

Průzkum lícního pískovcového zdiva kamenného pláště historických konstrukcí za použití neinvazivní analytické techniky georadaru (GPR)

Památkový postup

Příložený památkový postup byl vypracován na základě výzkumných prací při řešení projektu *Vybrané památkové postupy pro zkvalitnění péče o sochařské a stavební památky péči* (DF11P01OVV027) programu MK ČR NAKI.

1. Úvod - Základní charakteristika

Péče o historické objekty vyžaduje komplexní přístup s využitím poznatků z řady oborů. To se týká i průzkumu stavebních památek, jehož nedílnou součástí je dokumentace stavu zkoumaného objektu a jeho historického vývoje, ale současně i zpracování podkladů pro přípravu případné budoucí obnovy. Uváděný památkový postup aplikuje nedestruktivní analytickou techniku GPR při průzkumu kamenných konstrukcí a může proto být užitečným upřesněním specifických podrobností při provádění stavebně historického průzkumu.

V případě stavebních konstrukcí zhotovených z kamene je vzhledem k široké škále možných poškození konstrukce jako celku, ale také jednotlivých prvků (kamenných bloků), velmi náročné stanovit typ a rozsah nutného zásahu. Různé diagnostické průzkumové metody nám mohou poskytnout různé informace. Průzkum stavu kvádrového zdiva, zejména zjištění aktuálního stavu, konstrukčních detailů nebo vnitřní struktury kamenných bloků v historických konstrukcích, je poměrně komplikovanou úlohou. Proto v současné době prakticky nelze běžnými metodami nedestruktivně vizualizovat vnitřní stav a konstrukční detaily kamenného pískovcového zdiva.

Skupina technik, které se využívají k průzkumu historických konstrukcí a jsou neinvazivní, se postupně rozšiřuje. Jde např. o impakt echo, termovizi, ultrazvukové techniky nebo georadar. Technika georadaru (GPR – Ground Penetrating Radar, pozemní radar) umožňuje velmi dobře vizualizovat podpovrchová uspořádání materiálů (např. kamenných bloků) neinvazivním způsobem. Při vhodné volbě uspořádání a nastavení přístroje lze stanovit hloubku konce bloku, odchylku skladby zdiva např. od gotické kamenné vazby při nedodržení spárořezu (kamenný doplněk), nebo určit přítomnost kamenné příložky apod.

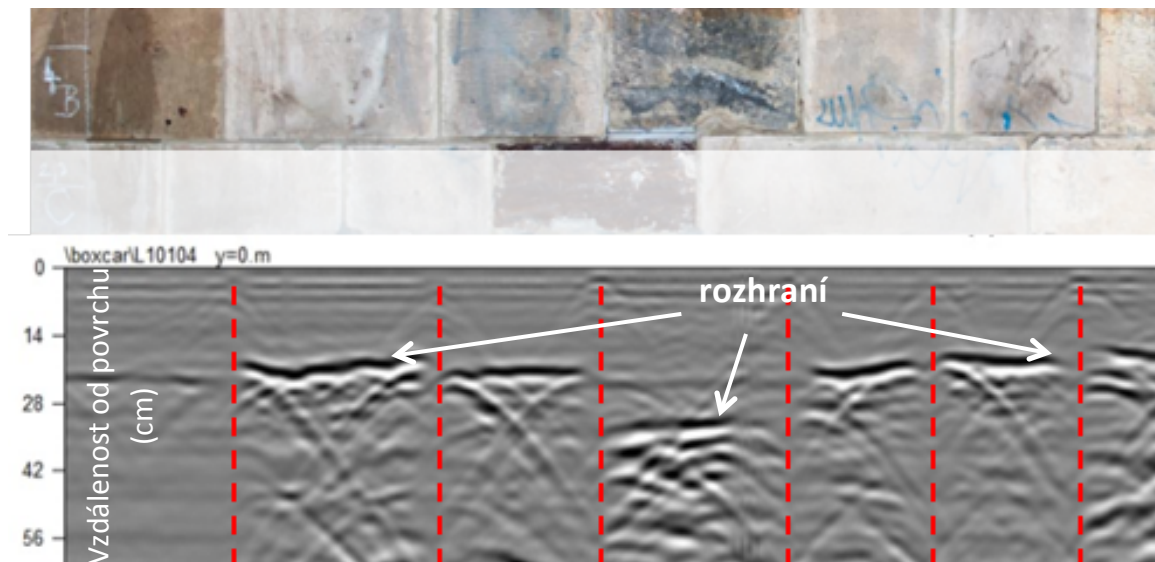
Základním principem měření georadarem je pulzní vysílání elektromagnetických vln, které prochází zkoumaným materiálem. Georadar využívá elektromagnetického vlnění k průzkumu a následnému zobrazování vnitřní struktury pod povrchem. Vizualizuje materiálové rozhraní na bázi rozdílných elektrických a magnetických vlastností (rel. permitivita) různých materiálů, viz Tabulka 1.

Tabulka 1

Hodnoty konduktivity a relativní permitivity (dielektrické konstanty) pro vybrané materiály (Široký)

materiál	konduktivita σ (mS/m)	relativní permitivita ϵ_r
vzduch	0	1
sladká voda	0,1 - 10	78 - 88
mořská voda	4000	81 - 88
beton suchý	1 - 10	4 - 10
beton vlhký	0,1 - 10	10 - 20
pískovec suchý	0,001 - 0,0000001	4 - 7
pískovec vlhký	0,1 - 0,001	5 - 15
vápenec suchý	0,001 - 0,0000001	4 - 8
vápenec vlhký	10 - 100	6 - 15

Vlnění se při dosažení materiálového rozhraní (např. dutina, prasklina, nehomogenita, tmel) z části odrazí a je anténou zpětně přijímáno. Při dosažení rozhraní materiálů s odlišnou permitivitou a/nebo vodivostí, dochází ke změně fáze a amplitudy vlny. Výsledkem měření je radarogram, na kterém jsou tato rozhraní znázorněna výrazným přechodem černá-bílá, viz obrázek 1. Podle charakteru přechodu lze posoudit, jakým prostředím vlnění prochází a zda je přechod pozvolný (pískovec - tmel) nebo náhlý (pískovec - vzduch). Materiálová rozhraní nejvýrazněji odrážející vlnění (signál) způsobují v radarogramu vznik hyperbolických obrazců. Vzhledem ke kuželovité charakteristice vysílání antény způsobují odrazy nejen místa umístěné přímo pod anténou, ale také místa, která jsou od antény vzdálená. Při pohybu antény po povrchu se k danému rozhraní totiž nejprve přibližujeme a po dosažení nejkratší vzdálenosti se od něj znovu vzdalujeme. Čas zaznamenání odražené vlny je zpočátku delší (hloubka rozhraní se nám pak jeví jako větší), postupně dochází k jeho zkracování a po dosažení daného rozhraní k následnému prodlužování. Proto jsou křivky na radarogramu hyperbolického tvaru. Stejně tak dochází k zesilování a následnému zeslabování odraženého signálu



Obrázek 1 Příklad výsledného radarogramu pískovcového zdiva. Radarogram zobrazuje příčný řez řadou bloků, přičemž vnitřek objektu se nachází ve směru dolů. Rozhraní na radarogramu znázorňují předpokládané konce bloků a příložek.

2. Cíl památkového postupu

Cílem předkládaného památkového postupu je popis využití georadaru při průzkumu lícového pískovcového¹ zdiva za účelem určení tloušťky kamenných bloků a identifikace výrazných nehomogenit v okolí rozhraní kamene a návazné konstrukce. Výhodou tohoto památkového postupu je nahrazení invazivních forem průzkumu, ke kterým patří provádění sond popř. málo destruktivní technika endoskopie spárou, neinvazivní metodou. Žádoucím dopadem využití tohoto památkového postupu je nejen získání rozšiřujících podkladů při průzkumu historických konstrukcí, ale zejména omezení nebo úplná eliminace destruktivních zásahů do hmoty památkových objektů.

3. Popis památkového postupu

Památkový postup obsahuje popis základních kroků, které je třeba dodržet pro úspěšné použití georadaru a získání užitečných dat při vizualizaci skladby lícního pískovcového zdiva historických konstrukcí.

¹ Analogický postup by bylo možné využít i při průzkumu zdiva z jiných typů hornin, ale toto použití by vyžadovalo optimalizaci přístrojových parametrů.

3.1. Volba přístroje GPR

Georadar se skládá z vysílací antény, přijímače a PC, které simultánně ukládá a zpracovává měřená data. Hloubka, do které je možné vizualizovat podpovrchová uspořádání, je limitována frekvencí použité antény. Komerčně dostupné antény pracují v rozsahu 10 MHz až 3 GHz. Antény o nízkých frekvencích mají dosah až 50 m, ale nedostatečné rozlišení v řádu desítek centimetrů. Průzkum stavebních památek vyžaduje vyšší rozlišení než je tomu u běžných pozemních radarů zkoumající geologické vrstvení nebo archeologická naleziště. Vyšší rozlišení ale vyžaduje vyšší frekvence antény. Pro průzkum stavebních konstrukcí v památkové péči je proto vhodné používat antény s frekvencí 1,5 GHz nebo vyšší, při jejichž užití proniká vlnění GPR v ideálním případě přibližně až do hloubky 1 metru.

Památkový postup byl vyvíjen s použitím antén o frekvencích 1,6 a 2 GHz. V případech rozhraní o větším formátu byly použité přístroje schopné zobrazit vrstvy o tloušťce 1 cm nebo silnější.

3.1.1. Software

Specializované softwary pro sekundární vyhodnocování dat z GPR měření dodávané se samotným přístrojem pomáhají zvýraznit a vyčistit informace, které při měření unikají pozornosti. Tyto softwary obvykle nejsou přenosné mezi GPR přístroji od různých dodavatelů².

Všechny kroky softwarového zpracování dat je nutné provádět obezřetně a s jasnou představou o tom, co každá matematická operace znamená a jaká má omezení pro jednotlivé případy. Softwarové filtry jsou v různé míře aplikovány a demonstrovány na obrázku 8, viz Příloha III.

Základním předpokladem zdárné interpretace výsledků měření získaných pomocí techniky GPR na lícním zdivu je teoretická znalost fyzikální podstaty metody a praktická zkušenost operátora GPR v oblasti průzkumů památkových objektů. Prvním krokem při použití GPR je správná volba přístrojového uspořádání a získání kvalitních dat. Dalším krokem je softwarové zpracování nasbíraných dat dle níže uvedeného postupu.

3.2. Doporučený postup měření – sběr dat

Samotnému měření pomocí GPR předchází výběr míst pro toto měření. Vybraná místa jsou určena konkrétním účelem průzkumu a měla by být volena na základě vizuálního posouzení, průzkumu archivních historických pramenů a konzultace s odborníky (památkáři, architektky, restaurátory kamene, apod.).

² Data naměřená různými GPR přístroji mohou být v různých formátech. Pro práci s naměřenými daty z různých GPR přístrojů (např. pro jejich srovnání) je nutné použít vhodný komerčně dostupný software.

Doporučený postup měření pomocí GPR:

1. Pořídit fotodokumentaci měřeného místa, kterou je vhodné doplnit spárořezem zdiva, viz Příloha III obrázek 1-6.
2. Pomocí školní křídly načrtnout na povrchu objektu pomocné linie, po kterých se bude posouvat anténa radaru.
3. Nastavení přístroje:
 - a) Výběr základních parametrů: čas („time“, tj. jak dlouho se snímá návrat signálu po iniciaci), počet vzorků na snímek („samples per scan“, tj. počet uložených dat na jeden vyslaný signál), nastavení rychlosti šíření vlnění, („velocity“ tj. odhadovaná rychlost šíření signálu v měřeném materiálu).
Během ověřovacích testů byly zvoleny tyto parametry: čas 20 ns (resp. 10 ns pro jednotlivé bloky), počet vzorků na snímek 1024, rychlost šíření vlny 130 - 150 mm/ns.
 - b) Určení snímacího rastru, který zároveň odpovídá možnostem používaného pozičního systému daného přístroje. Nejčastěji se využívá lineární měření délky kolečkem. Anténa by se měla pohybovat po přímkových liniích s přesně vymezenými vzdálenostmi (kontrola měření vzdálenosti kolečkem antény). V ověřovacím měření byl zvolen odečet měřicího kolečka „wheel integration“ roven 2, tj. při pojezdu antény byl každé 4 mm zaznamenán jeden snímek (scan).
4. Anténu přiložit ke zdivu a vhodnou rychlostí posouvat zleva doprava, resp. zprava doleva, shora dolů, zespoda nahoru po načrtnutých liniích. Každou řadu bloků je doporučeno měřit v několika liniích podle výšky bloků. Způsob rozvržení měřených linií musí odpovídat i předpokládanému způsobu vyhodnocení a zobrazení hledaných efektů. Například, lze též měřit v husté a pravidelné ortogonální síti a vytvářet tak 3D radarogramy. V principu není třeba měření opakovat pro ověření nebo získání statistiky.

Po ukončení sběru dat následuje softwarové zpracování dat a jejich interpretace.

3.3. Doporučený postup zpracování a interpretace dat

Předpokladem správné interpretace výsledků je sekundární softwarové zpracování naměřených dat dle níže uvedeného postupu.

Doporučený postup zpracování dat:

1. Softwarové zpracování výsledných signálů z GPR přístroje pomocí filtrů a matematických nástrojů: korekce nulového bodu, při kterém dojde k opravě měřítka hloubky, nelineární zesílení signálu (funkce *gain*), filtrování pozadí pro odstranění signálů nepatřících materiálovým rozhráním (funkce *background removal*), vyhlazení skenů radarogramu pro odfiltrování vysokofrekvenčního šumu (*boxcar filter*), funkce *migrace* a *Hilbertova transformace (HT)*.
2. Vyhodnocení vnitřní skladby konstrukce na základě získaných radarogramů odečtením hloubek míst, ve kterých dochází k odrazu vlny na rozhraní s odlišnými

elektrickými a magnetickými vlastnostmi. V radarogramu se vyznačují výrazným přechodem černá-bílá nebo bílá-černá.

3. Doplnění výsledků měření vlhkosti (tento krok není nutný, pokud není podezření na výrazné rozdíly ve vlhkostech zkoumaného materiálu, např. na zvýšenou míru dešťových srážek před měřením). Možnost dodatečného stanovení rychlosti vlny z tvaru hyperbol činí techniku GPR do jisté míry na vlhkosti materiálu kamene nezávislou. I přesto je doporučeno provádět měření mimo období, kdy je zvýšena vlhkost kamenných bloků, pokud to jejich umístění a stav dovoluje.

Interpretace materiálových rozhraní se stává složitější s rostoucím počtem těchto rozhraní. První materiálové rozhraní ve směru od povrchu do hloubky objektu významně znesnadňuje snadnou interpretaci rozhraní následujících.

Kromě základních postupů pro úpravu dat lze použít i další funkce, např. dodatečné stanovení rychlosti pomocí proložení hyperbol. Díky této funkci lze odečíst rychlost šíření vlny daným materiálem. V případě lícního zdiva lze využít odrazu vlny od bodů, kde dochází k průniku spáry s dalšími rozhraními. Tato funkce může mít zásadní dopad na přesné stanovení hloubky rozhraní a eliminovat tak efekty zvýšené vlhkosti materiálu nebo přítomnosti rozhraní s vysokou elektrickou vodivostí.

Přítomnost většího počtu výrazných hyperbol na radarogramu může vést ke sčítání a deformaci měřených signálů. Vhodný nástroj k úspěšné eliminaci hyperbol je matematická funkce *migrace*. I zde je důležité kontrolovat případnou deformaci primárního signálu (křivek). Vizualizaci prostorových útvarů (dutiny, kulovité předměty, rozsáhlejší materiálová rozhraní, atd.) lze vylepšit za použití operace *Hilbertova transformace (HT)*.

Pro další ulehčení orientace v naměřených křivkách může sloužit celá řada samostatných komerčně dostupných softwarových nástrojů nabízejících další pokročilé funkce. Počet a přínos těchto funkcí je specifický pro různé softwary. V některých případech, kdy požadavky na analýzu dat překračují možnosti softwaru dodávaného s přístrojem, je ale vhodné specializovaný software použít.

3.4. Odůvodnění výše uvedeného postupu

Protože s rostoucí hloubkou GPR měření klesá intenzita signálu a interpretace materiálových rozhraní se stává složitější, zabývá se tento památkový postup interpretací pouze prvních zjištěných rozhraní. Pro komplexnější využití informací naměřených georadarem v případě podpovrchových průzkumů stavebních konstrukcí musí mít operátor dlouholeté praktické zkušenosti s GPR s vyššími frekvencemi (1,5 GHz a více) a dobrou znalost stavebních konstrukcí.

4. Využitelnost a porovnání GPR s ostatními neinvazivními technikami

Ve srovnání s dalšími dostupnými zcela nedestruktivními technikami, jakými jsou např. ultrazvuk nebo impakt echo, je georadar vybaven vysokofrekvenčními anténami schopen detekovat rozhraní o síle 1 cm. Uvedené techniky využívající mechanického vlnění mají schopnost detekce na úrovni 1 mm nebo lepší. Lze je proto využít pro posouzení stavu a integrity materiálu. Při vhodném uspořádání nám sice mohou poskytnout informace o podpovrchových prasklinách rovnoběžných s povrchem (impakt echo) a hloubce prasklin kolmých k povrchu (ultrazvuk – nepřímé uspořádání), ale dosažení podpovrchového zobrazení materiálu ve formátu 2D a 3D v případě lícového zdiva (kdy je většina bloků dostupná pouze z jedné strany) je u nich výrazně náročnější nebo nemožné.

Výhodou georadarového měření je tedy rychlá vizualizace podpovrchových materiálových rozhraní v případě zdiva, kde jsou bloky dostupné pouze z jedné strany. Při použití antén o vysoké frekvenci ($\geq 1,5$ GHz) lze v ideálním případě skenovat materiál do hloubky až 1 metr. Podobně jako přítomnost prvního materiálového rozhraní významně znesnadňuje přesnou interpretaci rozhraní následných, velmi přesných a snadno interpretovatelných výsledků dosahujeme pouze u bloků a vrstev blíže k povrchu. S rostoucím počtem rozhraní se zvyšuje nárok na znalosti uživatele a zkušenosti s daným typem materiálu i konstrukce. Vzhledem k tomu, že detekce ve směru kolmém k povrchu u vysokofrekvenčních antén je cca 1 cm nebo horší, nebude vrstva materiálu nebo vzduchu s velkou pravděpodobností georadarem zaznamenána, pokud její velikost bude v jednotkách milimetrů nebo menší než jeden milimetr. Schopnost detekce se zlepšuje se vzrůstající velikostí formátu materiálového rozhraní. Pokud se tedy jedná o příložku nebo vlastní stěnu kamenného bloku (boční stěna či konec bloku), schopnost detekce georadaru je vyšší.

5. Příklad ověření památkového postupu v praxi - nezávazná aplikace na Karlově mostě a na vyjmutých pískovcových blocích na Šutce

Technika GPR byla nejprve ověřována na blocích vyjmutých během první fáze oprav Karlova mostu umístěných na úložišti Šutka (viz Příloha I.). Měření provedené na jednotlivých blocích vyjmutých z reálného objektu umožnilo otestovat omezení techniky a kalibrovat zvolený měřicí systém. Vybrané přístrojové uspořádání bylo pak využito pro vizualizaci konců bloků nebo příložek na vybraných částech kamenného pláště Karlova mostu – pilíř č. 11 (viz Příloha II. a III.). Výběr jednotlivých kvádrů a referenční plochy přímo na mostu byly voleny tak, aby zahrnovaly několik typů pískovců použitých v různých obdobích stavby a oprav Karlova mostu. Pomocí techniky GPR byla na zvolené referenční ploše zkoumána vnitřní struktura bloků různého typu kamene zaměřená především na určení přítomnosti příložek.

6. Závěr

Prezentovaná technika GPR se řadí mezi neinvazivní metody pro průzkum stavebních památek s velkým potenciálem využití. U historického zdiva zhotoveného z pohledového kamene může sloužit zejména pro hodnocení stavu podpovrchových vrstev kamene, identifikaci příložek a stanovení jejich tloušťky s chybou měření ± 1 cm pro anténu s frekvencí 2 GHz, případně ke zjištění jiných konstrukčních detailů zdiva.

Na základě zjištěných výsledků měření lze metodu GPR doporučit pro objektivní zkoumání stavu historického kamenného zdiva v rámci stavebně historických průzkumů nebo při přípravě podkladů pro obnovu daného typu stavebních památek.

V této souvislosti je nutné zmínit skutečnost, že v současné době se v zahraničí i u nás klade stále větší důraz na kvalifikované posouzení stavu historických objektů a současně na maximální využití neinvazivních průzkumných metod. Využití popsané průzkumové a diagnostické metody GPR otevírá nové možnosti pro získávání důležitých informací i zvýšení objektivitu průzkumů cenných historických staveb.

7. Návrh konkrétních uživatelů výsledků

Uživateli předkládaného postupu mohou být jak odborní pracovníci Národního památkového ústavu, tak restaurátoři nebo specializované firmy, které provádějí stavebně historický a stavebně-technický průzkum památkových objektů, případně projekční a stavební firmy, které navrhovaný postup využijí pro detailní doplňkové neinvazivní průzkumy stavu zdiva.

8. Seznam použité literatury

- Macek P., *Standardní nedestruktivní stavebně-historický průzkum, Státní ústav památkové péče v Praze, Odborné a metodické publikace svazek 23, 2. vydání, 2001*
- Vítovský J., Merger M., *Metodický pokyn k obnově pláště národní kulturní památky Karlův most, Národní památkový ústav - generální ředitelství, Praha 2013*
- Turkington A.V. (1996): *Stone durability. In: Smith B.J., Warke P.A. (Eds.) Processes of Urban Stone Decay. London, Donhead Publishing Ltd., pp. 19-31, ISBN 978 1 873394 20 5*
- Pešta, J.: *Zkoumání historických staveb. Praha, Národní památkový ústav 2012. ISBN 978-80-86516-41-7*
- Široký, J. *Využití georadaru v geomorfologii. Bakalářská práce, Univerzita Karlova v Praze, 2011.*
- Prouzová, P. – Pálková, M.: *Využití metod impact echo a akustické emise. Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství. [Sborník], 5. ročník konference doktorského studia JUNIORSTAV; Pazdera, L., Ed.; Brno, 2003.*
- Kořenská, M.: *Aplikace akustických metod ve stavebnictví. [Habilitační práce], VUT v Brně, 2006. ISBN 80-214-3276-4*
- Bayer, K. – Köhler, W. – Wallasch, S.: *Ultraschallmessungen an mineralischen Baustoffen. In WTA-Schriftenreihe Heft 17, Verfahren zur Bauwerksinstandsetzung Gestern - Heute - Morgen; Ed.; Fraunhofer IRB Verlag, 1998.*
- Weber, J. – Köhler, W. – Bayer, K.: *Stone material and construction history of the main portal of Saint Stephan's Cathedral: non-destructive measurements. In Proceedings of 5th International Conference on*

non-destructive testing, microanalytical methods and environmental evaluation for study and conservation of works of art; Ed.; Budapest, 1996.

- Köhler, W.: *Structure changes of weathered Carrara marble sculptures as a function of their destructioned position. In ICOM Committee for Conservation, 9th triennial meeting, 9th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation: Dresden; Grimstad, K., Ed.; 1990; pp. 330-335.*
- Sansalone, M. J. – Streett, W.: *Impact-echo: nondestructive evaluation of concrete and masonry. New York, Bullbrier Press 1997.*
- Lombillo, I. – Thomas, C. – Villegas, L. – Fernández-Álvarez, J. P. – Norambuena-Contreras, J.: *Mechanical characterization of rubble stone masonry walls using non and minor destructive tests. Construction and Building Materials 2013, (1), 266-277.*
- Neal, A.: *Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. Earth-Sci. Rev. 2004, (66), 261-330.*
- Reynolds, J. M.: *An introduction to applied and environmental geophysics, 2nd ed. Chichester, John Wiley & Sons 2011.*
- Pérez-Gracia, V. – Caselles, J. O. – Clapés, J. – Martínez, G. – Osorio, R.: *Non-destructive analysis in cultural heritage buildings: Evaluating the Mallorca cathedral supporting structures. NDT & E International 2013, (59), 40-47.*
- *Ground-Penetrating Radar, 2011. U. S. Environmental Protection Agency. http://www.epa.gov/esd/cmb/GeophysicsWebsite/pages/reference/methods/Surface_Geophysical_Methods/Electromagnetic_Methods/GroundPenetrating_Radar.htm (accessed Aug 25, 2014).*
- Rybařík, V.: *Kámen v dějinách Karlova mostu v Praze. Kámen Revue 2007, 2, 11-20.*
- Suchý, M.: *Solutio hebdomadaria pro structura templi pragensis. Stavba svatovítské katedrály v letech 1372-1378 I. Castrum Pragense 5, Prague, 2003.*
- Valečka, J.: *Juditin most v Praze a „Petršínské“ železité pískovce. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2005-2006, s. 170-174.*
- Přikryl, R.: *Jaký přírodní kámen vybrat pro opravu Karlova mostu? Oprava Karlova mostu. ČSSI, Šel, Praha 2004, s. 50-54. ISBN 80 86426165*
- Pavelka, K. – Svatušková, J. – Preisler, J. – Balík, R. – Králová, V. et al.: *The complex documentation of Charles Bridge in Prague by using laserscanning, photogrammetry and GIS technology. [Proceedings], Conference VAST CIPA. Cyprus, Nicosia, 2006, pp. 356-362.*

9. Seznam publikací, které předcházejí Památkovému postupu

- *European Commission. On-site investigation techniques for the structural evaluation of historic masonry buildings. Onsiteformasonry – EC report, Luxemburg 2006*
- *Válek, J. a kol. Report on the evaluation at pilot sites (report for owners of historic buildings) Pilot Site: VELTRUSY CASTLE / Czech Republic, report D10.2&D10.4 of ONSITEFORMASONRY project EVK4-2001-00091, September 2004*

V Praze 1. 6. 2015

Řešitelé projektu za Fakultu restaurování Univerzity Pardubice, a Ústav teoretické a aplikované mechaniky:

Ing. Jakub Havlín

Ing. Monika Slavíková

MgA. Petr Gláser

Ing. Jan Válek, Ph.D.

Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka
Ing. Martina Panošová Hucková, Ph.D.