

# MATERIÁLY PŮVODNÍHO VÝPLŇOVÉHO ZDIVA KARLOVA MOSTU A JEJICH SKLADBA

RICHARD PŘIKRYL – MIROSLAVA  
NOVOTNÁ – ZUZANA WEISHAUPTOVÁ –  
ANETA ŠŤASTNÁ<sup>1)</sup>

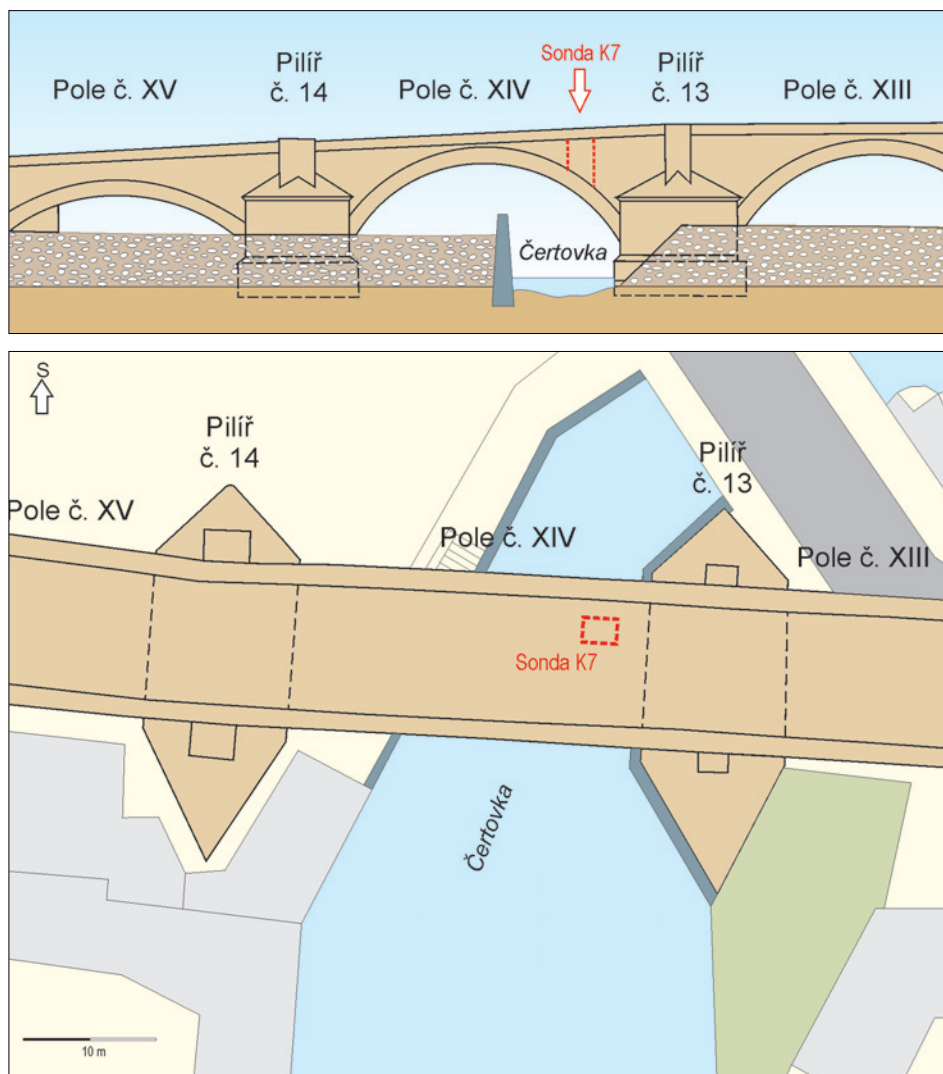
Karlův most v Praze, jedna z nejvýznamnějších gotických staveb na území České republiky, přitahuje v posledních letech pozornost kvůli plánované a částečně již prováděné rekonstrukci (sanace základů pilířů č. 8 a 9 v roce 2005, obnova hydroizolace mostovky v letech 2007–2010). Dosud uskutečněné průzkumné práce se soustředily na posuzování celkového stavu památky a na detailní materiálový průzkum lícního zdiva (Příkryl *et al.* 2006). Poněkud stranou hlavní pozornosti zůstalo výplňové zdivo v klenbách a pilířích, jehož komplexnímu rozboru se zatím žádný z průzkumů nevěnoval. Za to může nejen jeho obecná nepřístupnost, ale také nezáměr ze strany větší části odborné veřejnosti. Výjimku v tomto případě tvoří analýzy materiálů z kopaných sond provedených v roce 2002 a 2004 (sonda K1 v klenbě pole č. XII, výsledky viz Drozd a Příkryl 2003, a sondy K4 v klenbě č. XIV, K5 v klenbě č. X a K6 v klenbě č. VI, výsledky viz Drozd *et al.* 2005). Znalost materiálového složení výplňového zdiva a jeho skutečného stavu má přitom zásadní význam nejen pro interpretaci stavební historie Karlova mostu, ale je také důležitým vodítkem pro korektní vedení zásah při jeho opravě, a to jak vnitřní konstrukce (zejména hydroizolace), tak vnějšího kamenného pláště.

Protože detailní výzkum materiálů celým profilem původního výplňového zdiva dosud nebyl proveden, přistoupil odbor městského investora magistrátu hlavního města Prahy (MHMP) spolu s příslušnými institucemi v oblasti památkové péče (Národní památkový ústav – ústřední pracoviště, dále NPÚ ÚP, odbor kultury, památkové péče a cestovního ruchu MHMP), mandátá-

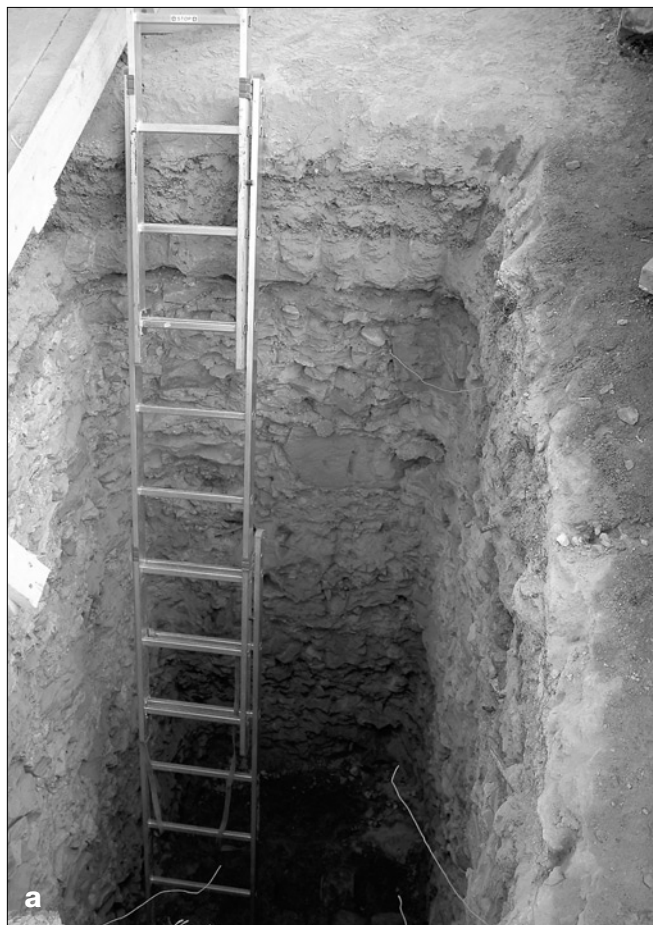
řem investora (Mott MacDonald Praha, s. r. o.), firmou provádějící současnou opravu hydroizolace (SMP Praha a. s.), projektantem (PŮDIS a. s.) a organizací provádějící podrobný materiálový průzkum stavu lícního zdiva (Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze) k realizaci průzkumné sondy v poli č. XIV (tj. klenba nad Čertovkou). Volba pole č. XIV byla ovlivněna následujícími důvody: 1. kamenné lící zdivo tohoto úseku mostu je podle provedeného průzkumu (Příkryl, dosud nezveřejněná data) rozsáhle poškozeno četnými zvětrávacími projevy, což si vyžádalo zajištění celé klenby vnější dřevěnou konstrukcí v roce 2008; 2. toto pole nebylo podle dostupných informací (Drozd 2007, Zahradník 2007 a informační zdroje tam uvedené) po své výstavbě nikdy vážně porušeno ani přestavováno (týká se konstrukce výplňového zdiva, nikoliv kamenného pláště). Zejména obava, aby zvětrávací a degradační procesy, které lze pozorovat na řadě míst v lícním kvádrovém kamenném zdivu, nepostihovaly i původní výplňové zdivo, nakonec vedla k rozhodnutí realizovat průzkumnou sondu právě v tomto mostním poli.

## PROVEDENÍ SONDY A ODBĚR VZORKŮ

Přestože sondy představují významný zásah do každé historické památky, jsou v dobře odůvodněných případech



Obr. 1: Lokalizace kopané sondy K7 v tělese Karlova mostu: a – příčný řez (pohled od jihu), b – horizontální pohled.



Obr. 2: Makroskopická fotografická dokumentace kopané sondy K7 (všechny snímky R. Přikryl): a – celkový pohled seshora; b – detail vnitřní opukové klenby a navazujícího původního výplňového zdiva; c – střední část vodorovně kladeného původního výplňového zdiva; d – přechod mezi původním výplňovým zdivem (spodní strana snímku) a novodobými vrstvami (na snímku jsou patrné vrstvy 1–5 dle obr. 3).

(Girsa *et al.* 2004) nezbytným nástrojem, který umožňuje studium způsobu výstavby dané konstrukce *in situ*. Poskytují také jedinou možnost, jak odebrat materiály z konstrukce pro další rozbor v neporušeném stavu. Ručně prováděné sondážní práce (tj. kopané sondy) jsou přes plošně, resp. objemově větší zásah do konstrukce bezesporu výhodnější než vrtné práce. Při vrtní dochází vždy k určité změně původního stavu odebíraného materiálu: 1. při použití tzv. vrtného výplachu se v něm zvyšuje obsah vody (potom nelze na vzorcích měřit vlhkost) a vymývají se vodorozpustné soli; 2. v případě vrtní „nasucho“ se vrtné jádro intenzivně zahřívá vlivem tření, snižuje se vlhkost, ale zvyšuje se celková pórovitost vlivem druhotného rozpraskání. V obou případech je pak řada důležitých diagnostických parametrů (vlhkost, obsah solí, pórovitost) zkreslená.

Z výše uvedených důvodů byla popisovaná sonda K7 provedena ručním výkopem v blízkosti napojení klenby podle č. XIV na pilíř č. 13 (lokalizace viz obr. 1. v období 1. až 27. října 2007). Tuto sondu realizovala firma SMP Praha pod dohledem pracovníků památkové péče a za účasti zástupců výše zmíněných organizací. Sonda byla hloubena skrz novodobou (60.–70. léta 20. století) betonovou desku shora, báze sondy končila na rubové straně lícního zdiva. Během hloubení sondy byla celá oblast zakryta přístřeškem a ohrazena, aby nedošlo ke kontaminaci odkrytých

vrstev atmosférickými vlivy – např. srážkami. Stavebně-technický průzkum sondy K7 spolu s jejím zaměřením provedla firma PUDIS a. s. (Krch a Podráský 2007).

Vzorky, reprezentující materiály výplňového zdiva v sondě K7 (s výjimkou krycí betonové desky z 60.–70. let 20. století), byly odebrány autorem tohoto příspěvku ihned po dokončení hloubení sondy. Každý z deseti vzorků malt a jedenácti vzorků přírodního kamene (seznam viz tab. 1), odebraných ve třech různých profilech, byl uložen do uzavíratelných PE sáčků, náležitě označen a podroben analytickým rozborům (viz dále). Odběrová místa byla zaznamenána v nákresu i fotograficky, včetně hloubky odběru (tab. 1). Během odběru vzorků byl rovněž proveden makroskopický průzkum skladby materiálů a popis stavu sondy.

## MAKROSKOPICKÝ POPIS VÝPLŇOVÉHO ZDIVA V SONDĚ K7

### Pozorování

Po průniku betonovou „krycí“ deskou (obr. 2a, d), pocházející z opravy Karlova mostu v 60.–70. letech 20. století, obsáhly sondážní práce celý profil výplňového zdiva. To je tvořeno ve většině hloubeného profilu vodorovně kladenými kusy lomového kamene s horizontálním rozměrem jednotlivých bloků 20–50 cm (ojediněle až 100 cm) a výškou 20–40 cm (místy až 60 cm, obr. 2c). Prostor mezi těmito většími bloky kamene vyplňuje velmi pevná malta, obsahující též drobnější úlomky lomového kamene nepravidelného tvaru, velikostí nepřesahující 10–20 cm. Veškerý přítomný lomový kámen se svým makroskopickým vzhledem shoduje s druhohorními opukami (podrobněji viz kapitola věnující se petrografickému rozboru kamene), jiné petrografické typy nebyly v sondě zaznamenány. Tím se charakter výplňového zdiva v sondě K7 odlišuje od částí opravovaných během baroka nebo v 19. století. V těchto mladších částech se mezi hrubým kamenivem vyskytují prvohorní vápence (barokní opravy) nebo magmatické horniny (opravy z konce 19. století) (*Příkryl*, dosud nepubl. data). Zastoupení lomového kamene a malty v sondě K7, vyhodnocené pomocí počítačové analýzy obrazu na fotografiích výplňového zdiva, činí 3 : 2 až 3 : 1.

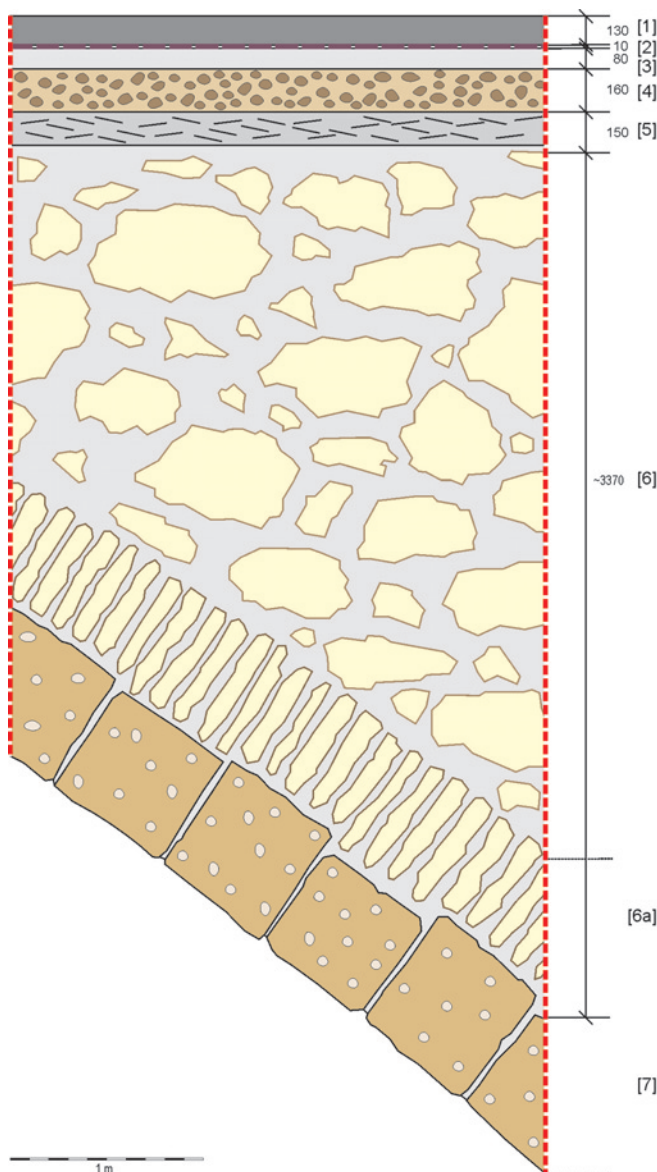
Na rozhraní mezi výplňovým a lícním zdívem tvoří součást výplňového zdiva druhá klenba (obr. 2b a 3), vyklenu-tá ze štípaných desek z lomového kamene (opuky) tloušťky 8–12 cm (převažuje tloušťka 10 cm) a rozměrů mezi 40–50 cm (mocnost klenby). Opukové desky jsou opět spojeny velmi kvalitní pevnou maltou.

| označení vzorku | strana sondy                   | úroveň odběru [cm]         | typ vzorku                         |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| K7/1            | severní                        | 310                        | přírodní kámen (opuka)             |
| K7/2            | severní                        | 310                        | malta                              |
| K7/3            | severní                        | 230–210                    | přírodní kámen (opuka)             |
| K7/4            | severní                        | 230–210                    | malta                              |
| K7/5            | severní                        | 140–120                    | přírodní kámen (opuka)             |
| K7/6            | severní                        | 140–120                    | malta                              |
| K7/7            | severní                        | 30–40                      | přírodní kámen (opuka)             |
| K7/8            | severní                        | 30–40                      | malta                              |
| K7/9            | severní                        | 180–170                    | přírodní kámen (opuka)             |
| K7/10           | severní                        | 180–170                    | malta                              |
| K7/11           | severní                        | 70–50                      | přírodní kámen (opuka)             |
| K7/12           | severní                        | 70–50                      | malta                              |
| K7/13           | jižní                          | 235–230                    | malta                              |
| K7/14           | jižní                          | 235–230                    | přírodní kámen (opuka)             |
| K7/15           | jižní                          | 190–180                    | malta                              |
| K7/16           | jižní                          | 190–180                    | přírodní kámen (opuka) a malta     |
| K7/17           | jižní                          | 100–90                     | malta                              |
| K7/18           | jižní                          | 100–90                     | přírodní kámen (opuka)             |
| K7/19           | jižní                          | 10–15                      | přírodní kámen (opuka)             |
| K7/20           | jižní                          | 20–25                      | malta                              |
| K7/21           | jižní                          | 25–35                      | přírodní kámen (opuka)             |
| K7/22           | dno sondy – rub lícních kvádrů | cca 50 cm od vnějšího líce | přírodní kámen (křemenný pískovec) |
| K7/23           | dno sondy – rub lícních kvádrů | cca 50 cm od vnějšího líce | přírodní kámen (křemenný pískovec) |

Tab. 1: Seznam vzorků odebraných z původního výplňového zdiva zastřešeného kopanou sondou K7 v poli č. XIV Karlova mostu v Praze. Úroveň odběru je uvedena jako vzdálenost od báze souboru betonových desek a hydroizolace, vložených v 60. a 70. letech 20. století.

### Interpretace

Z výše uvedených pozorování vyplývají důležité poznatky pro hlubší poznání stavební historie Karlova mostu a pro posouzení aktuálního stavu výplňového zdiva. To má charakter litého betonového zdiva, kdy do kvalitní malty s hydraulickým vápnem jako pojivem (hydraulický charakter pojiva potvrdily analytické rozbor, jejichž výsledky přináší další část této práce) byly vkládány různé velké bloky lomového kamene. Předchozí interpretace tohoto zdiva coby:



Obr. 3: Řez sondou K7 a její materiálová skladba (rozměry uvedeny v mm) vytvořené na základě pozorování autora (*Richard Příkryl*) v původních vrstvách výplňového zdiva a na základě zprávy PUDIS (Křch a Podráský 2007) v oblasti novodobých vrstev. Vysvětlivky [1–5] = novodobé vrstvy vložené v 60. a 70. letech 20. století: [1] vrstva krycího betonu (pojivo portlandský cement) nad hydroizolací, [2] hydroizolace (asfaltová lepenka s rabinovým pletivem), [3] podkladní beton (pojivo portlandský cement), [4] lehký beton („keramzitbeton“) (pojivo portlandský cement), [5] železobetonová deska (pojivo portlandský cement) křížem vyztužená žebírkovými ocelovými pruty průměru 16 mm. Vysvětlivky [6–7] – původní (gotické) zdivo Karlova mostu: [6] výplňové zdivo s lomovým kamenem (opukou – světle žluté) pojeným hydraulickou vápennou maltou, [6a] vnitřní klenba tvořená štípanými opukovými deskami pojenými hydraulickou vápennou maltou, mocnost klenby 45–50 cm, [7] pravidelné kvádrové lící zdivo (na vnitřní straně nepravidelné mocnosti s rozdílem ±5 cm mezi jednotlivými kvádry) tvořené karbonskými arkózami a svrchnokřídovými pískovci.

„opukové rovnániny místy pojené vápennou maltou“ (např. Witzany *et al.* 2002) proto nelze aplikovat na pozorování, uskutečněná v sondě K7 i v sondách předchozích průzkumů po roce 2002 (Drozd a Přikryl 2003, Drozd *et al.* 2005). Podle současných poznatků lze výplňové zdivo Karlova mostu interpretovat jako materiál skladbou shodný s tzv. „římským betonem“ (vysvětlení viz dále), jehož používání se rychle rozšířilo po 1. století před Kr. v římské říši např. pro budování středomořských přístavů (viz např. Oleson *et al.* 2004).

Ještě větším překvapením potom bylo zjištění, že stabilitu kleneb Karlova mostu zajišťuje nejen vnější klenba lícniho zdiva (pískovcové kvádry), nýbrž také druhá, vnitřní klenba navazující na lícni zdivo. Karlův most tedy chrání systém dvou nezávislých kleneb o celkové mocnosti 90 až 100 cm. To mimo jiné znamená, že i při značném narušení kvádrů lícniho zdiva např. zvětrávacími procesy, by nemělo dojít ke zřícení celého oblouku, pokud si vnitřní klenba zachová svou stabilitu.

## ROZBOR LOMOVÉHO KAMENE ZE SONDY K7

### Petrografický rozbor a zařazení hornin

Cílem petrografického rozboru přírodního kamene z památkových objektů je podrobný popis horniny, což usnadňuje petrografické zařazení a zjištění zdrojové lokality (místa výlomu kamene). Dosažené poznatky mají stavebněhistorický i praktický význam (Přikryl 2007), například pokud musí být část původního kamene nahrazena novým, třeba z důvodu nadměrného poškození zvětrávacími procesy. Možnost aplikace autentického kamene ze stejné lokality nebo alespoň ze stejné geologické jednotky s obdobnými vlastnostmi by měla být samozřejmým vyústěním takového výzkumu.

Petrografický rozbor lomového kamene ze sondy K7 se soustředil na standardní makro a mikroskopický petrografický popis pomocí optické mikroskopie horninových výbrusů. Horniny byly též studovány pomocí RTG difrakční analýzy (popis metody a analytických podmínek jsou uvedeny v části popisující materiálový rozbor malt), která umožnila přesnější určení přítomných minerálů.

Makroskopicky se všechny vzorky lomového kamene odebrané v sondě K7 prakticky neliší, tj. mají charakter velmi jemnozrnných sedimentárních hornin světle béžových až krémově nažloutlých barev, zpravidla s dobře patrnou sedimentární vrstevnatostí. Při makroskopickém zkoumání nevykazují žádný stupeň narušení a jsou velmi pevné. Na ostrých lomových plochách mají miskovitě prohlubně, charakteristické pro opuky z české křídové pánve.

Z mikroskopických pozorování a doplňujících analytických rozborů pomocí RTG a silikátové analýzy vyplynulo, že převažujícími minerály studovaných hornin jsou fáze s chemickým složením  $\text{SiO}_2$  (množství nad 50 obj. %): pozorován byl jak velmi drobnozrnný úlomkovitý křemen (tedy dobře krystalická forma  $\text{SiO}_2$  zrnitostí odpovídající prachové frakci) v množství 5–10 obj. %, tak velmi jemnozrnné, v základní hmotě rozptýlené formy  $\text{SiO}_2$  s nižším stupněm krystalinity, který odpovídá CT-opálu, případně tridymitu. Nízký stupeň krystalinity těchto forem  $\text{SiO}_2$  byl potvrzen RTG difrakčním rozbohem s vyhodnocením pomocí tzv. indexu krystalinity křemene (podrobnosti viz Murata a Norman 1976), který se pro tento typ stanovení pou-

| vzorek                  | K7/7 (typ I) | K7/16 (typ II) | K7/5 (typ III) | K7/18 (typ IV) |
|-------------------------|--------------|----------------|----------------|----------------|
| $\text{SiO}_2$          | 71,66        | 49,65          | 66,00          | 55,00          |
| $\text{TiO}_2$          | 0,26         | 0,12           | 0,26           | 0,24           |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 5,04         | 2,65           | 5,25           | 4,84           |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 0,70         | 0,65           | 0,79           | 0,75           |
| $\text{FeO}$            | 0,28         | 0,18           | 0,20           | 0,54           |
| $\text{MnO}$            | 0,01         | 0,01           | 0,01           | 0,03           |
| $\text{MgO}$            | 0,26         | 0,21           | 0,28           | 0,29           |
| $\text{CaO}$            | 10,28        | 24,96          | 13,34          | 19,86          |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0,14         | 0,07           | 0,12           | 0,13           |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 1,08         | 0,60           | 0,90           | 0,87           |
| $\text{P}_2\text{O}_5$  | 0,03         | 0,27           | 0,02           | 0,03           |
| $\text{H}_2\text{O}^-$  | 0,24         | 0,10           | 0,26           | 0,30           |
| $\text{H}_2\text{O}^+$  | 2,56         | 3,34           | 2,96           | 3,87           |
| $\text{CO}_2$           | 7,28         | 16,90          | 9,34           | 12,95          |
| Součet                  | 99,82        | 99,71          | 99,73          | 99,70          |

Tab. 2: Výsledky silikátové analýzy 4 vzorků opuk (vzorky z kopané sondy K7 v poli č. XIV Karlova mostu), reprezentujících dílčí petrografické typy určené mikroskopickým výzkumem. Stanoveno v Laboratořích geologických ústavů PrF UK (analyzoval Jílková, Vonásková, č. protokolu 6/CHL/09), hodnoty uvedeny v hm. %.

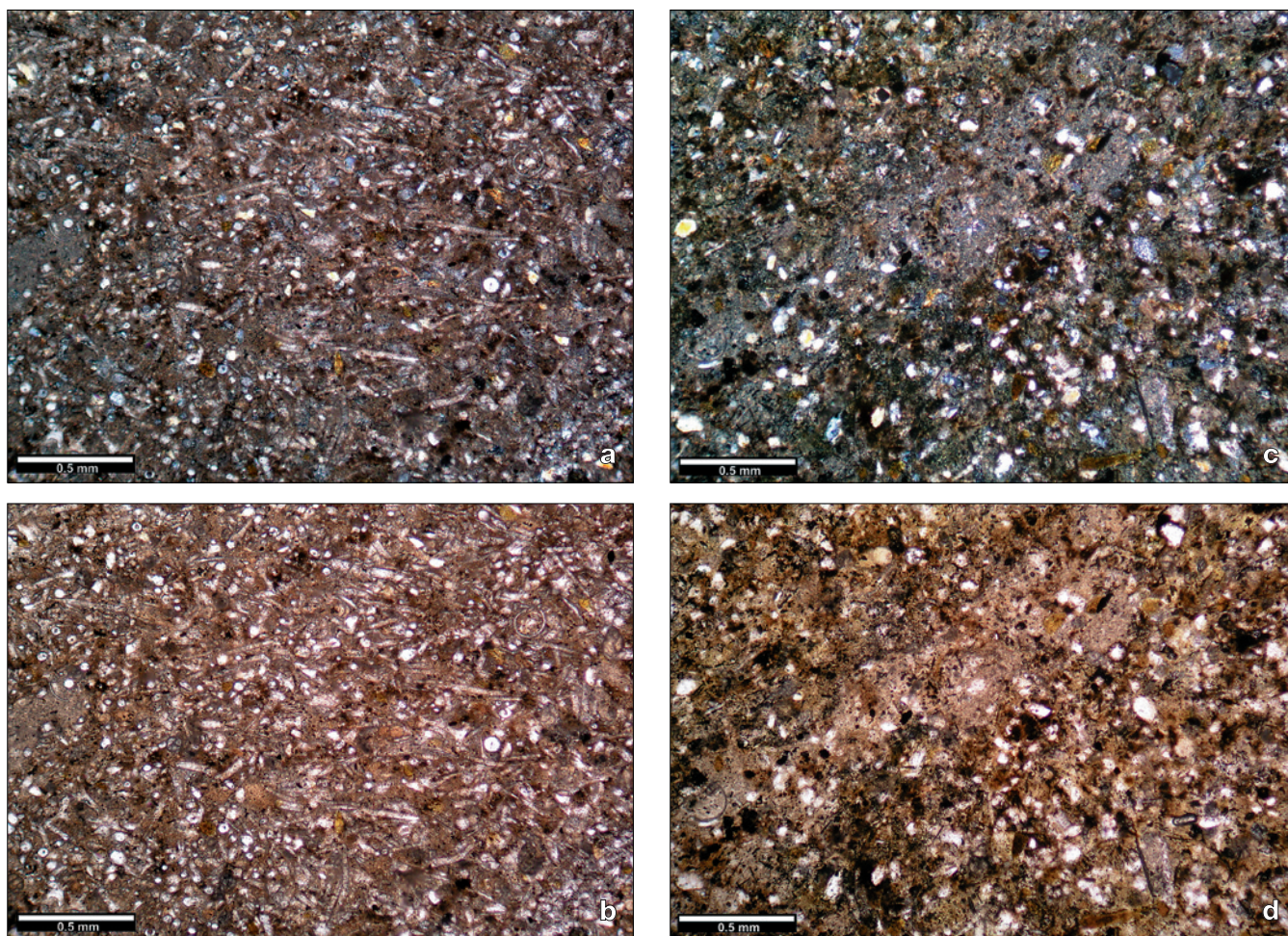
žívá. Obsah kryptokrystalických až amorfních forem  $\text{SiO}_2$  byl určen v rozmezí 35–50 obj. %.

Druhou nejběžnější složkou studovaných hornin je kalcit, který se vyskytuje téměř výlučně v podobě velmi jemnozrnného kalu (tzv. mikritický kalcit), opět tvořícího součást základní hmoty. Obsah kalcitu byl odvozen na základě hmotnostního úbytku loužením vzorku umletého na prášek v 1M HCl, následným odstředěním a opakovaným promytím destilovanou vodou (kvůli odstranění vzniklých chloridů). Úplné rozpuštění přítomného uhličitanu bylo kontrolováno opakovaným měřením RTG difrakcí. Celkový obsah kalcitu ve studovaných horninách se pohybuje v širokém rozmezí 16–43 hm. %. Protože kalcit není v žádném ze zkoumaných vzorků přítomen nad 50 %, nelze studované horniny řadit mezi vápence. Kalcit má v těchto horninách slabou příměs hořečnaté složky, což potvrzují RTG difrakční rozbor, chemická analýza vybraných vzorků (tab. 2) a pozorování výbrusů pomocí katodoluminiscence.

Třetí skupinu minerálů, zjištěnou ve studovaných vzorcích, tvoří jílové minerály (tj. vrstevnaté křemičitany), příslušející podle RTG analýzy kaolinitu a illitu. Jejich obsah nepřekračuje 10 obj. %. Mikroskopicky byl ve studovaných vzorcích potvrzen také glaukonit v množstvích 1–3 obj. % a též velmi jemnozrnné lupínky muskovitu (zpravidla do 1 obj. %). Přítomnost bobtnajících jílových minerálů ze skupiny smektitu, které tvoří minoritní příměs v některých typech opuk české křídové pánve (viz např. Kužvartová a Wolter 1988) nebyla potvrzena ani po podrobném RTG difrakčním rozboru preparátů napařených ethylenglykolem.

Ve stopových množstvích byly identifikovány minerály rutil/anatas (chemicky oxid titaničitý) a goethit (oxohydroxydy železa), které horninám dodávají charakteristický barevný vzhled.

Studované horniny vykazují laminární aleuro-pelitic-



Obr. 4: Mikroskopický charakter lomového kamene – opuk (všechny snímky A. Šiastná): a, b – opuky s nejvyšším obsahem kalcitu (tzv. typ II dle tab. 2), bohaté mikrofosiliemi (vzorek K7/3); c, d – opuky s nejnižším obsahem kalcitu a nejvyšším obsahem různých forem  $\text{SiO}_2$  (tzv. typ I dle Tab. 2), s hojnou klastickou příměsí (vzorek K7/1).

kou mikrostavbu (obr. 4), místy přecházející až do chuchvalcovité. Typickou součástí vnitřní stavby těchto hornin je proměnlivá přítomnost bioklastů (3–20 obj. %), mezi nimiž jsou zastoupeny jak foraminifery, tak i jehlice mořských hub (obr. 4c, d).

Lomový kámen ze sondy K7 lze petrograficky klasifikovat (podle klasifikace sedimentárních hornin navržené Kontou 1973) jako jílovito-kalcitické silicity až kalcitické silicity. V případě volby názvosloví, používaného v kamenické praxi, se tyto horniny označují jako opuky.

#### Určení zdrojové lokality

Zkoumané vzorky lomového kamene výplňového zdiva sondy K7 se svým vzhledem shodují s opukami pocházejícími z bělohorského souvrství (Čech *et al.* 1980), tedy stratigraficky přísluší ke svrchnokřídovým sedimentům české křídové pánve, konkrétně pražské (vltavsko-berounské) faciální oblasti. Za zdrojovou oblast zkoumaných hornin lze určit území mezi Petřínem a Bílou Horou, kde byly těženy v řadě lomů již od raného středověku. Zdejší lomy jsou evidovány v soupisech lomů pod č. 112 (Prokop 1951) a jsou zaneseny a dokumentovány v Atlasu historických sochařských a dekoračních kamenů České republiky (dosud nepublikovaná sbírka restaurátorské školy Akademie výtvarných umění v Praze a geologické sekce přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze).

Drobné pozůstatky dávné těžby v rozsáhlých tzv. „strahovských“ lomech (viz např. Bouček 1951) lze dodnes najít na několika místech, z nichž nejvíce patrně leží u usedlosti Ladronka. Další, ale vzdálenější lokalitou s podobným typem horniny je dodnes činný lom u Přední Kopaniny.

Horniny, dříve těžené na Petříně a Bílé Hoře, se v literatuře objevují pod různými názvy: např. **bělohorská opuka** (Krejčí 1870), **pražská opuka** (Zahálka 1926), **strahovská opuka** (Rybařík 1983). Místní horniny byly používány jako běžný lomový stavební kámen (Frič 1879, Prokop 1951), ale též pro kamenicky opracovávané prvky – schody, dlaždice (Frič 1879). Blízkost lomů, a tudíž snadná dostupnost dobře opracovatelného kamene v libovolné velikosti a tvarech, doplněné příznivými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, vedly logicky k využití tohoto materiálu pro výplňové zdivo Karlova mostu.

#### SLOŽENÍ A VLASTNOSTI MALT ZE SONDY K7

##### Význam materiálových rozborů malt

Primárním cílem rozboru malt z historických staveb je snaha zjistit, jaký typ pojiv byl použit – tedy zda pojiva vzdušná (zejména vzdušná vápenná vzniklá vypálením čistých kalcitických vápenců, po vyhašení vytvářející hydroxid vápenatý, jenž posléze tuhne za přístupu vzduchu zpět na uhličitán vápenatý) nebo pojiva hydraulická (tj. pojiva na bázi hydraulických vápen, přírodního cementu ne-

bo portlandského cementu, která se připravují výpalem při vyšších teplotách než vzdušná vápna, tuhnou i pod vodou za vniku složité směsi hydratovaných křemičitanů, hlinitanů a hlinitokřemičitanů). Stanovení typu pojiv má význam nejen praktický kvůli zvolení optimálního materiálu při opravě památky, ale též význam stavebně- a technologicko-historický.

Vzdušná pojiva se postupně stala běžnou součástí zdících malt již od neolitu (např. Wright 2005); znalost přípravy a použití hydraulických pojiv je podstatně mladšího data. Většina badatelů se shoduje, že objev pravých hydraulických pojiv lze datovat do republikánského období římské říše v průběhu 3.–2. století před Kr. (Adam a Mathews 1994), kde byl tento typ pojiv používán pro významné inženýrské stavby typu přístavních hrází, akvaduktů a mostů v celé oblasti Středomoří (např. Oleson et al. 2004). Znalost používání hydraulických pojiv však měla podle některých autorů (Charola a Henriques 2000) vymizet s úpadkem římské říše a údajně byla „znovuobjevena“ až na přelomu 18. a 19. století v souvislosti s pokusy Smeatona, Vicata a Aspdina (podrobněji viz např. Bárta 1961) zaměřenými na přípravu vhodného trvanlivého pojiva pro inženýrské projekty éry průmyslové revoluce. Případný přímý důkaz o systematickém používání těchto pojiv v oblasti střední Evropy během středověku by tudíž znamenal významný příspěvek, dokumentující zachování antické tradice přípravy stavebních hmot a navazujících stavebních postupů i po pádu římské říše.

Znalost složení malt a určení typu jejich pojiva má zásadní význam i pro odvození fyzikálních vlastností (včetně mechanických), pro definici jejich odolnosti vůči vnějšímu namáhání a vůči působení degradačních mechanismů včetně krystalizace solí a namáhání působením mrznoucí vody. Tato odolnost je obecně daleko vyšší u hydraulických pojiv než u pojiv vzdušných.

S ohledem na výše uvedené skutečnosti bylo deset odebraných vzorků malt podrobně studováno pomocí několika analytických metod s cílem: 1. zjistit celkové složení a stanovit typ plniv a jejich podíl, 2. určit typ anorganických látek v pojivu a 3. potvrdit nebo vyvrátit přítomnost organických látek.

### Makro a mikroskopický charakter studovaných malt

Při makroskopickém zkoumání je patrné, že všechny odebrané vzorky malt obsahují směs plniva (jemné kamenivo, zpravidla dobře opracované, zrnitostně odpovídající písku (1–2 mm), šedavých barev) a pojiva (světle šedá, velmi jemnozrná hmota pojící plnivo). Součástí studovaných malt jsou také hojně ostrohranné úlomky bílých barev a velikosti 2–5 mm. Tyto úlomky jsou až na naprosté výjimky velmi tvrdé a u všech analyzovaných vzorků se jednalo o přepálené úlomky prvohorních vápenců, případně druhohorních opuk. Celkově jsou studované malty velmi tvrdé a soudržné, nedrolí se.

Mikroskopický rozbor (optická mikroskopie výbrusů, zhotovených stejným postupem jako výbrusy z lomového kamene, provedeno v laboratoři optické mikroskopie Ústavu geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PŘF UK Richardem Přikrylem) prokázal, že hlavní složkou plniva (jemného kameniva) studovaných malt je říční písek, v němž převládají zrna křemene (mono- a polykrystalická zrna mag-

matického i metamorfního původu, subangulárního až suboválného tvaru, zrnitost 0,08–1,5 mm), méně hojná pak jsou zrna živců (subangulární, často sericitisovaný draselný živec), slíd (lupínky muskovitu), amfibolu a pyroxenu. Četné úlomky pocházejí z hornin typu granodioritů, případně křemenců (tvar, opracování i velikost obdobné jako u křemenných zrn), hojně jsou též klasty jílovito-železitých prachovců (tato zrna jsou často tvarově protažená a výrazně oválná). Ve 4 studovaných vzorcích malt byly nalezeny ojedinělé úlomky (2–3 zrna na 2 cm<sup>2</sup> pozorované plochy výbrusu), které svým složením a strukturou připomínají cihelný střep (obr. 5a).

Pojivo velmi jemnozrného charakteru vyplňuje prostor mezi zrny plniva. Poměr mezi plnivem a pojivem se pohybuje v rozmezí 2,6–3,2 : 1 (měřeno pomocí počítačové analýzy obrazu na výbrusech), což je v poměrně značné shodě s výsledky získanými rozpouštěním – 2,4–3 : 1 (Drdácký a Slížková 2008). Velmi jemnozrný charakter pojiva zneusnadňuje, resp. neumožňuje přímé určení přítomných složek v standardním optickém polarizačním mikroskopu; proto bylo jeho látkové složení studováno analytickými metodami – RTG difrakcí a FTIR spektrometrií (viz dále).

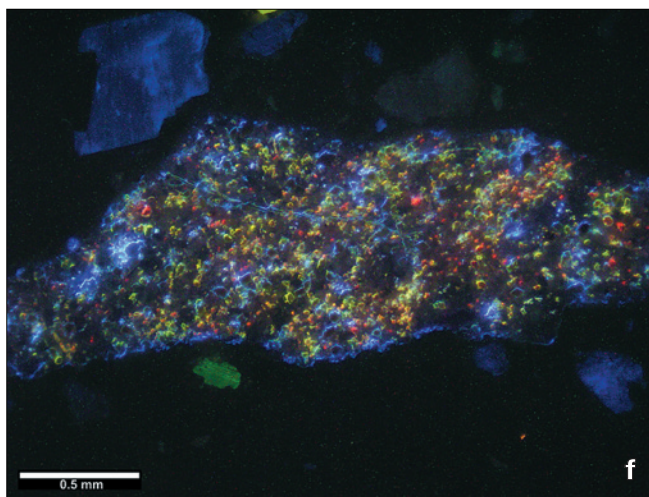
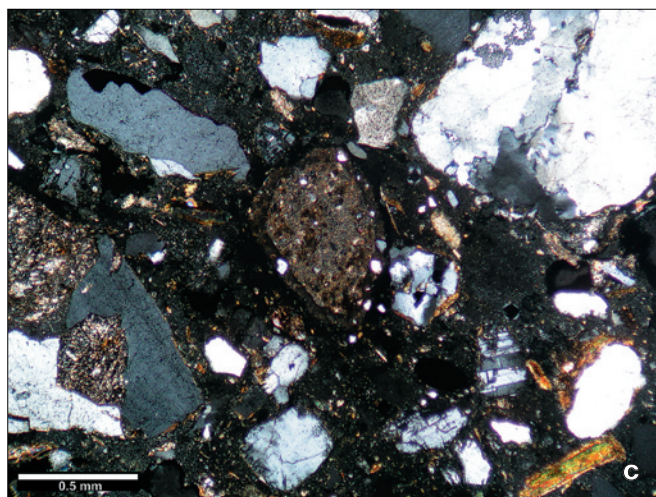
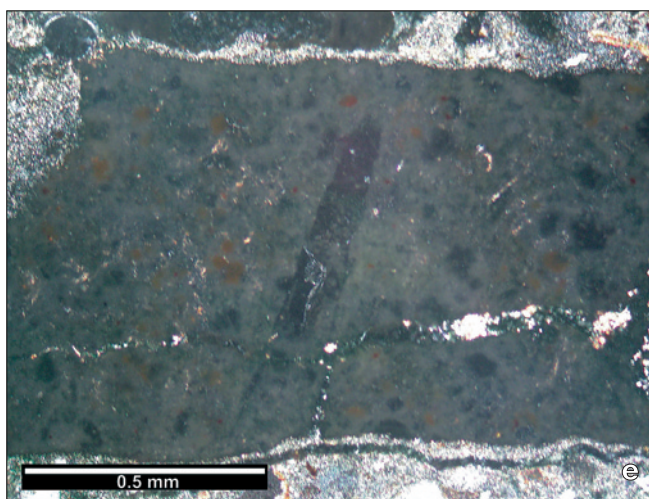
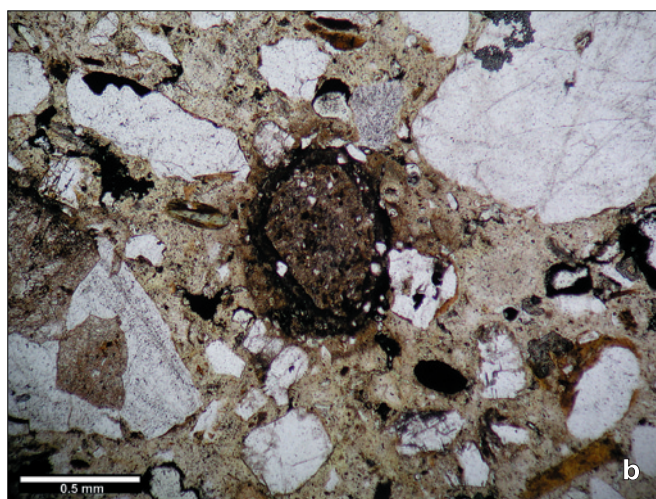
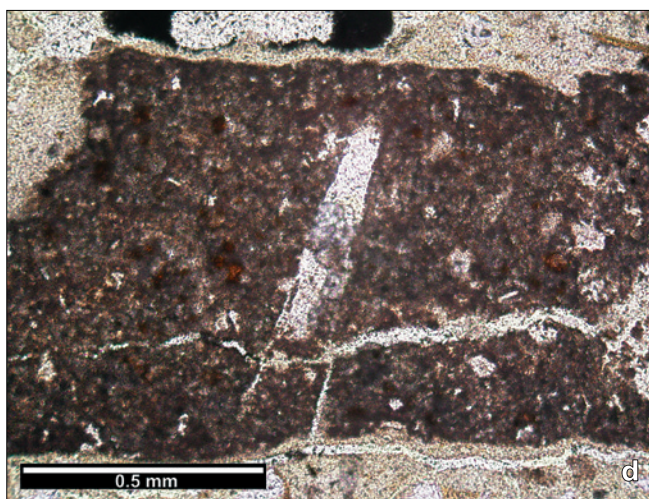
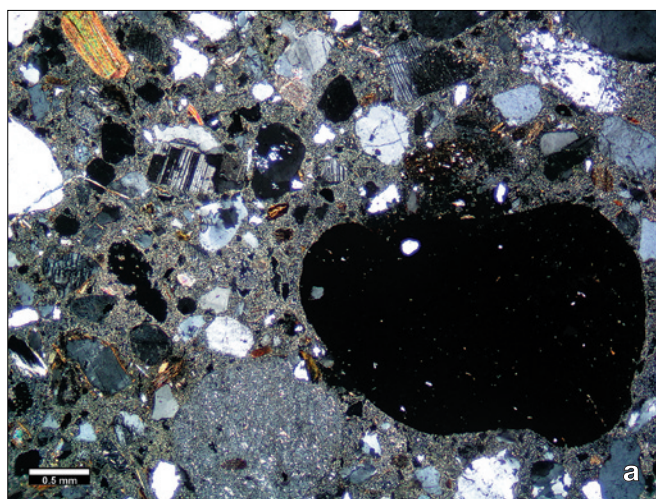
Kromě výše dvou uvedených základních složek obsahují všechny studované malty dobře rozeznatelné úlomky vypálených karbonátových hornin, které představují zachovalé větší kusy pojiva. Velikost těchto úlomků při pozorování v mikroskopu se pohybuje v rozmezí 0,4–1,8 mm. V několika málo případech byly v těchto úlomcích zachovány rovněž zbytky fosilií, které umožňují přibližné stratigrafické zařazení alespoň části vápencové suroviny k radiotinským vápencům z oblasti Barrandienu (obr. 5b, c). Je velmi pravděpodobné, že pro výpal vápen byly použity i další typy devonských vápenců, včetně dvorecko-prokopských, které obsahují nejvyšší podíl jílových a křemitých příměsí.

Dalším významným prvkem, který se podařilo mikroskopickým výzkumem potvrdit, je přítomnost drobných úlomků opuk (stejněho typu jako lomový kámen) velikostí nepřesahujících 0,5 mm (obr. 5d, e). U těchto úlomků byl pozorován na povrchu tenký „reakční lem“ (stejný byl zjištěn i na kontaktu pojiva s hrubým kamenivem – obr. 5d, e), který zřejmě souvisí se specifickými fyzikálními vlastnostmi (měrným povrchem) a mineralogickým složením opuk (přítomnost vysoce reaktivních, kryptokrystalických forem SiO<sub>2</sub>), snadno reagujících s vápenným hydraulickým pojivem. Toto pozorování si vyžaduje další analytické rozbor, jejichž záběr přesahuje hlavní cíle tohoto příspěvku.

Součástí struktury studovaných malt je také pórový prostor, který má jednak charakter oválných až kruhových uzavřených pórů a dále drobných trhlin, spojených zřejmě s kontrakcí hmoty malty při tuhnutí. Podrobnější stanovení geometrických parametrů pórového prostoru studovaných malt bylo provedeno metodou vysokotlaké rtuťové porosimetrie (viz dále).

### Anorganické složky pojiva v maltách výplňového zdiva

S ohledem na drobnozrný charakter pojivové složky malt bylo její složení analyzováno pomocí RTG difrakční analýzy, která umožňuje spolehlivé stanovení anorganických látek, vznikajících při tuhnutí vzdušných i hydraulických pojiv. Tyto látky mají charakteristickou strukturu, kterou lze identifikovat příslušnými analytickými metoda-



Obr. 5: Mikroskopický vzhled malt původního výplňového zdiva (všechny snímky A. Štátná): a – velký zaoblený úlomek v pravém dolním rohu patří pravděpodobně cihelnému střepu (vzorek K7/6); b, c – oválný úlomek ve středu snímku reprezentuje nepřepálený úlomek opuky s dobře patrným reakčním lemem v hornině po reakci jejich velmi reaktivních forem  $\text{SiO}_2$  s hydraulickým vápenným pojivem (vzorek K7/4); d, e – úlomek přepáleného vápence, který lze vzhledem k zastížené mikrofosilii (patří s největší pravděpodobností mezi tentakulity – F. Vacek, pers. com. 2009) přiřadit k tzv. radotínským vápencům (jemně bioklastické bituminózní vápence spodního devonu, stupeň lochkov, lochkovské souvrství); f – snímek přepáleného úlomku opuky identifikovaný pomocí katodoluminiscence (vzorek K7/13).

mi. Pro tento účel se zpravidla používá metoda práškové RTG difrakce, při níž je studovaná látka vystavena orientovanému RTG záření, které se při interakci (difrakci) s látkou uspořádá do určitých difrakčních pásů. Vzhledem k výlučné struktuře každé krystalické látky je i její výsledný di-

frakční obraz jedinečný a lze z něj studovanou látku také určit. Toto samozřejmě platí i pro směsi látek. Metoda má však určité omezení, pokud se týká obsahu látky ve směsi; mez detekce této metody dosahuje 2–3 hm. %. Výhodou této analytické metody je možnost zkoumání velmi malých

| název                                                                                        | chemický vzorec                                                                                                                           | K7/2<br>/vap | K7/6<br>/vap | K7/8 | K7/8<br>/vap | K7/10<br>/vapM | K7/10<br>/vapT | K7/12<br>/vap | K7/13<br>/vap | K7/15<br>/vap | K7/17<br>/vap | K7/20<br>/vap |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>uhličitaný</b>                                                                            |                                                                                                                                           |              |              |      |              |                |                |               |               |               |               |               |
| kalcit                                                                                       | CaCO <sub>3</sub>                                                                                                                         | +            | +            |      |              | +              |                | +             | +             | +             | +             | +             |
| vaterit                                                                                      | CaCO <sub>3</sub>                                                                                                                         |              |              |      | +            | +              |                |               |               |               |               |               |
| <b>křemen</b>                                                                                |                                                                                                                                           |              |              |      |              |                |                |               |               |               |               |               |
| křemen                                                                                       | SiO <sub>2</sub>                                                                                                                          |              | +            | +    |              |                |                | +             | +             |               | +             |               |
| <b>hydratované vápenaté křemičitaný, hlinitaný a hlinotokřemičitaný</b>                      |                                                                                                                                           |              |              |      |              |                |                |               |               |               |               |               |
| hydratovaný křemičitan vápenatý                                                              | Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> •H <sub>2</sub> O                                                                                        |              |              |      |              |                |                |               | +             |               |               |               |
| hydratovaný křemičitan vápenatý                                                              | Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> •3H <sub>2</sub> O                                                                                       | +            |              |      |              |                |                | +             |               | +             | +             | +             |
| hydratovaný křemičitan vápenatý                                                              | 2Ca <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>7</sub> •3H <sub>2</sub> O                                                                        |              |              |      | +            |                |                |               |               |               | +             |               |
| hydroxid křemičitan vápenatý                                                                 | Ca <sub>4</sub> Si <sub>5</sub> O <sub>13,5</sub> (OH) <sub>2</sub>                                                                       |              | +            |      |              |                |                |               |               |               |               |               |
| hydratovaný hlinitan-křemičitan vápenatý                                                     | CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> •3,5H <sub>2</sub> O                                                                     |              |              | +    |              |                |                |               |               |               |               |               |
| hydratovaný hlinitan-křemičitan vápenatý                                                     | Ca <sub>6</sub> (AlSiO <sub>4</sub> ) <sub>12</sub> •30H <sub>2</sub> O                                                                   |              |              |      |              |                | +              |               |               |               |               |               |
| hydroxid hlinitan-křemičitan vápenatý                                                        | Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> (SiO <sub>4</sub> )(OH) <sub>8</sub>                                                                      |              |              |      |              |                | +              |               |               |               |               | +             |
| hydratovaný hlinitan vápenatý                                                                | Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>7</sub> •xH <sub>2</sub> O                                                                         | +            |              |      |              |                |                |               |               |               | +             |               |
| hydratovaný hlinitan vápenatý                                                                | Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub> •xH <sub>2</sub> O                                                                         |              | +            |      |              |                |                | +             | +             |               |               |               |
| hydratovaný hlinitan vápenatý                                                                | Ca <sub>4</sub> Al <sub>6</sub> O <sub>13</sub> •3H <sub>2</sub> O                                                                        |              |              | +    |              |                |                |               |               |               |               |               |
| hydratovaný hydroxid hlinitan vápenatý                                                       | Ca <sub>2</sub> Al(OH) <sub>7</sub> •3H <sub>2</sub> O                                                                                    |              |              |      |              |                | +              |               |               |               |               |               |
| hydratovaný hydroxid hlinitan vápenatý                                                       | Ca <sub>2</sub> Al(OH) <sub>7</sub> •6,5H <sub>2</sub> O                                                                                  |              |              |      |              |                |                |               | +             |               |               |               |
| <b>přírodní analogy hydratovaných vápenatých křemičitanů, hlinitanů a hlinotokřemičitanů</b> |                                                                                                                                           |              |              |      |              |                |                |               |               |               |               |               |
| foshagit                                                                                     | Ca <sub>4</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>                                                                        |              |              |      |              |                |                | +             |               |               |               |               |
| gismondin                                                                                    | CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>8</sub> •4H <sub>2</sub> O                                                                       | +            |              | +    |              |                | +              |               | +             | +             | +             |               |
| gyrolit                                                                                      | Ca <sub>8</sub> Si <sub>12</sub> O <sub>30</sub> (OH) <sub>4</sub> •7H <sub>2</sub> O                                                     |              |              |      |              |                |                |               |               |               |               | +             |
| hillebrandit                                                                                 | Ca <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub>                                                                                        |              |              |      |              |                | +              |               |               | +             |               |               |
| okenit                                                                                       | CaSi <sub>2</sub> O <sub>5</sub> •2H <sub>2</sub> O                                                                                       |              |              |      |              |                |                | +             |               |               |               |               |
| oyelit                                                                                       | (CaO) <sub>2</sub> •SiO <sub>2</sub> •2H <sub>2</sub> O                                                                                   | +            |              | +    | +            |                |                |               |               |               |               |               |
| ranit                                                                                        | (Na,Ca) <sub>2</sub> (Si,Al) <sub>5</sub> O <sub>10</sub> •2H <sub>2</sub> O                                                              |              |              |      |              |                |                | +             |               |               |               |               |
| truscottit                                                                                   | Ca <sub>14</sub> Si <sub>24</sub> O <sub>58</sub> (OH) <sub>8</sub> •2H <sub>2</sub> O                                                    |              |              |      | +            |                | +              |               |               | +             |               |               |
| wairakit                                                                                     | CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>12</sub> •2H <sub>2</sub> O                                                                      | +            |              |      | +            |                |                |               |               | +             | +             | +             |
| Ca-wairakit                                                                                  | CaAl <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>16</sub> •6H <sub>2</sub> O                                                                      |              |              |      |              |                |                |               |               |               |               | +             |
| xonotlit                                                                                     | Ca <sub>6</sub> Si <sub>6</sub> O <sub>17</sub> (OH) <sub>2</sub>                                                                         |              |              |      |              |                |                |               | +             |               |               |               |
| <b>korozní a zvětrávací fáze</b>                                                             |                                                                                                                                           |              |              |      |              |                |                |               |               |               |               |               |
| ettringit                                                                                    | Ca <sub>6</sub> Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ,SiO <sub>4</sub> ,CO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> (OH) <sub>12</sub> •26H <sub>2</sub> O |              |              |      |              | +              |                |               |               |               |               |               |
| sádrovec                                                                                     | CaSO <sub>4</sub> •2H <sub>2</sub> O                                                                                                      |              |              |      |              | +              |                |               |               |               |               |               |

Tab. 3: Anorganické složky pojiva ve vzorcích malt původního výplňového zdiva zastíženého sondou K7 v poli č. XIV Karlova mostu zjištěné pomocí RTG difrakčního rozboru. Přítomnost příslušné složky označuje znaménko +. Zjištěné látky byly z praktických důvodů rozděleny na uhličitaný, křemen, skupinu hydratovaných vápenatých křemičitanů, hlinitanů a hlinotokřemičitanů (tedy hydraulické minerály vzniklé po vyzrání hydraulické vápenné malty), na jejich přírodní analogy a na korozní a zvětrávací látky (zjištěné pouze v jednom vápenném úlomku ve vzorku K7/10). Analyzováno bylo jak celkové pojivo (vzorek K7/8), tak větší úlomky (velikost 1–3 mm) vápenců. T = velmi tvrdý úlomek, M = velmi měkký, rozpadající se úlomek vápence v maltě.

množství materiálu (řádově první gramy, někdy i méně).

Pro potřeby RTG difrakční analýzy malt z výplňového zdiva v sondě K7 byly ze studovaných vzorků odebrány dvě složky: 1. vlastní pojivo, které bylo od klastického plniva (říčního písku) odděleno pod binokulární lupou, a 2. 2–5 mm velké úlomky vápna (tedy nerozpadlý přepálený vápenc). Před vlastní analýzou byly tyto dílčí vzorky utřeny v achátové misce na analytickou jemnost. Vlastní preparáty byly proměřeny na difraktometru X'Pert Pro, PANalytical B. V. (laborať RTG difrakční analýzy, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PrF UK) s následujícími podmínkami měření: zdroj CuK $\alpha$ , napětí 40 kV, proud 30 mA, úhlový obor 2Theta: 3–70°, krok 0,05°, doba načítání 200 s; PrF UK v Praze (operátor Mgr. Petr Drahota). Vyhodnocení RTG difrakčních záznamů bylo provedeno pomocí počítačového programu X'Pert HighScore 1.0d, PANalytical B. V. s užitím databáze difrakčních spekter (JCPDS 1999) (vyhodnotil R. Přikryl).

Kvalitativní analýza naměřených difrakčních spekter jednoznačně prokázala přítomnost hydraulických fází, které mají charakter hydratovaných vápenatých křemičitanů (C-S-H), hlinitanů (C-A-H) a hlinitanokřemičitanů (C-A-S-H) (podrobnosti viz tab. 3). Ve všech vzorcích, které reprezentují úlomky vápence, byla rovněž potvrzena přítomnost uhličitanů (kalcit, vaterit). RTG difrakční rozbor pojiva malt ze sondy K7 dokládá, že pojivo mělo charakter hydraulického vápna, které vzhledem k vysoké tvrdosti těchto malt muselo být vysoce hydraulické.

#### Původ surovin a technologie výroby pojiv

Z uvedených výsledků vyplývá další otázka, a to odkud byla brána surovina, případně zda byly při přípravě pojiv (tedy jejich pálení) nebo při přípravě malty přidávány další přísady, které mohly zvýšit výslednou hydraulicitu směsi. V odborné literatuře existuje řada dokladů o pálení hydraulického vápna v oblasti Prahy, pro něž byly používány pr-

vohorní vápence Barrandienu. Vápno, vypálené z této suroviny na staroměstském břehu Vltavy, se potom označovalo jako pražské nebo staroměstské vápno (viz např. Bárta 1961), někdy též jako černé pražské vápno.

Z chemických rozborů vápenců, které se v této oblasti v době středověku těžily, však vyplývá (viz data uvedená Brunnerovou 2001), že vypálené vápno mohlo mít většinou střední stupeň hydraulicity podle Cowpera (1927). Je tedy zřejmé, že vysoké kvality pojiva mohlo být dosaženo přidáním dalších složek. Nejpravděpodobnějším vysvětlením je vytváření surovinové směsi před výpalem, tj. přidání určitého podílu nadrcené druhohorní opuky (odpad z těžby bělohorských a strahovských opukových lomů) k prvohorním barrandienským vápencům. Jak ukazují analytické rozborů opuky (viz též kapitola o lomovém kameni výplňového zdiva), její podstatnou součástí tvoří amorfní a kryptokrystalické formy  $\text{SiO}_2$ , které svou vysokou povrchovou energií odpovídají tzv. pucolánovým (tedy hydraulicitu zajišťujícím) přísadám používaným již od starověku, ať již se jedná o sopečný popel z okolí Vesuvu (zmiňován již Vitruviem) nebo porýnskými trasy (Kraus 2006). Předpoklad přidávání opuk do surovinové směsi pro výpal hydraulického vápenného pojiva podporují rovněž nálezy přepálených úlomků opuk pomocí katodoluminiscence (obr. 5f). Druhohorní opuky navíc obsahují vyšší podíl jílových minerálů než většina barrandienských vápenců.

Hypotézu používání opuk v historických hydraulických vápenných pojivech ve středověké Praze ostatně podporují i věrohodné písemné záznamy, z nichž lze citovat pravděpodobně nejvýznamnější od Bohuslava Balbína, který v 2. polovině 17. století ve svém monumentálním díle *Miscellanea historica regni Bohemiae* poznamenal: „*O vápenčí snad bych se ani nemusel zmiňovat, když je společný všem krajinám, ale sama výborná jakost českého vápence nedovolí, abych jej opomenul ... Kusy znamenitého vápence se dobývají na četných místech po Čechách. Vápenné pece jsou všude u lesů, ale mohutné skály, které se naskytnou poutníkům do Prahy na pravém břehu Vltavy za Vyšehradem, a bloky odsekávané na Bílé hoře dávají vápenec tak bělostný, lesklý a čistý, že při pálení a hašení nezůstane téměř žádný odpad. Celý kamenný blok je vlastně čistý vápenec; pražské vápno se mění v kašovitou hmotu tak bílou, že se dobře hodí pro štukátorskou výzdobu, jak se tomu nyní říká. Italové dokonce nazývají jakékoliv dobré italské vápno slovy pasta di Praga.*“

Provedené materiálové rozborů rovněž ukazují na skutečnost, že se nemohlo jednat o vápenné malty, kde by pojivem bylo prosté hašené vzdušné vápno, k němuž se před jeho aplikací přidávaly různé hydraulické přísady jako sopečný popel, tras nebo drčený, nízko pálený keramický střep. Tyto přísady jsou sice dobře dokumentovány již od starověku (Degryse et al. 2002, Ingo et al. 2004) a používány byly po celý středověk až do novověku (drčený cihelný střep byl identifikován v barokních spárovacích maltách na pilířích 8 a 9 Karlova mostu – Příkrýl, dosud nepublikovaná data), ale v původním gotickém výplňovém zdivu spolehlivě potvrzeny nebyly, resp. mohly tvořit pouze minoritní přísadu.

Systematické analytické studium používání místních hydraulických vápenných pojiv na pražských, případně českých památkách dosud chybí. Výjimku v tomto ohledu

tvoří ojedinělé průzkumné práce provedené např. na chrámu sv. Mikuláše v Praze (Šíroky et al. 2002).

### Organické látky v maltách Karlova mostu

Základním cílem rozboru historických malt z hlediska možné přítomnosti přírodních organických látek (např. Chandra a Ohama 1994) je podobně jako u anorganických složek odvození technologie jejich přípravy a zpracování. Různé organické přísady v maltových směsích zejména s hydraulickým pojivem výrazně ovlivnily jejich technologické vlastnosti během přípravy a aplikace – např. plasticitu, oddálení doby tuhnutí, ale též trvanlivost (např. Sickels 1982, Chandra et al. 1998). Na rozdíl od anorganických, zpravidla dobře krystalických látek, nevytváří většina organických látek pravidelnou krystalovou strukturu. Rovněž jejich obsah v materiálech typu historických malt bývá nízký (desetiny procenta až procent) a pro jejich stanovení proto musí být voleny odpovídající analytické metody.

V oblasti studia historických malt se kromě hmotnostně spektrometrických metod nejčastěji používá infračervená spektrometrie s Fourierovou transformací (dále jen FTIR spektrometrie) (např. Derrick et al. 1999). Jedná se o absorpční spektroskopickou metodu, která vychází z faktu, že každá chemická vazba mezi atomy organické látky ve vzorku pohlcuje (absorbuje) dopadající infračervené záření v závislosti na energii svého vibračního pohybu. Pohlcená energie dopadajícího záření se ve spektru projeví absorpčním pásem, jehož poloha na ose x (tj. poloha na ose vlnových čísel) je specifická pro typ chemické vazby, tj. pro dané chemické složení vzorku. Tato analytická metoda umožňuje stanovit chemické složení vzorku na základě vyhodnocení infračervených spekter, resp. poloh absorpčních pásů ve spektru. Spektrum analyzovaného vzorku se potom porovnává se spektry standardů uloženými v knihovně spekter. Pokud není v knihovně nalezeno vhodné srovnávací spektrum, pak je měřené spektrum superpozicí spekter všech složek analyzované směsi. Identifikace je potom založena na prostém vyhodnocení poloh analytických absorpčních pásů a zkušenosti chemika – analytika.

Před vlastním měřením pomocí FTIR spektrometrie byly pevné vzorky malt ze sondy K7 homogenizovány v ocelovém kulovém mlýnku a poté z nich byly připraveny KBr tablety a extrakty v rozpouštědlech. Pro analýzu pomocí KBr tablet bylo odváženo 0,8 mg vzorku, který byl s 300 mg práškového sušeného bromidu draselného homogenizován a upraven do tablety. Dále bylo z homogenizovaného vzorku odváženo po 1,5 g vzorku a extrahováno 2 ml rozpouštědla, přičemž byly použity 3 různé typy rozpouštědel: voda (demineralizovaná), chloroform + toluen (1 : 1), aceton. Všechny extrakce byly prováděny v ultrazvukové pračce při teplotě na 65° C. Extrakty byly po odstředění odsáty pipetou a odpařeny na hodinovém sklíčku za pokojové teploty do sucha. Odparek byl nanesen na NaCl okénko v tenkém filmu, spolu s podložkou byl vložen do infračerveného spektrometru a proměřen. Všechny tyto úpravy vzorků byly provedeny na pracovišti, kde byla následně provedena i měření.

Vlastní analýza byla provedena na FTIR spektrometru Nicolet 6700 (Thermo, Nicolet, USA) v Laboratoři molekulové spektroskopie VŠCHT Praha Ing. Miroslavou Novotnou, CSc. s následujícími podmínkami: detektor DTGS, dě-

| Vzorek | Identifikované složky v KBr tabletě                                     | Identifikované složky v odparku H <sub>2</sub> O extraktu                                             | Identifikované složky v odparku acetonového extraktu                                 |
|--------|-------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| K7/2   | kalcit, křemičitan, dusičnan, vlhkost, Ca(OH) <sub>2</sub> (portlandit) | Uhličitan, křemičitan, sůl organické kyseliny (vyšší mastné)                                          | Celulóza, lignin                                                                     |
| K7/4   | kalcit, křemičitan, dusičnan, vlhkost, Ca(OH) <sub>2</sub> (portlandit) | Uhličitan, křemičitan, sůl organické kyseliny (vyšší mastné)                                          | Celulóza, lignin, síran                                                              |
| K7/6   | kalcit, křemičitan, dusičnan, vlhkost, Ca(OH) <sub>2</sub> (portlandit) | Uhličitan, křemičitan, sůl organické kyseliny (vyšší mastné)                                          | Celulóza, lignin                                                                     |
| K7/8   | kalcit, křemičitan, dusičnan, vlhkost, Ca(OH) <sub>2</sub> (portlandit) | Síran, uhličitan, dusičnan, sůl organické kyseliny (vyšší mastné)                                     | Uhličitan, dusičnan, sůl organické alifatické kyseliny, křemičitan, celulóza, lignin |
| K7/10  | kalcit, křemičitan, dusičnan, vlhkost, Ca(OH) <sub>2</sub> (portlandit) | Síran, uhličitan, dusičnan, sůl organické kyseliny (vyšší mastné)                                     | Sůl organické alifatické kyseliny                                                    |
| K7/12  | kalcit, křemičitan, dusičnan, vlhkost, Ca(OH) <sub>2</sub> (portlandit) | Dusičnan, uhličitan, SiO <sub>2</sub> , křemičitan, sůl org. kyseliny (vyšší mastné), amid- protein ? | Celulóza, lignin, uhličitan                                                          |
| K7/13  | kalcit, křemičitan, dusičnan, vlhkost, Ca(OH) <sub>2</sub> (portlandit) | Uhličitan, křemičitan, alifatický ester, sůl org. kyseliny (vyšší mastné)                             | Uhličitan, dusičnan, alifatický ester                                                |
| K7/15  | kalcit, křemičitan, dusičnan, vlhkost, Ca(OH) <sub>2</sub> (portlandit) | Uhličitan, síran, sůl org. kyseliny – např. octan                                                     | Uhličitan, křemičitan, organická látka nenalezena                                    |
| K7/17  | kalcit, křemičitan, dusičnan, vlhkost, Ca(OH) <sub>2</sub> (portlandit) | Uhličitan, síran, ester, sůl org. kyseliny – např. octan                                              | Síran, křemičitan, uhličitan, organická látka nenalezena                             |
| K7/20  | kalcit, křemičitan, dusičnan, vlhkost, Ca(OH) <sub>2</sub> (portlandit) | Síran, uhličitan                                                                                      | Celulóza, lignin, uhličitan, křemičitan, síran                                       |

Tab. 4: Anorganické i organické látky zjištěné pomocí FTIR spektrometrie ve vzorcích malt původního výplňového zdiva zastíženého sondou K7 v poli č. XIV Karlova mostu. Uvedeny jsou výsledky měření celkových vzorků v KBr tabletě i extraktů.

lič paprsku KBr, parametry měření: spektrální rozsah tablety KBr 4000 – 400 cm<sup>-1</sup>, odparky 4000 – 650 cm<sup>-1</sup>, spektrální rozlišení 4 cm<sup>-1</sup>, počet akumulací spekter 128, apodizace Happ-Genzel. Naměřená infračervená spektra byla zpracována programem Omnic 7,3 (Thermo Nicolet, USA) a identifikována s použitím knihovny spekter „Restaurátor“ (Ing. Miroslava Novotná, CSc., VŠCHT Praha).

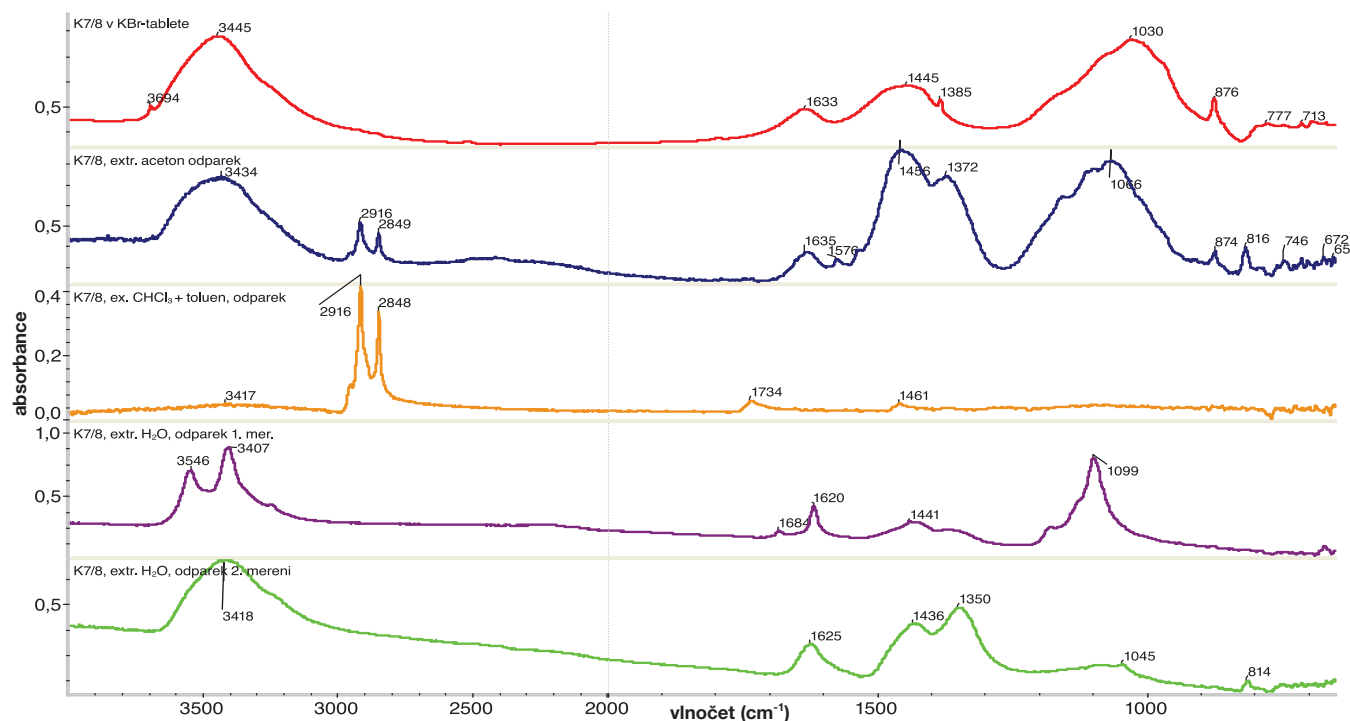
Metodou KBr tablety byly ve studovaných maltách identifikovány hlavní anorganické složky (viz tab. 4), případně organické složky, pokud se jejich koncentrace pohybovala nad 0,5–1 hm. % v analyzovaných směsích. Rozpouštědlová extrakce výrazně zvyšuje citlivost dané metody a umožňuje identifikovat přítomnost organické látky v maltě již v koncentracích cca 0,01–0,001 hm. %. Po extrakci organickými rozpouštědly nepolárními byly identifikovány nepolární organické látky, tj. ve většině vzorků alifatický ester, pravděpodobně esterový olej. Nelze vyloučit, že v tomto případě může jít i o druhotné znečištění malt během pozdější historie stavby. Polární rozpouštědlo, aceton, extrahovalo ze vzorků především polární soli vyšších mastných kyselin. Extrakce vodou potvrdila přítomnost polárních solí vyšších mastných kyselin i octanů, dále přítomnost rozpustných anorganických látek – dusičnanů, síranů, uhličitanů, křemičitanů. Pokud se ve vodném extraktu vyskytuje oxid křemičitý, jde pravděpodobně o gel, který se nepodařilo při odstředování extraktu odstranit. V jediném vzorku (K7/12) byla identifikována přítomnost blíže nespecifikovaného amidu, u kterého však je prokázáno, že není živočišného původu; poloha zjištěných absorpčních pásů neodpovídá křehkému kostnímu, vaječnému proteinu ani kaseinátu vápenatému (obr. 6). Je třeba upozornit, že všechny vzorky mohou také obsahovat i další složky, jejichž koncentrace je pod mezí detekce analytické metody (cca 0,001 hm. % pro extrakty, 0,5 hm. % pro KBr tablety). Detekční meze FTIR spektrometrie jsou však dostatečné, aby stano- vily přítomnost organických látek v koncentracích, které

mají vliv na technologické zpracování malt, tj. musí se jednat o koncentrace v řádu minimálně desetin, spíše však procent. Zde je třeba podotknout, že námi prezentované výsledky nemohou vyloučit možnost stanovení přítomnosti organických látek (včetně proteinů) v obsazích nižších než tisíciny hm. % jinými analytickými metodami (viz v současné době prezentovaná data – Kučková *et al.* 2009). Pokud by však byly tyto sloučeniny stanoveny, budou ležet hluboko pod technologicky opodstatněným minimem a budou muset být interpretovány z jiného pohledu než technologického (např. jako druhotná kontaminace nebo „rituální“ přísada ve stopovém množství).

#### Interpretace analytických rozborů malt ze sondy K7

Z provedených měření jednoznačně vyplývá, že při stavbě Karlova mostu, resp. při přípravě malty pro výplňové zdivo nebyly do malty přidávány organické látky obsahující proteiny (obecně řečeno vajíčka, mléko, klíh apod.) v množství, které by byly měřitelné standardními metodami (FTIR spektrometrie) a které by měly technologické opodstatnění. Při znalosti technologie zdění podobných konstrukcí je zřejmé, že jejich použití by postrádalo smysl, a to z následujících důvodů:

1. organické přísady (proteiny) u tohoto typu malt nepřispívají ke zvýšení pevnosti výsledné směsi (s výjimkou kaseinátu vápenatého), tu zajišťuje použití vhodných anorganických stavebních pojiv (např. vysoce hydraulického vápna, případně přírodního cementu), z nichž po smíchání s vodou vznikají během tuhnutí hydratované křemičitany, hlinitany a hlinitokřemičitany;
2. přidáním organických látek se upravovaly (a dodnes upravují) podmínky zpracovatelnosti malty jako např. oddálení doby tuhnutí nebo zvýšení plasticity, což vzhledem ke způsobu zdění výplňového zdiva Karlova mostu by vedlo k opačným efektům, než si stavitelé přáli. Například zvýšení plasticity a prodloužení doby tuhnutí



Obr. 6: Příklad vyhodnocení FTIR spekter (vzorek K7/8) získaných měřením pevného vzorku v KBr tabletě a kapalinových extraktů v acetonu, směsi chloroformu s toluenem a v destilované vodě.

by způsobilo, že větší bloky lomového kamene by ve výsoce plastické maltě začaly klesat a dosedat jeden na druhý a maltu vytlačovat směrem nahoru. Takové oddělení hmot nebylo určité žádoucí a ani nebylo v kopané sondě K7 pozorováno.

## FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI MATERIÁLŮ ZE SONDY K7

Fyzikální vlastnosti anorganických stavebních hmot, ať již se jedná o základní popisné (tzv. indexové fyzikální vlastnosti typu měrná a objemová hmotnost, pórovitost nebo nasákavost) nebo mechanické (pevnost, pružnost, přetvárnost apod.) jsou vedle látkového složení základními materiálovými parametry, které určují jejich kvalitu. Měření fyzikálních vlastností materiálů historických staveb je důležité pro ověření případného stupně porušení z důvodu např. zvětrávacích nebo degradačních procesů. Stanovení fyzikálních vlastností je také významné pro interpretaci technologie výstavby. Naměřené hodnoty z konkrétní stavby (v tomto případě z výplňového zdiva) se potom musí porovnávat se známými (tedy publikovanými) vlastnostmi materiálů o stejném nebo velmi blízkém složení.

Pro tento účel byly na vzorcích lomového kamene i malt z kopané sondy K7 stanoveny měrná a objemová hmotnost, celková pórovitost (tedy tzv. indexové fyzikální vlastnosti) a rovněž byl proveden detailní rozbor pórovitosti pomocí vysokotlaké rtuťové porosimetrie. Získané hodnoty byly porovnány s měřeními na horninách z lokalit, na nichž byl tento kámen v Praze téžen; případně s publikovanými hodnotami v případě malt s hydraulickým vápenným pojivem. Fyzikálně-mechanické vlastnosti malt výplňového zdiva Karlova mostu budou stanoveny v další etapě výzkumu v 2. polovině roku 2009.

## Fyzikální vlastnosti malt

Objemová hmotnost studovaných malt z kopané sondy K7 se pohybuje v úzkém rozmezí 1570–1676 kg/m<sup>3</sup>, se střední hodnotou 1635 kg/m<sup>3</sup> (tab. 5). Pórovitost těchto malt je v opět v úzkém rozmezí 31,7–38,9 obj. %, střední hodnota je 36,1 obj. %. Na základě těchto parametrů lze konstatovat, že studované malty ze sondy K7 v poli č. XIV Karlova mostu mají velmi malý rozptyl sledovaných parametrů, a tudíž je lze pokládat za velmi homogenní v celém studovaném profilu. Studované malty tak vykazují přinejmenším stejně dobré, spíše však lepší vlastnosti než hydraulické malty z inženýrských staveb postavených v období starověkého Říma (tab. 6), kdy například betony pro přístavní hráze na západním pobřeží Itálie, pocházející z období 1. století před Kr., dosahují hodnot objemové hmotnosti 1542–2163 kg/m<sup>3</sup> a pórovitosti 35,1–51,3 obj. % (Oleson et al. 2004). Římské malty tedy mají větší rozpětí hodnot, které pravděpodobně indikuje nehomogenitu materiálu, případně narušení zvětrávacími procesy.

| označení vzorku | objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] | měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] | pórovitost [obj. %] |
|-----------------|----------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| K7/2            | 1614                                   | 2519                                | 35,92               |
| K7/4            | 1720                                   | 2449                                | 31,72               |
| K7/6            | 1570                                   | 2569                                | 38,91               |
| K7/8            | 1676                                   | 2595                                | 35,42               |
| K7/10           | 1635                                   | 2582                                | 36,67               |
| K7/12           | 1638                                   | 2604                                | 37,09               |
| K7/13           | 1671                                   | 2538                                | 34,16               |
| K7/15           | 1620                                   | 2556                                | 36,62               |
| K7/17           | 1655                                   | 2610                                | 36,57               |
| K7/20           | 1599                                   | 2502                                | 36,08               |

Tab. 5: Základní fyzikální (tzv. indexové) vlastnosti malt původního výplňového zdiva zastřešeného sondou K7 v poli č. XIV Karlova mostu.

|                                                                                   | min   | 25% kvartil | průměr | 75% kvartil | max   | směrodatná odchylka | počet vzorků |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------|--------|-------------|-------|---------------------|--------------|
| <b>původní malty z kopané sondy K7</b>                                            |       |             |        |             |       |                     |              |
| <b>objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>]</b>                                       | 1570  | 1614        | 1635   | 1671        | 1676  | 35                  | 10           |
| <b>celková pórovitost [obj. %]</b>                                                | 31,72 | 35,42       | 36,07  | 36,80       | 38,91 | 2,00                | 10           |
| <b>malty z antických přístavů na západním pobřeží Itálie (Oleson et al. 2004)</b> |       |             |        |             |       |                     |              |
| <b>objemová hmotnost [kg/m<sup>3</sup>]</b>                                       | 1542  | 1564        | 1648   | 1650        | 2163  | 175                 | 11           |
| <b>celková pórovitost [obj. %]</b>                                                | 35,10 | 42,63       | 45,10  | 48,85       | 51,30 | 5,38                | 11           |

Tab. 6: Statistické vyhodnocení fyzikálních vlastností malt původního výplňového zdiva zastíženého sondou K7 v poli č. XIV Karlova mostu (originální data) a malt z antických přístavů na západním pobřeží Itálie (zpracováno podle údajů publikovaných Olesonem et al. 2004).

Pórovitost, měřená pomocí vysokotlaké rtuťové porosimetrie na sestavě porosimetrů Pascal 140 + 240 Thermo Electron – Porotec v Laboratoři sorpční a porometrické analýzy Ústavu struktury a mechaniky hornin AVČR, v. v. i. se pohybuje v rozmezí 25,17–38,06 obj. % (střední hodnota 30,12 obj. %) a dosahuje tak 75–95 % z celkové pórovitosti. Střední poloměr pórů se u všech vzorků pohybuje ve velmi úzkém rozmezí 11–23 nm (střední hodnota 16 nm). Studované malty mají také značně homogenní rozdělení pórovitosti mezi skupinu mezopórů (rozměr 2–50 nm), makropórů (rozměr 50–7500 nm) a hrubých pórů (rozměr nad 7500 nm). Mezopóry tvoří 50–70 % z celkového objemu pórů, makropóry 20–42 % a hrubé póry 5–13 % (tab. 7).

Mechanické vlastnosti malt výplňového zdiva ze sondy K7 Karlova mostu byly studovány týmem doc. Drdákého z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AVČR, v. v. i. Z měření, provedených na zkušebních tělesech nepravidelného a nestandardního tvaru byla vypočtena ekvivalentní

pevnost v prostém tlaku (Drdáký et al. 2008), rovnající se 7,5 a 10,3 MPa (Drdáký a Slížková 2008). Hodnoty pevnosti římských betonů z antických středomořských přístavů, studovaných Olesonem et al. (2004) mají pevnost 4,9–9,4 MPa a modul pružnosti 4,9–18,8 GPa. Ačkoliv modul pružnosti zatím na maltách výplňového zdiva Karlova mostu nemohl být stanoven, lze podle rozmezí hodnot pevnosti v prostém tlaku očekávat modul pružnosti  $\approx 6,5$ –19 GPa.

Výše uvedené výsledky svědčí o tom, že malty výplňového zdiva Karlova mostu mají velmi příznivé fyzikální vlastnosti, které snesou srovnání s maltami o podobném složení z jiných památek. Z rozboru fyzikálních vlastností rovněž vyplývá, že přípravě malt pro zdění výplňového zdiva byla při výstavbě Karlova mostu věnována maximální pozornost. Homogenita hodnot fyzikálních vlastností malt v celém profilu kopané sondy K7 také dokazuje, že malty nejsou nijak narušeny degradačními procesy, které by ohrožovaly jejich integritu a stabilitu.

| označení vzorku             | $V_{mnh}$ [mm <sup>3</sup> /g] | $V_{me}$ [mm <sup>3</sup> /g] | %    | $V_{mm}$ [mm <sup>3</sup> /g] | %    | $V_h$ [mm <sup>3</sup> /g] | %    | $S_{mnh}$ [m <sup>2</sup> /g] | r   | Por [%] |
|-----------------------------|--------------------------------|-------------------------------|------|-------------------------------|------|----------------------------|------|-------------------------------|-----|---------|
| <b>malty</b>                |                                |                               |      |                               |      |                            |      |                               |     |         |
| K7/2                        | 171,3                          | 99,8                          | 58,3 | 59,8                          | 34,9 | 11,7                       | 6,8  | 16                            | 15  | 29,88   |
| K7/4                        | 158,6                          | 98,6                          | 62,2 | 44,1                          | 27,8 | 15,9                       | 10,0 | 15                            | 18  | 27,99   |
| K7/6                        | 193,2                          | 137,5                         | 71,2 | 38,6                          | 20,0 | 17,0                       | 8,8  | 19                            | 23  | 31,62   |
| K7/8                        | 161,7                          | 102,2                         | 63,2 | 37,5                          | 23,2 | 22,0                       | 13,6 | 16                            | 11  | 27,95   |
| K7/10                       | 153,8                          | 76,2                          | 49,5 | 64,5                          | 41,9 | 13,1                       | 8,6  | 14,                           | 13  | 27,68   |
| K7/12                       | 163,2                          | 101,8                         | 62,4 | 42,0                          | 25,7 | 19,4                       | 11,9 | 15                            | 13  | 29,11   |
| K7/13                       | 187,7                          | 96,8                          | 51,6 | 71,1                          | 37,9 | 19,8                       | 10,5 | 18                            | 14  | 32,68   |
| K7/15                       | 181,0                          | 102,1                         | 56,4 | 53,2                          | 29,4 | 25,7                       | 14,2 | 17                            | 13  | 31,14   |
| K7/17                       | 175,9                          | 120,4                         | 68,5 | 45,6                          | 25,9 | 9,9                        | 5,6  | 17                            | 23  | 30,60   |
| K7/20                       | 191,9                          | 117,9                         | 61,5 | 64,6                          | 33,7 | 9,4                        | 4,8  | 18                            | 13  | 32,60   |
| <b>lomový kámen (opuky)</b> |                                |                               |      |                               |      |                            |      |                               |     |         |
| K7/1                        | 139,8                          | 41,7                          | 29,8 | 92,3                          | 66,0 | 5,8                        | 4,2  | 12                            | 200 | 27,04   |
| K7/3                        | 100,5                          | 23,2                          | 23,0 | 72,1                          | 71,8 | 5,2                        | 5,2  | 10                            | 232 | 22,85   |
| K7/5                        | 186,4                          | 60,8                          | 32,6 | 118,0                         | 63,3 | 7,6                        | 4,1  | 16                            | 416 | 33,18   |
| K7/7                        | 145,2                          | 46,2                          | 31,8 | 96,0                          | 66,1 | 3,1                        | 2,1  | 14                            | 145 | 27,56   |
| K7/9                        | 142,7                          | 130,2                         | 91,3 | 8,3                           | 5,8  | 4,2                        | 2,9  | 14                            | 13  | 26,62   |
| K7/11                       | 131,2                          | 57,0                          | 43,4 | 70,8                          | 54,0 | 3,4                        | 2,6  | 12                            | 130 | 25,66   |
| K7/14                       | 153,3                          | 61,9                          | 40,4 | 87,6                          | 57,1 | 3,8                        | 2,5  | 14                            | 255 | 28,97   |
| K7/16                       | 79,9                           | 38,7                          | 48,6 | 38,3                          | 48,1 | 2,7                        | 3,3  | 8                             | 135 | 17,56   |
| K7/18                       | 139,2                          | 130,9                         | 94,0 | 4,0                           | 2,9  | 4,3                        | 3,1  | 14                            | 23  | 26,60   |
| K7/19                       | 119,3                          | 114,0                         | 94,8 | 3,8                           | 3,1  | 2,5                        | 2,1  | 12                            | 23  | 23,92   |
| K7/21                       | 151,5                          | 122,5                         | 80,9 | 25,6                          | 16,8 | 3,5                        | 2,3  | 15                            | 23  | 28,44   |

Tab. 7: Interpretace výsledků stanovení parametrů mezo-, makro- a hrubých pórů v maltách a lomovém kameni – opuce – původního výplňového zdiva zastíženého sondou K7 v poli č. XIV Karlova mostu pomocí vysokotlaké rtuťové porosimetrie. Hodnoty jsou uvedeny jako průměr vypočtený ze dvou měření; dále jsou uvedeny dílčí hodnoty objemu pórů pro kategorii mezo-, makro- a hrubých pórů v absolutních hodnotách a též vyjádřené jako procentuální podíl z celkového objemu. Vysvětlivky zkratk viz text.  $V_{mnh}$  = objem mezo-, makro- a hrubých pórů;  $V_{me}$  = objem mezopórů;  $V_{mm}$  = makropóry;  $V_h$  = objem hrubých pórů;  $S_{mnh}$  = měrný povrch mezo-, makro- a hrubých pórů;  $r$  = střední poloměr pórů,  $Por$  = celková pórovitost zjištěná rtuťovou porosimetrií.

### Fyzikální vlastnosti lomového kamene

Objemová hmotnost lomového kamene ze sondy K7 se pohybuje v úzkém rozmezí 1807–2178 kg/m<sup>3</sup> se střední hodnotou 1930 kg/m<sup>3</sup> (tab. 8). Proměnlivost indexových fyzikálních vlastností lomového kamene ze sondy K7 lze interpretovat jako důsledek kolísajícího mineralogického složení, resp. proměnlivého zastoupení hlavních horninotvorných minerálů (kalcitu, jílových minerálů a různých forem SiO<sub>2</sub>). Opuky s vyšším obsahem kalcitu dosahují vyšších hodnot objemové a měrné hmotnosti, naopak rostoucí zastoupení amorfních forem SiO<sub>2</sub> a jílových minerálů vede k poklesu hodnot objemové hmotnosti a nárůstu celkové pórovitosti. Ta se pohybuje v rozsahu hodnot 16,2–30,5 obj. % (střední hodnota 24,7 obj. %), což plně odpovídá hodnotám pro čerstvě vylomené horniny nenařušené zvětrávacími procesy (viz např. *Příkrýl et al.* 2003). Fyzikální vlastnosti opuk ze sondy K7 jsou, stejně jako u malt, homogenní v rámci celého studovaného vertikálního profilu.

Vysokou kvalitu fyzikálních vlastností studovaných vzorků lomového kamene ze sondy K7 dokazují též podrobná měření pórového prostoru pomocí vysokotlaké rtuťové porosimetrie (viz tab. 7). Při detailním rozboru výsledků se opět projevují rozdíly v kvalitě pórového prostoru jednotlivých zjištěných typů opuk, definovaných během petrografických rozborů.

### Interpretace výsledků s ohledem na způsob výstavby a na případné změny vlastností

Výsledky stanovení fyzikálních vlastností materiálů výplňového zdiva Karlova mostu v sondě K7 dokládají, že zdivo svými indexovými fyzikálními parametry odpovídá stavebním hmotám, které se v moderní stavební terminologii označují jako tzv. lehký beton. Ten má mít objemovou hmotnost v rozmezí 300–2000 kg/m<sup>3</sup>, přičemž nižší hodnoty odpovídají lehkým betonům izolačním, zatímco hodnoty na horní hranici (cca 1400–2000 kg/m<sup>3</sup>) mají lehké betony konstrukční (např. *McNally* 1998, *Paeglitis a Sahmenko* 2006).

Pokud vezmeme v úvahu hodnoty průměrné objemové hmotnosti studované malt (1635 kg/m<sup>3</sup>) a přírodního kamene – opuky (1930 kg/m<sup>3</sup>) a jejich vzájemný poměr 2 : 3 až 1 : 3, vychází objemová hmotnost výplňového zdiva 1812 kg/m<sup>3</sup>, resp. 1856 kg/m<sup>3</sup>. I přes určité kolísání poměru mezi maltou a přírodním kamenem v jednotlivých částech lícního zdiva toto spolehlivě splňuje požadavky kladené na lehký konstrukční beton v moderním stavitelství.

Homogenita fyzikálních vlastností malt i lomového kamene výplňového zdiva v celém objemu kopané sondy svědčí o tom, že oba materiály byly pro svůj účel pečlivě voleny, tak aby plnily zamýšlenou funkci. Tou je zajištění stability celé konstrukce a zároveň její odlehčení. Pokud by stavitelé použili místo opuky svrchnokřídové křemenné pískovce (s objemovou hmotností v průměru cca 2150 kg/m<sup>3</sup>), které tvoří kamenné kvádry lícního zdiva, došlo by k nárůstu objemové hmotnosti výplňového zdiva na 1950–2020 kg/m<sup>3</sup>, tedy minimálně o 10 % proti současnému stavu.

Charakter a homogenita fyzikálních vlastností výplňového zdiva v sondě K7, stejně jako neporušený makro- i mikroskopický vzhled jeho materiálů je dokladem, že v této části Karlova mostu neprobíhají žádné degradační pro-

| označení vzorku | objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] | měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ] | pórovitost [obj. %] |
|-----------------|----------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|
| K7/1            | 1913                                   | 2526                                | 24,26               |
| K7/3            | 2148                                   | 2603                                | 17,50               |
| K7/5            | 1815                                   | 2526                                | 28,16               |
| K7/7            | 1823                                   | 2521                                | 27,71               |
| K7/9            | 1836                                   | 2530                                | 27,43               |
| K7/11           | 1807                                   | 2587                                | 30,15               |
| K7/14           | 1934                                   | 2554                                | 24,26               |
| K7/16           | 2178                                   | 2600                                | 16,22               |
| K7/18           | 1907                                   | 2572                                | 25,86               |
| K7/19           | 1982                                   | 2577                                | 23,07               |
| K7/21           | 1897                                   | 2587                                | 26,68               |

Tab. 8: Základní fyzikální (tzv. indexové) vlastnosti lomového kamene – opuky původního výplňového zdiva zastíženého sondou K7 v poli č. XIV Karlova mostu.

cesy, které by byly měřitelné současnými analytickými metodami. Zdivo lze tedy hodnotit jako neporušené a stabilní. Pokročilý rozpad kvádrů lícního zdiva, pozorovatelný na vnějším líci klenby pole č. XIV (*Příkrýl a kol.*, dosud nezveřejněná data probíhajícího průzkumu lícního zdiva polí č. XIV–XVI Karlova mostu) se tedy odehrává pouze v lícním kvádrovém zdivu a nezasahuje do zdiva výplňového, a to ani do vnitřní druhé klenby.

### VLHKOST A OBSAH VODOROZPUSTNÝCH SOLÍ

Dlouhodobému působení vlhkosti a vodorozpuštěných solí ve stavebních konstrukcích je přisuzován hlavní podíl na postupujícím zhoršování vlastností materiálů (např. *Winkler* 1997, *Kopecká a Nejedlý* 2005). Kolísání vlhkosti vede k cyklickému namáhání materiálů z důvodu zmenšování objemu při vysychání a jeho nabývání při zvlhčování; v nasyceném stavu pak hrozí další namáhání při opakovaném mrznutí a rozmrzání vody v pórovém prostředí v zimním období. Rostoucí obsah solí vede k postupnému přesycení roztoků v pórovém prostoru, následnému růstu krystalů solí, které v konečném důsledku svými krystalizačními tlaky převyšují meze pevnosti (zejména tahové) většiny stavebních materiálů (např. *Goudie a Viles* 1997). Protože Karlův most patří k živým dopravním tepnám, byla jeho vozovka do nedávné doby (cca počátek 60. let 20. století) v zimních měsících solena. Ačkoliv jsou v celé stavební konstrukci použity materiály s vyšším stupněm přirozené pórovitosti, která také zajišťuje dobrou propustnost, nelze vyloučit možnost, že by některé části výplňového zdiva obsahovaly zbytkové zvýšené koncentrace některých vodorozpuštěných solí. Ty by navíc nemusely pocházet pouze ze solení vozovky, ale rovněž by mohly být uvolňovány např. ze zdících malt, zejména z cementových kaší, použitých na zálivku kamenických plomb ve 20. století, případně též z krycí betonové desky pod hydroizolací ze stejného období.

Z výše uvedených důvodů byly všechny odebrané vzorky analyzovány s cílem stanovit obsah vodorozpuštěných solí a vlhkost. Obsah aniontů vodorozpuštěných solí byl stanoven ve vodném výluhu z pevného vzorku hornin a malt metodou iontové výměnné chromatografie (*Haddad a Jack-*

| Vzorek | Vlhkost | (F) <sup>-</sup> | (Cl) <sup>-</sup> | (NO <sub>2</sub> ) <sup>-</sup> | (Br) <sup>-</sup> | (NO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup> | (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> | (SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup> |
|--------|---------|------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| K7/1   | 12,35   | 0,002            | 0,01              | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,009                           | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/2   | 14,87   | p.m.d.           | 0,01              | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,01                            | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/3   | 7,99    | p.m.d.           | 0,01              | 0,002                           | p.m.d.            | 0,002                           | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/4   | 11,95   | p.m.d.           | 0,01              | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,007                           | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/5   | 11,25   | p.m.d.           | 0,1               | 0,006                           | p.m.d.            | 0,02                            | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/6   | 14,28   | 0,002            | 0,02              | 0,002                           | p.m.d.            | p.m.d.                          | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/7   | 12,57   | p.m.d.           | 0,1               | 0,006                           | p.m.d.            | 0,02                            | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/8   | 11,90   | p.m.d.           | 0,02              | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,01                            | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/9   | 11,15   | p.m.d.           | 0,006             | 0,003                           | p.m.d.            | 0,01                            | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/10  | 10,04   | p.m.d.           | 0,009             | 0,002                           | p.m.d.            | 0,02                            | p.m.d.                           | 0,007                            |
| K7/11  | 9,63    | p.m.d.           | 0,1               | 0,004                           | p.m.d.            | 0,1                             | p.m.d.                           | 0,002                            |
| K7/12  | 10,55   | p.m.d.           | 0,03              | 0,003                           | p.m.d.            | 0,1                             | p.m.d.                           | 0,02                             |
| K7/13  | 15,16   | p.m.d.           | 0,007             | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,04                            | p.m.d.                           | 0,005                            |
| K7/14  | 12,53   | p.m.d.           | 0,004             | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,03                            | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/15  | 12,82   | p.m.d.           | 0,009             | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,02                            | p.m.d.                           | 0,008                            |
| K7/16  | 4,60    | p.m.d.           | 0,002             | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,007                           | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/17  | 11,57   | p.m.d.           | 0,1               | 0,007                           | p.m.d.            | 0,04                            | p.m.d.                           | 0,02                             |
| K7/18  | 6,00    | p.m.d.           | 0,01              | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,008                           | p.m.d.                           | p.m.d.                           |
| K7/19  | 6,49    | p.m.d.           | 0,02              | 0,002                           | p.m.d.            | 0,2                             | p.m.d.                           | 0,003                            |
| K7/20  | 13,73   | p.m.d.           | 0,02              | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,2                             | p.m.d.                           | 0,1                              |
| K7/21  | 12,79   | p.m.d.           | 0,01              | p.m.d.                          | p.m.d.            | 0,1                             | p.m.d.                           | p.m.d.                           |

Tab. 9: Vlhkost a obsah aniontů vodorozpustných solí ve vzorcích lomového kamene a malt původního výplňového zdiva zastiženého sondou K7 v poli č. XIV Karlova mostu. Hodnoty jsou uvedeny v hmotnostních procentech, barevná škála odpovídá stupnici v Tab. 11, která uvádí hraniční hodnoty podle klasifikace zasolení a vlhkosti stavebních materiálů. p.m.d. = pod mezí detekce (detekční meze viz tab. 11).

| Stupeň zasolení | (Cl) <sup>-</sup> | (NO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup> | (SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup> | Stupeň zvlhčení | Obsah vody |
|-----------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------|------------|
| Nízký           | < 0,075           | < 0,1                           | < 0,5                            | Nízký           | < 5,0      |
| Zvýšený         | 0,075–0,2         | 0,1–0,25                        | 0,5–2,0                          | Zvýšený         | 5,0–7,5    |
| Vysoký          | 0,2–0,5           | 0,25–0,5                        | 2,0–5,0                          | Vysoký          | 7,5–10,0   |
| Velmi vysoký    | > 0,5             | > 0,5                           | > 5,0                            | Velmi vysoký    | > 10,0     |

Tab. 10: Klasifikace stupně zasolení a zvlhčení stavebních materiálů podle ČSN 730610 a Kopecká a Nejedlý (2005). Hodnoty jsou uvedeny v hm. %.

| (F) <sup>-</sup> | (Cl) <sup>-</sup> | (NO <sub>2</sub> ) <sup>-</sup> | (Br) <sup>-</sup> | (NO <sub>3</sub> ) <sup>-</sup> | (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> | (SO <sub>4</sub> ) <sup>2-</sup> |
|------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0,001            | 0,001             | 0,002                           | 0,002             | 0,002                           | 0,003                            | 0,002                            |

Tab. 11: Detekční meze pro stanovení obsahu vodorozpustných solí metodou iontově výměnné chromatografie. Hodnoty jsou uvedeny v hmotnostních procentech.

son 1990). Stanovení proběhlo na kapalinovém chromatografu (pumpa DS030, iontový detektor CD-5, autosampler Spectra System AS 1000) spolu s vyhodnocením přítomných aniontů pomocí počítačového programu CSW32 ve firmě WATREX Praha, s. r. o. Stanovení vlhkosti bylo provedeno gravimetricky rovněž ve firmě WATREX Praha, s. r. o.

Výsledky stanovení vlhkosti ukazují, že v sondě K7 byla vlhkost v jednom případě nízká (obsah pod 5 hm. %), ve dvou případech zvýšená (rozmezí 5,0–7,5 hm. %) a ve dvou případech vysoká (7,5–10,0 hm. %); vždy se jednalo o vzorky opuk (tab. 9). V ostatních případech (16 vzorků, tedy přibližně  $\frac{3}{4}$  vzorků), kam patřily všechny vzorky malty a část opuk, byla vlhkost velmi vysoká (nad 10,0 hm. %). Vlhkost byla rovnoměrně rozmístěná v celém studovaném profilu, nelze tedy říci, že by se jakýmkoliv směrem zvyšovala nebo snižovala. S ohledem na naměřené hodnoty, které nelze považovat za kritické (ani jeden ze vzorků nebylo možné charakterizovat jako totálně nasycený vodou), je nutno poznamenat, že je zde přímá příčinná souvislost s poklesem

až vymizením funkce hydroizolační vrstvy vložené do konstrukce mostu v 60.–70. letech 20. století. Lze předpokládat, že dokončení nyní probíhající obnovy hydroizolace bude konstrukce postupně vysychat. Tomu ostatně napomáhá i celkově otevřený pórový systém hmot původního výplňového zdiva.

Měření obsahu vodorozpustných solí prokázala, že jejich obsah velmi nízký (tab. 10), ve většině případů dokonce na hranici meze detekce nebo i pod ní (viz hodnoty v tab. 11). V několika málo případech byl zaznamenán obsah vodorozpustných solí mírně zvýšený, vždy se však jednalo o koncentrace natolik nízké, že nemohou představovat zvýšené riziko poškození přítomných materiálů. Tyto výjimečné případy se týkaly jednak zvýšeného obsahu chloridů (rozmezí konc. Cl<sup>-</sup> v mezích 0,1–0,2 hm. %), a dále dusičnanů u pěti vzorků, kde se pohybují na hranici zvýšeného (rozmezí konc. (NO<sub>3</sub>)<sup>-</sup> v mezích 0,1–0,25 hm. %).

Z uvedených rozborů vyplývá, že v původním výplňovém zdivu Karlova mostu, které je v této studii reprezentováno

sondou K7, obsah solí ani vlhkost nedosahují hodnot, které by znamenaly ohrožení jak vlastních materiálů, tak i stability konstrukce výplňového zdiva. Třebaže hodnoty vlhkosti jsou u větší části studovaných vzorků v mezích vysokých hodnot, nedosahují hodnot odpovídajících totálnímu nasycení materiálu vodou. Z tohoto důvodu ani naměřená vlhkost neznamena potenciální hrozbu např. z důvodu promrznutí konstrukce a případného zvětšení objemu ledu v pórovém systému. Naměřené hodnoty a jejich interpretace se tudíž rozcházejí se závěry dřívějších výzkumů (Witzany *et al.* 2002, 2003), které upozorňovaly na údajně nadměrné či dokonce dramatické zasolení a nasycení vodou materiálů výplňového zdiva. Naproti tomu vyšší koncentrace vodorozpusťných solí lze očekávat v některých exponovaných partiích lícniho zdiva, což ostatně prokázaly laboratorní rozbor vzorků z kvádrů kamenného parapetu (Příkryl *a kol.* 2006).

## SHRNUTÍ

Výzkum výplňového zdiva v kopané sondě K7 v poli č. XIV Karlova mostu v Praze přinesl řadu nových, dosud nezjištěných a nepublikovaných poznatků jak z oblasti technologie výstavby, tak i přípravy a složení použitých stavebních hmot. Původní gotické výplňové zdivo má charakter pečlivě provedeného zdiva s použitím kvalitního lomového kamene a pevné maltý s hydraulickým vápenným pojivem. Poměr mezi lomovým kamenem a maltou (v rozsahu 3 : 2 až 3 : 1) naznačuje, že se nejedná o rovnatinu pojenou vápennou maltou, jak tvrdily předchozí průzkumy, ale naopak tvoří analog k litému výplňovému zdivu, jehož přítomnost byla jednoznačně prokázána v pilířích č. 8 a 9 během průzkumných prací v rámci oprav v roce 2005.

Sonda přinesla velmi významný, i když zřejmě nečekaný poznatek o přítomnosti druhé tzv. vnitřní klenby, která přímo dosedá na klenbu vnější. Tato vnitřní klenba, zhotovená z opukových desek, má geometrické parametry shodné s vnější klenbou a zřejmě byla zamýšlena jako stabilizační prvek mostu v případě porušení líce např. zvětrávacími procesy.

Výzkum materiálů výplňového zdiva potvrdil neporušený charakter jak přírodního kamene, tak i vlastní maltý. Přírodní kámen v podobě různých velkých úlomků lomového kamene svým charakterem odpovídá opukám (petrograficky klasifikovaným jako jílovito-kalcitické až kalcitické silicity), pocházejícím ze svrchnokřídových sedimentů české křídové pánve. Místa těžby lze lokalizovat v nejbližším okolí stavby – tedy v oblasti vrchu Petřín až Bílé hory.

Pro přípravu malt výplňového zdiva Karlova mostu byla použita hydraulická vápenná pojiva. Zdrojovou surovinou pro jejich přípravu tvořily prvohorní (devonské) vápence z oblasti Barrandienu v blízkém okolí Prahy, alespoň část suroviny stratigraficky náleží radotínským vápencům. Tato hydraulická vápenná pojiva lze s jistotou označit jako pražské, resp. staroměstské vápno. Hydraulický charakter pojiv byl jednoznačně potvrzen RTG difrakčním rozbohem, přičemž přítomnost hydratovaných vápenatých křemičitanů, hlinitanů a hlinítokřemičitanů dostatečně vysvětluje velmi příznivé fyzikální vlastnosti studovaných malt. Zvýšená hydraulická pojiva byla zajištěna přidávkou jemně nardcenených opuk, pravděpodobně ještě před výpalem vlastního pojiva. Přítomnost organických přísad obsahujících protei-

ny nebyla použitými metodami (FTIR spektrometrie) prokázána. Možnost aplikace organických přísad obsahujících proteiny při přípravě malt výplňového zdiva Karlova mostu lze vyloučit i z technologických důvodů.

Původní výplňové zdivo Karlova mostu představuje unikátní a velmi ojedinělý příklad středověkého pokračování antické (římské) tradice aplikace vysoce kvalitních malt/betonů s hydraulickým vápenným pojivem. Příklad Karlova mostu tak jednoznačně vyvrací v odborné literatuře bohužel velmi rozšířené tvrzení o vymizení znalostí o hydraulických pojivech po pádu římské říše a jejich velmi pozdním znovobjevění až na přelomu 18. a 19. století v souvislosti s experimenty Smeatona, Vicata a Aspdina.

Kvalita a homogenita výplňového zdiva svědčí o tom, že suroviny pro něj nebyly získávány ad hoc, ale naopak pečlivě vybírány a zpracovávány osvědčenými technologiemi, které tvořily dobře tajené znalostní zázemí středověkých stavebních hutí. Je možné, že součástí strategie utajování skutečných postupů bylo vytváření „falešných“, veřejně přístupných receptur (např. tvrzení o organických přísadách), které měly odvést pozornost případných napodobitelů.

Fyzikální vlastnosti výplňového zdiva Karlova mostu (zejména nízká objemová hmotnost) odpovídají moderním tzv. lehkým konstrukčním betonům. Zdivo s těmito parametry tak celkovou stavbu nejen stabilizuje, ale rovněž nevystavuje její vnější konstrukci (lícni kvádrové zdivo) nadbytečnému zatížení.

## Poděkování

Výsledky zde prezentované tvoří doplněk podrobného průzkumu nad klenbou pole XIV prováděného pro firmu Mott MacDonald, Praha s. r. o., která zastupuje odbor městského investora magistrátu hlavního města Prahy ve věci průzkumných prací na Karlově mostě. Richard Příkryl tímto děkuje oběma zmíněným subjektům za souhlas k publikování výsledků, stejně jako za technické a ekonomické zázemí, potřebné k provedení průzkumných prací. Část laboratorních prací byla provedena za finanční asistence výzkumného zámeru geologické sekce přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze (projekt MSM0021620855 Mechanismy transportu látek ve svrchních sférách Země). Studium pórovitosti tvořilo součást výzkumných prací projektu GAČR 205/08/0676. Postdoktorový grantový projekt GAČR 205/09/P138 podpořil mineralogicko-petrografický výzkum hornin a materiálů karbonátového složení. Kolegové Mgr. Františku Vackovi autoři děkují za konzultaci ohledně pravděpodobného zařazení pozorované mikrofosílie v prvohorním vápenci.

## POUŽITÁ LITERATURA

- Adam J. – P., Mathews A. 1994: Roman Building: Materials and Techniques. Routledge, London, 360 s.
- Balbín, B. 1679–1687 1986: Miscellanea Historica Regni Bohemiae. Panorama, Praha, český překlad latinského originálu (1986).
- Bárta R. 1961: Chemie a technologie cementu. Nakladatelství Československé akademie věd, Praha, 1108 s.
- Bouček B. 1951: Geologické vycházky do pražského okolí. Přírodovědecké vydavatelství, Praha, 243 s.
- Brunnerová Z. 2001: Nerostné suroviny. In: Kovanda J. (ed) Neživá příroda Prahy a jejího okolí. Academia, Český geologický ústav, Praha, s. 104–118.
- Cowper A. D. 1927: Lime and lime mortars. Donhead, London, 81 s., facsimile (1998)
- Čech S. – Klein V. – Kríž J. – Valečka J. 1980: Revision of the Upper Creta-

- ceous stratigraphy of the Bohemian Cretaceous Basin. *Věst. ÚÚG* 55(5): 277–296.
- Degryse P. – Elsen J. – Waelkens M. 2002: Study of ancient mortars of Sagalassos (Turkey) in view of their conservation. *Cement and Concrete Research* 34: 1457–1463.
- Derrick M. R. – Stulik D. – Landry J. M. 1999: Infrared Spectroscopy in Conservation Science. The Getty Conservation Institute, Los Angeles, 284 s.
- Drdácký M. – Slížková Z. 2008: Charakteristika malt z konstrukce Karlova mostu v Praze. In: *Oprava historických kamenných konstrukcí – Aplikace zkušenosti z obnovy Karlova mostu*. Odborný seminář STOP, 18. září, 2008, Praha, s. 45–58.
- Drdácký M. – Mašín D. – Mekonone M. D. – Slížková Z. 2008: Compression tests on non-standard historic mortar specimens. In: *Proceedings of the Historical Mortars Conference – Characterization, Diagnosis, Conservation, Repair and Compatibility*. 24–26 September, 2008, Lisbon, LNEC.
- Drozd K. 2007: Technický stav. In: Šefců O. (ed.) *Karlův most*. Ottovo nakladatelství, Praha, s. 260–281.
- Drozd K. – Příkrýl R. 2003: Věrohodnost průzkumných geotechnických metod při hodnocení stavu Karlova mostu. *Geotechnika* 6 (4): 3–8.
- Drozd K. – Příkrýl R. – Votoček R. 2005: Karlův most – doplňující geotechnický průzkum v roce 2004. *Geotechnika* 8 (2): 9–17.
- Frič F. 1879: Studie v oboru křídového útvaru v Čechách. Paleontologické průzkoumání jednotlivých vrstev. II. Bělohorské a Malnické vrstvy. *Archiv pro přírodovědecké prozkoumání Čech*, IV. díl, Praha, 142 s.
- Girsa V. – Holeček J. – Jerie P. – Michoínová D. – Štulc J. 2004: Předprojektová příprava a projektová dokumentace v procesu péče o stavební památky. Národní památkový ústav, ústřední pracoviště, řada odborné a metodické publikace, sv. 27, 108 s.
- Haddad P. R. – Jackson P. E. 1990: Ion Chromatography. Principles and Applications. Elsevier, Amsterdam.
- Ingo G. M. – Fragalá I. – Bultrini G. – Caro T. – Riccucci C. – Chiozzini G. 2004: Thermal and microchemical investigation of Phoenician-Punic mortars used for lining cisterns at Tharros (western Sardinia, Italy). *Thermochimica Acta* 418: 53–60.
- Chandra S. – Ohama Y. 1994: Polymers in concrete. CRC Press, Boca Raton, 204 s.
- Chandra S. – Eklund L. – Villarreal R. R. 1998: Use of cactus in mortars and concrete. *Cement and Concrete Research* 28(1): 41–51.
- Charola A. E. – Henriques M. A. 2000: Hydraulicity in lime mortars revisited. In: Bartos P. – Groot C. – Hughes J. J. (eds) *International RILEM workshop on historic mortars: characteristics and tests*. Paisley, Scotland, 12–14 May, 1999, s. 95–104.
- Goudie A. S. – Viles, H. A. 1997: Salt Weathering Hazards. Wiley, Chichester.
- Konta J. 1973: Kvantitativní systém reziduálních hornin, sedimentů a vulkanoklastických usazenin. *Universita Karlova, Praha*, 375 s.
- Kopecká I. – Nejedlý V. 2005: Průzkum historických materiálů. Grada Publishing, Praha, 101 s.
- Kraus K. 2006: Rheinischer Trass. In: *Denkmalgestein Tuff, ARKUS-Tagung, IFSA-Bericht Nr. 22–2006*, Institut für Steinkonservierung e. V., Mainz, s. 105–117.
- Krejčí J. 1870: Studie v oboru křídového útvaru v Čechách. I. Všeobecné a horopisné poměry, jakož i rozčlenění křídového útvaru v Čechách. *Komité pro výzkum Čech, Praha*, s. 37–161.
- Krch V. – Podráský Z. 2007: Oprava Karlova mostu – etapa 0003, stavebně-technický průzkum a posouzení pole 14. *Nepublikovaná zpráva PUDIS a. s., Praha*.
- Kučková Š. – Hynek R. – Koník P. – Kůdický M. 2009: Vaječné proteiny v maltě Karlova mostu. *Vesmír* 88 (5): 302–303.
- Kužvartová A. – Woller F. 1988: Rediscovery of building and decorative stone of the medieval Prague. In: Müller J. – Žert B. (eds.), *Problems and solutions in protection and restoration of historical and natural objects*. UNIDO Plzeň, Geindustria, Prague, pp. 49–56.
- McNally G. H. 1998: Soil and rock construction materials. E & FN Spon, London, 403 s.
- Murata K. J. – Norman M. B. 1976: An index of crystallinity for quartz. *American Journal of Science* 276: 1120–1130.
- Oleson J. P. – Brandon C. – Cramer S. M. – Cucitore R. – Gotti E. – Hohlfelder R. L. 2004: The ROMACONS Project: a Contribution to the Historical and Engineering Analysis of Hydraulic Concrete in Roman Maritime Structures. *The International Journal of Nautical Archaeology* 33 (2): 199–229.
- Paeglitis A. – Sahmenko G. 2006: Bridges with lightweight aggregate concrete structures. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering* 1(1): 55–61.
- Prokop F. 1951: Soupis lomů ČSR. Číslo 42. Okresy Praha-město a Praha venkov-sever. Technicko-vědecké nakladatelství, Ústřední ústav geologický, Praha, 188 s. + mapa
- Příkrýl R. 2007: Understanding the Earth scientist's role in the pre-restoration research of monuments: an overview. In: Příkrýl R. – Smith B. J. (eds) *Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation*. Geological Society, London, Special Publications, 271, s. 9–21.
- Příkrýl R. – Šťastná A. – Trubač J. 2006: Podrobný průzkum stavu kamenných kvádrů lícního zdiva Karlova mostu s ohledem na jejich dlouhodobou stabilitu. Etapa I. Vyhodnocení stavu kamenného zábradlí a přilehlých částí poprsních zdí. *Nepublikovaná výzkumná zpráva pro firmu Mott MacDonald, Praha*, 43 s. + 9 příl.
- Příkrýl R. – Lokajíček T. – Svobodová J. – Weishauptová Z. 2003: Experimental weathering of marlstone from Přední Kopanina (Czech Republic) – historical building stone of Prague. *Building and Environment* 38 (9–10): 1163–1171.
- Rybařík V. 1983: Stavební a dekorační kameny Národního divadla v Praze. *Geol. průzkum* 25 (10): 278–282.
- Sickels L.-B. 1982: Organics vs. synthetics: their use as additives in mortars. In: *Mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings*. Rome, 3–6 November, 1981, ICCROM, Rome, s. 25–52.
- Šíroklý M. – Bukovinská V. – Svobodová J. – Příkrýl R. 2002: Restaurátorský průzkum pláště kostela sv. Mikuláše na Malé Straně – západní průčelí. *Nepublikovaná výzkumná zpráva, Praha*, 13 s. + 11 příloh.
- Winkler E. 1997: *Stone in Architecture*. 3. rozšířené a přepracované vydání, Springer, Berlin.
- Witzany J. – Mencl V. – Pospíšil P. – Gregerová M. – Hruška A. – Zigler R. – Cikrle P. – Wasserbauer R. 2002: Karlův most – hodnocení stavebně technického stavu. *Stavební obzor* 11 (8): 225–249.
- Witzany J. – Wasserbauer R. – Čejka T. – Zemánek J. 2003: Chemická a biochemická degradace Karlova mostu, analýza odolnosti a bezpečnosti kamenné mostní konstrukce při povodni, průzkum základového zdiva a základů mostních pilířů. *Stavební obzor* 12 (6): 161–180.
- Wright G. R. H. 2005: *Ancient building technology*. Vol. 2. Materials. Brill, Leiden, 316 s.
- Zahálka B. 1926: *Pražská opuka*. Zprávy veřejné služby technické 8 (18): 564–569.
- Zahrádník P. 2007: Opravy a poruchy. In: Šefců O. (ed.) *Karlův most*. Ottovo nakladatelství, Praha, s. 260–281.

## POZNÁMKY

- 1) Doc. Mgr. Richard Příkrýl, Dr., Mgr. Aneta Šťastná, Ph. D. – Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze, Albertov 6, Praha 2; Ing. Miroslava Novotná, CSc. – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze; Ing. Zuzana Weishauptová, DrSc. – Ústav struktury a mechaniky hornin Akademie věd České republiky, v. v. i.

## DIE MATERIALIEN DES URSPRÜNGLICHEN FÜLLMAUERWERKS DER KARLSBRÜCKE UND IHRE ZUSAMMENSETZUNG

Das Materialgefüge und die Bauweise des ursprünglichen Füllmauerwerks der Karlsbrücke in Prag stellten bislang nicht den Zentralpunkt der Forscheraktivitäten dar, a. a. um ihrer allgemeinen Unzugänglichkeit wegen. Die 2007 im Gewölbe des Joches Nr. XIV errichtete Schürfgrube K7 ermöglichte das Studium des ursprünglichen gotischen Füllmauerwerks an Ort und Stelle. Es besitzt den Charakter des sorgfältig ausgeführten Mauerwerks mit Anwendung des Qualitäts-Bruchsteins und des festen Mörtels mit dem hydraulischen Kalkbindemittel. Das Verhältnis zwischen dem Bruchstein und Mörtel (im Intervall 3:2 bis 3:1) andeutet, es handle sich nicht um den mit Kalkmörtel gebundenen Steinsatz, wie die vorigen Forschungen behaupteten, sondern es ist ein Analog zum gegossenen Füllmauerwerk, dessen Vorkommen in den Pfeilern Nr. 8 und 9 bei den Untersuchungsarbeiten im Rahmen der Reparatur im Jahre 2005 bewiesen wurde. Die Sonde brachte eine sehr bedeutende, obwohl offenbar nicht erwartete Erkenntnis der Existenz des zweiten sogen. inneren Gewölbes, das unmittelbar auf das äußere aufgemauert wurde. Dieses innere Gewölbe aus den Plänenplatten hat identische geometrische Parameter wie das Äußere. Das innere Gewölbe trägt zweifellos zur Stabilität der Brücke im Fall der Mauerhauptbeschädigung z. B. infolge der Witterungsprozesse bei.

In der Sonde entnahm man 21 Materialproben (10 vom Mörtel, 11 vom Naturstein). Die Erforschung der Füllmauerwerksmaterialien belegt

den unberührten Charakter sowohl des Natursteins als auch des eigenen Mörtels. Der Naturstein in Gestalt unterschiedlich großer Brocken entspricht mit seinem Charakter den (petrographisch als lehm-kalzitische bis kalzitische Silizite klassifizierten) Plänern aus den oberkreidezeitlichen Sedimenten des böhmischen Kreidebeckens. Die Abbauorte lassen sich in der engsten Umgebung des Baus lokalisieren – also im Bereich zwischen Petřín (Laurenziberg) und dem Weißen Berg. Für die Füllmauerwerk-Mörtelzubereitung beim Karlsbrückenbau bediente man sich der hydraulischen Kalkbindemittel. Den Rohstoff dafür bildeten die Paläozoikum- (Devon-) Kalksteine aus dem Gebiet des Barrandiens in der nahen Umgebung Prags, mindestens ein Teil davon gehört dem Kalkstein aus Radotín an. Diese hydraulischen Kalkbindemittel lassen sich mit Sicherheit als Prager, bzw. Altstädter Kalk bezeichnen. Den hydraulischen Charakter der Bindemittel bewies eindeutig die RTG Diffraktions-Analyse, wobei das Vorhanden der hydratierten Kalziumsilikate, -aluminat und -aluminat-silikate die sehr günstigen physikalischen Eigenschaften der studierten Mörtel erklärt. Die erhöhte Hydraulizität der Bindemittel wurde durch Zusatz von feinem Plänersteinschlag gewährleistet, wohl noch vor seinem Ausbrennprozess. Das Vorkommen der organischen proteinhaltigen Zutaten wurde mittels verwendeter Methoden (FTIR Spektrometrie) nicht bewiesen. Die Möglichkeit der Applikation organischer proteinhaltiger Zutaten bei Mörtelzubereitung für das Füllmauerwerk der Karlsbrücke lässt sich auch aus technologischen Gründen ausschließen. Die physikalischen Eigenschaften des Füllmauerwerkes der Karlsbrücke (besonders die niedrige Dichte) entsprechen den leichten Konstruktionsbetontypen, die jedoch im modernen Bauwesen erst seit dem 20. Jahrhundert in Verwendung sind. Das Mauerwerk mit solchen Parametern stabilisiert nicht nur den ganzen Bau, sondern es setzt nicht seine Außenkonstruktion (seine Werksteinmauerhäute) der übermäßigen Belastung aus.

Das ursprüngliche Füllmauerwerk der Karlsbrücke stellt ein unikales sehr vereinzelt Beispiel der mittelalterlichen Fortsetzung der antiken (römischen) Tradition in der Verwendung der Hochqualitätsmörtel (-betone) mit hydraulischem Kalkbindemittel dar. Das Beispiel der Karlsbrücke widerlegt also eindeutig die in der Fachliteratur sehr verbreitete Behauptung vom Verschwinden der Kenntnis der hydraulischen Bindemittel nach dem Fall des römischen Reichs und ihrer sehr späten Wiederentdeckung erst um die Wende des 18. und 19. Jahrhunderts im Zusammenhang mit den Experimenten von Smeaton, Vicat und Aspdin. Die Qualität und Homogenität des Füllmauerwerkes zeugt davon, dass die Rohstoffe dafür nicht ad hoc erworben, sondern sehr sorgfältig ausgewählt und mit bewährten Methoden verarbeitet wurden, die streng geheim gehaltenen Schatz der Kenntnisse der mittelalterlichen Bauhütten bildeten. Es ist nicht auszuschließen, dass einen Teil der Strategie der Geheimhaltung der tatsächlichen Vorgänge die Bildung der „falschen“, öffentlich zugänglichen Rezepturen war, (z. B. die Behauptung von den organischen Zusätzen), die die Aufmerksamkeit möglicher Fälscher ablenken sollten.

## ABBILDUNGEN

Abb. 1: Lokalisierung der Schürfgrube K7 im Brückenkörper der Karlsbrücke: a – Querschnitt (Blick von Süden), b – Horizontalansicht.  
Abb. 2: Makroskopische fotografische Dokumentation der Schürfgrube K7 (alle Fotos R. Příkrýl): a – Gesamtansicht von oben; b – Detail des inneren Plänergewölbes und des anschließenden ursprünglichen Füllmauerwerkes; c – Mittelteil des horizontal gelegenen ursprünglichen Füllmauerwerkes; d – Übergang zwischen dem ursprünglichen Füllmauerwerk (untere Bildseite) und neuzeitlichen Schichten (deutliche Schichten 1–5 laut Abb. 3).  
Abb. 3: Schürfgrube K7, Schnitt und Materialgefüge (Maßen in mm) laut Betrachtung des Autors (Richard Příkrýl) in ursprünglichen Füllmauerwerksschichten und aufgrund des Berichtes von PUDIS (Krch u. Podráský 2007) im Bereich der neuzeitlichen Schichten. Legende [1–5] = neuzeitliche Schichten aus den 1960-er bis 1970-er Jahren: [1] Betonschutzschicht (Bindemittel Portlandzement) oberhalb der Hydroisolation, [2] Hydroisolation (Bitumpappe mit Rabitzmatte), [3] Unterbeton (Bindemittel Portlandzement), [4] Leichtbeton („Keramzitbeton“, Bindemittel Portlandzement), [5] Stahlbetonplatte (Bindemittel Portlandzement) kreuzversteift mit Stahlrippenstäben vom Durchmesser 16 mm. Legende [6–7] – ursprüngliches (gotisches) Mauerwerk der Karlsbrücke: [6] Füllmauerwerk aus Bruchstein (Pläner – hellgelb), mit hydraulischem Kalkmörtel gebunden, [6a] inneres Gewölbe aus gespaltenen Plänerplatten, mit hydraulischem Kalkmörtel gebunden, Gewölbestärke 45–50 cm, [7] regelmäßiges Werksteinmauerwerk (an der Innenseite unregelmäßige Stärke mit Differenz  $\pm 5$  cm zwischen einzelnen Quadern) aus den karbonischen Arkosen und Oberkreidesandsteinen.

Abb. 4: Der mikroskopische Charakter des Bruchsteins – der Pläner (alle Fotos A. Štastrná): a, b – Pläner mit dem niedrigsten Kalzitgehalt (sogen. Typ II laut Tab. 2), reich an Mikrofossilien (Probe K7/3), c, d – Pläner mit dem niedrigsten Inhalt von Kalzit und dem höchsten Inhalt von verschiedenen Quarzformen ( $\text{SiO}_2$  – sogen. Typ I laut Tab. 2), und mit häufigem klastischem Begleitstoff (Probe K7/1).

Abb. 5: Mikroaufnahme der ursprünglichen Füllmauerwerkermörtel (alle Fotos A. Štastrná): a – großer abgerundeter Brocken rechts unten gehört wohl einem Ziegelscherben an (Probe K7/6); b, c – Bruchstück vom gebrannten Kalkstein, das mit Rücksicht zum vorhandenen Mikrofossil (höchstwahrscheinlich unter die Tentaculite angehört – F. Vacek, pers. com. 2009)

Abb. 6: Beispiel der Auswertung der mittels Messung der festen Probe in der KBr Tablette und der Flüssigkeitsextrakte im Azeton, dem Gemisch von Chloroform mit dem Toluol und im destillierten Wasser erworbenen FTIR Spektren (Probe K7/8).

## TABELLEN

Tab. 1: Liste der dem ursprünglichen Füllmauerwerk entnommenen Proben aus der Schürfgrube K7 im Joch XIV der Karlsbrücke in Prag. Die Ebene der Entnahme ist als Entfernung von der Basis der Gruppe der Betonplatten und der Hydroisolation aus den 1960-er bis 1970-er Jahren angeführt.

Tab. 2: Ergebnisse der Silikatanalyse von 4 Plänerproben (Proben aus der Schürfgrube K7, Joch XIV der Karlsbrücke), die die petrographischen, mittels mikroskopischer Forschung bestimmten Teiltypen repräsentieren. Ausgearbeitet in den Laboratorien der geologischen Institute der Naturhistorischen Fakultät der Karlsuniversität (analysiert von Jilková, Vonásková, Protokoll Nr. 6/CHL/09), Werte in Gewichtsprozent.

Tab. 3: Anorganische Komponente in Mörtelproben aus dem ursprünglichen Füllmauerwerk (Schürfgrube K7, Joch XIV der Karlsbrücke), Ergebnisse der RTG Diffraktionsanalyse. Das Aufkommen der Komponente mit + Zeichen gekennzeichnet. Die festgestellten Stoffe wurden aus praktischen Gründen auf Karbonate, Quarz, Gruppe der hydratierten Kalziumkarbonate, -aluminat und -aluminat-silikate (also die nach dem Ausreifen des hydraulischen Kalkmörtels entstandenen hydraulischen Mineralien), ihre natürlichen Analoge und auf die Korrosions- und Witterungsprodukte verteilt (festgestellt nur in einem Kalkbrocken in der Probe K7/10). Man analysierte sowohl das reine Bindemittel (Probe K7/8), als auch größere Kalksteinbrocken (Größe 1–3 mm). T = sehr harter Brocken, M = sehr weicher, zerfallender Kalksteinbrocken im Mörtel.

Tab. 4: FTIR Spektrometrie, festgestellte anorganische und organische Stoffe in Mörtelproben des ursprünglichen Füllmauerwerkes, Schürfgrube K7, Joch XIV der Karlsbrücke. Angeführte Messungsergebnisse für die KBr Tablette sowie Extrakte.

Tab. 5: Primäre physikalische (sogen. Index-) Eigenschaften der Mörtel vom ursprünglichen Füllmauerwerk, Schürfgrube K7, Joch XIV der Karlsbrücke.

Tab. 6: Statistische Auswertung der physikalischen Eigenschaften der Mörtel vom ursprünglichen Füllmauerwerk in der Schürfgrube K7, Joch XIV der Karlsbrücke (Originaldaten) und der Mörtel aus den antiken Häfen an der Westküste Italiens (bearbeitet nach den Angaben bei Oleson et al. 2004).

Tab. 7: Darstellung der Ergebnisse der Parameterfestsetzung von Mezzo-, Makro- und groben Poren in den Mörteln und dem Bruchstein – Pläner – vom ursprünglichen Füllmauerwerk in der Schürfgrube K7, Joch XIV der Karlsbrücke mit Hilfe der Hochdruck-Quecksilber-Pososimetrie. Die Werte sind als Durchschnittswert von zwei Messungen angeführt; ferner sind Teilwerte des Porenumfangs für die Kategorien der Mezzo-, Makro- und groben Poren in absoluten Werten und auch als Prozentanteil vom totalen Umfang angeführt. Erklärung der Abkürzungen: Vmmh = Umfang der Mezzo-, Makro- und groben Poren; Vme = Umfang der Mezzoporen; Vmm = Umfang der Makroporen; Vh = Umfang der groben Poren; Smmh = spezifische Oberfläche der Mezzo-, Makro- und der groben Poren; r = Mittelwert des Porenradius; Por = gesamte Porosität, mit der Quecksilber-Pososimetrie festgestellt.

Tab. 8: Primäre physikalische (sogen. Index-) Eigenschaften des Bruchsteins – Pläners vom ursprünglichen Füllmauerwerk, Schürfgrube K7, Joch XIV der Karlsbrücke.

Tab. 9: Die Feuchte und der Inhalt der Anionen von wasserlöslichen Salzen in den Bruchstein- und Mörtelproben vom ursprünglichen Füllmauerwerk, Schürfgrube K7, Joch XIV der Karlsbrücke. Werte in Gewichtsprozenten, die Farbenskala entspricht der Skala in der Tab. 11, die die Grenzwerte nach der Klassifikation der Versalzung und Feuchte der Baumaterialien anführt. „p.m.d.“ = unter der Detektionsgrenze (Detektionsgrenzen s. Tab. 11).

Tab. 10: Klassifikation des Versalzungsgrades und des Einfeuchtens der Baumaterialien laut Staatlicher Norm ČSN 730610 und Kopecká-Nejedlý (2005). Werte in Gewichtsprozent.

Tab. 11: Detektionsgrenzen zur Feststellung des Inhalts der wasserlöslichen Salze mit der Methode der Ionenaustauschchromatographie. Werte in Gewichtsprozent.

(Übersetzung J. Noll)