny dvě varianty, které se zásadně liší pouze způsobem vybuzení kmitání měřeného objektu.

Na univerzitě v Anconě (Itálie) se používá pro buzení akustických budičů. Jedná se o silné reproduktory s usměrněním zvuku pomocí eliptických nebo parabolických reflektorů. Akusticky rozkmitaný povrch je pak opticky proměřován bod po bodu a výsledky zpracovány do mapy rychlostí kmitání povrchu. Frekvenční spektrum vysílaných zvukových signálů se v každém měřeném bodě spojitě mění a hledáme frekvenci, která vyvolá rezonanci defektní části povrchu. Je zřejmé, že tento způsob měření je velmi pomalý, neboť předem neznáme kritické frekvence a musíme proto v každém bodě projít celé rozumné spektrum. Metoda byla vyzkoušena i při měření na reálných konstrukcích (Castellini et al. 1996, 1999).

Na pracovišti autorů byla studována varianta této metody při aplikaci mechanického rozkmitávání stěny s poškozenou omítkou (Drdácký et al. 2001, Drdácký a Lesák 2006). Pozornost byla soustředěna zejména na poznání vlivu fázového posunu na citlivost metody a na studium vlivu různých povrchů a materiálu omítek. Tyto experimenty byly prováděny na výše uvedené zděné cihelné stěně s modelovými defekty.

Obraz kmitání zdi s omítkou byl měřen pomocí skenovacího laserového čidla (kamery), využívajícího Dopplerova jevu.

Reprezentativní výsledky jsou uvedeny na **obrázku 190**. Obrázky označené A a B ukazují tvary kmitání celé soustavy při frekvenci odpovídající maximální amplitudě rychlosti



**OBRÁZEK 191:** Kmitání povrchu vyztužené zdi při frekvencích 270 Hz (nahore) a 370 Hz (vlevo) a fázovém posunu  $90^\circ$  (pravý sloupec)

kmitání, zjištěné většinou v horním rohu cihelné stěny, přičemž tvar B odpovídá fázovému posunu o  $90^\circ$ . Je vidět, že viditelnost defektů je silně závislá na fázi, zejména u menších vad. Detailní měření defektu s výraznými trhlinami (největší vada na vápeno-cementové omítce vpravo dole) ukazuje, že při určitých tvarech kmitání stěny s omítkou a určité fázi se trhliny vůbec neprojeví. To na jedné straně komplikuje měření, na druhé straně dává lepší naději na zjištění defektů.

Při výše popsanych experimentech bylo poměrně snadné rozkmitat stěnu nesoucí omítku. Vznikla proto otázka, jak se situace změní při větší tuhosti zdi. Dále bylo třeba prozkoumat vliv různého povrchu na měření. Modelová zeď byla proto opatřena dalšími vrstvami omítky a obkladů – tvrdší vápennou omítkou se sádrovým štukem, hliněnou omítkou s řezankou, keramickým obkladem, bělninovým obkladem, kamennou mozaikou a vápeno-cementovou omítkou (viz výše). Tyto vrstvy zpevnily cihelnou zeď tak, že nebylo možné dosáhnout jejího rozkmitání ve stejných frekvencích jako v prvním případě. Opět byl zkoumán vliv fáze na detekci defektů. Výsledky jsou uvedeny na **obrázku 191**. Když je porovnáme s **obr. 190**, vidíme, že při podobných frekvencích je možné naměřit podobné efekty, nicméně rychlosti kmitání jsou výrazně menší a některé defekty vůbec nebyly zjištěny.

Metoda měření rozdílného kmitání uvolněných částí omítky na zdivu mechanickým rozkmitáváním nosiče a bezkontaktním měřením pomocí laserového dopplerovského interferometru je časově i finančně náročná a je třeba měřit s různou fází. Její citlivost je silně závislá





**OBRAZEK 192:** *Uspořádání měření při poloautomatickém akustickém trasování (vlevo) a výsledek hledání pod povrchových defektů (plochy se světlými body vpravo)*

na tuhosti nosiče i samotné omítkové vrstvy. Její praktická aplikace je omezená a vhodná spíše pro průzkum delaminace povrchových vrstev na menších objektech, lehkých dřevěných nebo hrázděných stěnách nebo dřevěných „klenbách“, případně na volně stojících cihelných zdech. Varianta, která akusticky budí pouze uvolněné části omítky, je citlivější a má širší uplatnění.

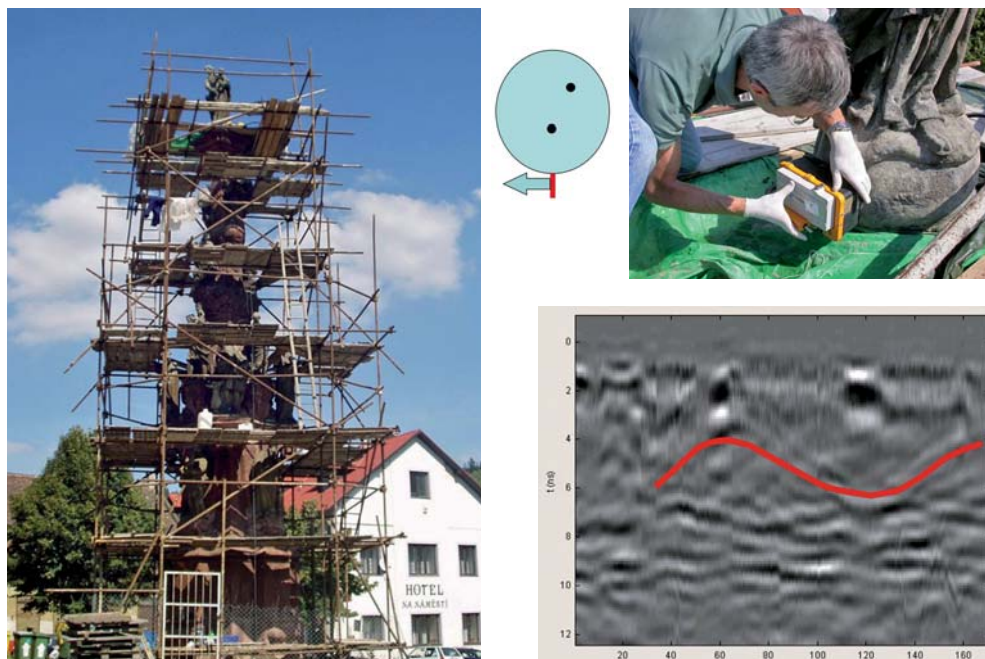
### Poloautomatické akustické trasování

Metoda využívá záznamu a analýzy akustického signálu generovaného poklepem na povrch konstrukce v husté síti bodů. Signál i místa poklepu jsou zaznamenávána videokamerou, což umožňuje automatické vyhodnocení souřadnic měřeného místa a odstraňuje nevýhodu klasického akustického trasování, kdy je třeba změny odezvy zakreslovat na povrch nebo měřit a vynášet do výkresu či fotografie (**obr. 192**). V primitivní variantě se signál rozdílne odezvy může vyhodnocovat operátorem přímo na místě a zaznamenat do zvukového snímku. Složitější vyhodnocení odezvy analýzou zaznamenaných signálů je popsáno v literatuře a doprovozeno podrobně vysvětlujícími obrázky (Drdácký a Lesák 2006, Skłodowski et al. 2013).

### Radar

Metoda je známá pod různými názvy – georadar, GPR (zkratka z angl. Ground Penetrating Radar), mikrovlnný radar, zemní radar a další. Je založena na registraci odražené energie vlnění od anomálie v prostředí, do kterého jsou vlny vysílány. Data jsou většinou analyzována v časové dimenzi. Elektromagnetické vlny prochází i vzduchem na rozdíl např. od ultrazvukového signálu a metoda tudíž poskytuje údaje i po vzniku trhlin nebo dutin. Název pochází z první aplikace při archeologických průzkumech v roce 1975 (Conyers a Goodman 1997). Dnes radarová diagnostika patří mezi důležité metody nedestruktivního průzkumu zděných konstrukcí a podloží (Maierhofer et al. 2001).

Georadar je přístroj využívající radarový signál k průzkumu a následnému zobrazování vnitřní struktury pod zkoumaným povrchem. Je to geofyzikální metoda, kterou lze využít pro celou škálu nedestruktivních průzkumných úkolů od zakládání staveb, archeologii po detailní průzkum pod povrchových defektů staveb. Základním principem měření je pulzní (< 1 ns) vysílání elektromagnetických vln, které prochází daným prostředím (zkoumaným materiálem). V inženýrských aplikacích se využívá frekvencí v rozsahu od 300 MHz do 2,5 GHz.

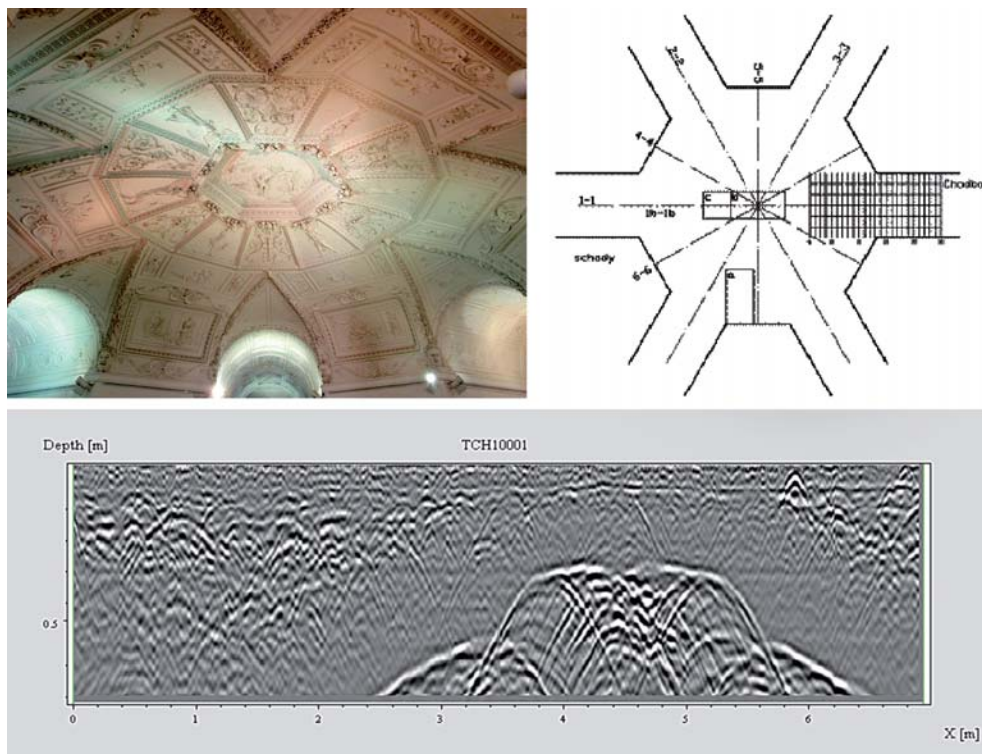


OBRÁZEK 193: Příklad hledání spojovacích trnů v mariánském sloupu

Odražené složky jsou anténou zpětně přijímány a vyhodnocovány. Odražený paprsek se mění, pokud prochází prostředím, kde se mění permitivita (např. rozhraní kámen–vzduch) a vodivost (např. přítomnost železných spojovacích prvků). Měřeným parametrem je čas. Pokud je známa rychlost šíření vln v daném materiálu, pak lze určit hloubku, kde dochází ke změně či odrazu signálu. Při měření se nejčastěji využívá pohybu antény po přímce v rovině povrchu. Pokud je v materiálu předmět (popř. dutina, nehomogenita atd.), od kterého se odráží vlny, pak při přibližování antény dochází ke zkracování vzdálenosti určující jeho hloubku a při oddalování následně k prodlužování této vzdálenosti. V radarogramech vytvářejí tyto odrazy hyperboly. Pro následnou interpretaci a lokalizaci nálezů je nutné znát pozici antény během měření. Posuv antény je zaznamenáván např. kolečkem, které měří lineární vzdálenost od počátečního bodu. Měření většinou probíhá v předem navržené rastrové síti.

Anténa je v kontaktu s povrchem zkoumané konstrukce, po kterém se pohybuje a vysílá elektromagnetické vlny v jednotlivých pulzech. Vyslaný signál se částečně odráží na rozhraní materiálů s rozdílnými dielektrickými konstantami ( $\epsilon$ ) a částečně prochází dál. Odražený signál je zachycen anténou. Ve většině případů je vysílač i přijímač umístěn do jednoho obalu, zjednodušeně nazývaného anténa.

Pro zobrazování odraženého signálu je zásadní jeho intenzita v závislosti na čase (tzv. A-snímek, A-scan). Zaznamenaný A snímek v různých pozicích antény vytváří obraz zvaný radarogram neboli též B-snímek. Intenzita přijímaného signálu je zde převedena na stupně šedi, popř. je zobrazena barevnou škálou. Signál může být dále upravován a filtrován pro upřesnění počátku povrchu nebo odstranění šumů. Počítačově lze souběžně B-snímky převést na trojrozměrné modely a vytvořit tak příčné C-snímky.



**OBRÁZEK 194:** Radarový průzkum skladby klenutého stropu v hlavním sále letohrádku Hvězda

Aplikaci uvedme na několika příkladech. **Obrázek 193** demonstruje diagnostiku polohy kovových trnů, spojujících globus pod sochou Panny Marie se spodní částí sloupu (Kácov). Vpravo nahoře je vidět anténu, kterou operátor v tomto případě posouvá po obvodě globu, pod ním je příklad radarogramu s identifikací polohy trnů (čepů).

Další příklad ukazuje použití georadaru pro zjištění tloušťky vrstev klenuté stropní konstrukce letohrádku Hvězda – podlahovou skladbu, násypy i tloušťku klenby (**obr. 194**).

V této kapitole byly stručně představeny nejdůležitější současné nedestruktivní diagnostické metody, které mají významný aplikační potenciál při záchraně památek a jejich restaurování. Terénní práce s nimi je většinou jednoduchá a rychlá, nicméně zpracování naměřených dat často vyžaduje speciální znalosti, počítače i software a většinou i značnou dávku zkušenosti při interpretaci výsledků.

## Poděkování

Kapitola využívá výsledků výzkumu podporovaného v rámci projektu NAKI DF11P010-VV027 a projektu GAČR P105/12/G059 „Kumulativní časově závislé procesy ve stavebních materiálech a konstrukcích“.

## Použitá literatura

- Anthony, R., M. Drdáký, I. Jirovský a B. Kasal. Rentgenová diagnostika dřevěných historických konstrukcí. In: *Stavebné materiály a skúšobníctvo*. Košice: Orgware/BERG TU Košice: 2003, 138-140. ISBN 80-7099-991-8.
- Anthony, R. W., A. K. Pandey a C. G. Arnette. Integrating nondestructive evaluation tools for the inspection of timber structures. In: *Proceedings of 11th international Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Madison (WI): USDA, 1999.
- Castellini, P., E. Esposito, N. Paone a E. P. Tomasini. Non-invasive measurements of damage of frescoes paintings and icon by Laser Scanning Vibrometer: experimental results on artificial samples using different types of structural exciters. In: *6th World conference on NDT and Microanalysis in Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage*. Roma: AIPnD, 1999, 185–198.
- Castellini, P., N. Paone a E. P. Tomasini. The laser doppler vibrometer as an instrument for non-intrusive diagnostic of works of art: application to Fresco Painting. *Optics and Lasers in Engineering*. 1996, 25(4-5), 227-246. [http://dx.doi.org/10.1016/0143-8166\(95\)00073-9](http://dx.doi.org/10.1016/0143-8166(95)00073-9)
- Conyers, L. a D. Goodman. *Ground-penetrating radar*. London: Sage Publications, 1997.
- Drdáký, M., J. Lesák, D. Michoínová, J. Svoboda a S. Urushadze. Contact-less methods for identification of cohesion loss in lime mortar renders. *Experimentální analýza napětí 2001*. Praha: České vysoké učení technické, 2001, 41-46.
- Drdáký, M., I. Jirovský a J. Lesák. *Nedestruktivní průzkum zděných a dřevěných konstrukcí Mariánské věže na hradě Karlštejně*. Zpráva ÚTAM AV ČR, Praha: ÚTAM AV ČR, 2003.
- Drdáký, M. a J. Lesák. Non-invasive survey of detachment of historic rendering, In: Fort, R., M. Alvarez de Buergo, M. Gomez-Heras a C. Vazquez-Calvo (eds.). *Heritage, Weathering and Conservation*, London: Taylor and Francis, 2006, 591-597. ISBN 0-415-41272-2
- Hacar, B. a K. Waitzman. Vyšetřování stavebních hmot a konstrukcí paprsky gama. *Technický obzor*, 1944, 52(15,16).
- Halmshaw, R. *Industrial Radiography*. London: Chapman and Hall, 1995.
- Harnsberger, D. In Delorme's Manner. *APT Bulletin*. 1981, 13(4), 2-8.
- Hart, D. X-ray analysis of the Narbonne House. *APT Bulletin*. 1974, 6(1), 78-98. <http://dx.doi.org/10.2307/1493413>
- Hart, D. *X-ray Examination of Historic Structures*. Washington: U.S. Department of the Interior, Heritage Conservation and Recreation Service, 1975.
- Hönig, A. a V. Zapletal. *Nedestruktivní zkušebníctví*. Neprodejná skripta pro PGS: Technické znalectví. Brno: VUT Brno, 1982.
- Lang, J. a A. Middleton. *Radiography of Cultural Material*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997.
- Laurens, D. *Thermographie infrarouge appliquée a des bâtiments anciens*. In: IABSE Symposium Venezia 1983. Strengthening of Building Structures – Diagnosis and Therapy, Final Report, IABSE Reports, 1983, 46, 117-121.
- Li, Z., W. Yao, S. Lee, Ch. Lee a Z. Yang, Z. Application of infrared thermography technique in building finis evaluation. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2000, 19(1), 11-19. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1006612023656>

- Maierhofer, C., A. Brink, M. Rölling a H. Wiggenhauser. Detection of shallow voids in concrete structures with impuls thermography and radar, *NDT & E International*. 2003, 36(4), 257-263. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(02\)00063-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(02)00063-4)
- Maierhofer, C. a S. Leipold. Radar investigations of masonry structures. *NDT & E International*. 2001, 34(2), 139-147. [http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695\(00\)00038-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0963-8695(00)00038-4)
- Maldague, X. P. V. *Nondestructive evaluation of materials by infrared thermography*. London: Springer, 1993.
- Skłodowski, R., M. Drdácý a M. Skłodowski. Identifying subsurface detachment defects by acoustic tracing. *NDT & E International*. 2013, 56, 56-64. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.02.002>
- Wrenn, G. Questions of preservation and a new X-ray investigative technique. In: *Preservation and conservation: principles and practices. Proceedings of the North American Regional Conference*. Williamsburg (VA), 1976.