

# VÝZKUM MALT JUDITINA MOSTU

PETR KUNEŠ

Článek stručně shrnuje výsledky laboratorního průzkumu malt Juditina mostu, které byly odebrány v roce 2011 při záchranném archeologickém výzkumu jeho torza na Křížovnickém náměstí v Praze 1. Vzhledem k nedostatku referenčních průzkumů malt ranně středověkých staveb na území Prahy se provedený výzkum soustředil zejména na charakterizaci a dokumentaci odebraných vzorků a na jejich vzájemné srovnání v rámci jednotlivých stavebních částí mostu, tj. jeho litého jádra, zdiva mostovky a zadláždění vozovky. Diskutována je kompozice malt, jejich makroskopická a mikroskopická struktura, mechanické vlastnosti a další základní charakteristiky. Zvláštní pozornost je věnována pojivu malt, které zásadním způsobem ovlivňuje vlastnosti malt a jehož poznání má důležitý stavebně-historický a materiálově-technologický význam. Získané výsledky jsou v základním rozsahu konfrontovány s dříve publikovanými závěry výzkumu malt z jádra Karlova mostu.

## RESEARCH ON MORTARS FROM JUDITH BRIDGE IN PRAGUE

This article briefly summarises the results of laboratory research on mortars samples from Judith Bridge, which were taken from its remains at Křížovnické square, Prague 1 during rescue excavations in 2011. Considering the lack of comparative research on mortars from early medieval buildings in Prague, this research aimed to characterise and document the samples and their mutual comparison within different constructional elements of the bridge, i.e. the rubble masonry core, the bridge deck and the paving. Composition of the mortars is discussed; their macro and microscopic structure; mechanic characteristics and other basic properties. Specific attention is paid to the mortar binder as the most important factor of its quality. The results are compared with the published results of the mortar analysis from the core of Charles Bridge.

**Klíčová slova** — Praha – Juditin most – archeologický výzkum – konstrukce a technologie výstavby – stavební materiály – historické malty – laboratorní analýza

**Key words** — Prague – Judith Bridge – archaeological excavation – building construction and technology – building materials – historic mortars – laboratory analysis

## Úvod

Rozsahem nevelký archeologický výzkum prostoru křížovnického dvorku (PODLISKA/SEMERÁD 2012), jehož základ tvoří románské konstrukce oblouku a nástupu na Juditin most, nabízí mimo jiné také vzácnou příležitost odběru autentických materiálů z odhalených konstrukcí nejstaršího zděného mostu na našem území. Podobně jako v případě výzkumu konstrukce a technologie výstavby Juditina mostu, představuje studium malt důležitou součástí prohlubování znalostí o raně středověkých stavebních dovednostech. Výroba a zpracování malt představovaly z materiálového hlediska nepochybně nejsložitější technologie, které byly pro náročnou mostní stavbu v extrémních podmínkách říčního koryta užity. V oblasti materiálů Juditina mostu byla v minulosti věnována poměrně velká pozornost stavebnímu kameni (ZAVŘEL 2000, VALEČKA 2005), systematictější výzkum malt však dosud proveden nebyl. Bližší charakterizace a laboratorní analýza malt představuje základní východisko pro jejich další možné srovnání s materiály příbuzných staveb. Mimo jiné se tím otevírá jedinečná možnost přímého porovnání malt Juditina mostu s maltami příbuzného, nepochybně však technologicky vyspělejšího, o dvě století mladšího mostu Karlova.

Při záchranném výzkumu v roce 2011 bylo archeology Národního památkového ústavu, územního odborného pracoviště v hlavním městě Praze z tělesa Juditina mostu a souvisejících konstrukcí odebráno celkem 12 vzorků malt. Vzorky lze dle místa odběru rozdělit do následujících čtyř skupin: **1)** malta, do které byla kladena dlažba vozovky (3 vzorky), **2)** malty zdiva prokazatelně samostatného stavebního celku mostovky (4 vzorky), **3)** malty výplňového zdiva jádra mostu (1 vzorek) a **4)** ostatní malty s nejasným vztahem k etapám výstavby jednotlivých částí konstrukce mostu případně pozdějších staveb, zejména objektu generalátu Křížovníků s červenou hvězdou. Tento příspěvek se zabývá pouze maltami s jednoznačným kontextem v rámci archeologicky odhalených konstrukcí, tedy maltami konstrukcí pracovně označených jako jádro, mostovka a vozovka. Tyto části mostu jsou vyznačeny na obr. 1 a 2, které zachycují sondu s typickou náleзовou situací.

**Obr. 1.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Detail diabasové dlažby Juditina mostu v maltovém loži v sondě S01. Označení souvrství: **1** – vozovka, **2** – mostovka (upravil J. Podliska, 2012).



**Obr. 2.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Struktura zdiva mostu v sondě S01, označení souvrství: **2** – mostovka, **3** – jádro mostu (upravil J. Podliska, 2012).



### Metodika výzkumu

Vzorky malt byly nejprve pečlivě ohledány, fotograficky dokumentovány a studovány makroskopicky s použitím binokulárního mikroskopu. Uhlíčitánový podíl malt byl zjištěn gravimetricky rozpuštěním nadrcené části vzorku 10 % kyselinou chlorovodíkovou, nerozpustný zbytek byl promyt, vysušen a podroben síťové analýze na standardizovaných sítích. Kamenivo bylo popsáno makroskopicky a fotograficky dokumentováno. Z vybraných fragmentů studovaných malt byly zhotoveny leštěné výbrusy, které byly ve spolupráci s petrografem RNDr. Zdeňkem Štaffenem studovány polarizačním mikroskopem. Hodnocen byl zejména charakter a kvantita

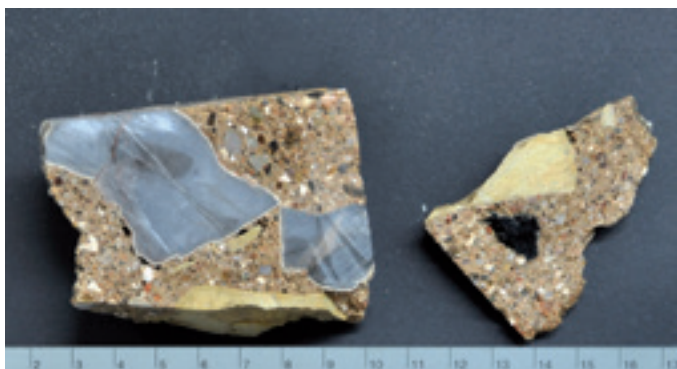


pojiva, zastoupení jednotlivých složek kameniva, stupeň jeho opracování a případné degradace. Optickou mikroskopií byly také vytipovány výbrusy pro detailnější pozorování elektronovým mikroskopem s EDS analýzou prvkového složení, která se soustředila především na pojivo malt. Elektronová mikroskopie proběhla na Ústavu chemické technologie restaurování památek, Vysoké školy chemicko-technologické v Praze (dále jen VŠCHT). Ve vybraných případech byl z malt odebrán vzorek matrice a po jeho roztření na analytickou jemnost v achátové misce byla v Centrálních laboratořích VŠCHT změřena prášková rentgenová difrakční analýza s cílem určit zastoupení krystalických fází pojiva. Pórovitost malt byla stanovena hydrostatickým vážením a u vybraných zástupců malt byl pórový systém charakterizován také pomocí rtuťové porozimetrie na Ústavu anorganické technologie VŠCHT. Důležitý zdroj informací o pojivu malt představují nedopálené či přepálené částice vápence, které vznikly při výrobě vápna, a ze kterých lze proto přímo usuzovat na jeho vlastnosti. Tyto částice byly studovány kromě již uvedené optické a elektronové mikroskopie a difrakční analýzy také termickými metodami na Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR (dále jen UTAM). Kromě empirického porovnání a slovního popisu mechanických vlastností studovaných malt byly vzorky, jejichž velikost měření umožňovala, podrobeny exaktním zkouškám pevnosti. V UTAM byly předané vzorky po prostudování vad a nehomogenit rozřezány na nestandardní testovací tělesa, u kterých byla měřena pevnost v tlaku a s využitím dříve vyvinuté metody protézování (DRDÁČKÝ/SLIŽKOVÁ 2008, DRDÁČKÝ 2011) pevnost v tahu za ohybu v tříbodovém uspořádání. Velikost částic kameniva malt v některých případech plynule přecházela do velmi hrubé frakce tvořené až několika centimetry velkými úlomky hornin. Takové vzorky malt nelze pro přesné určení pevnosti, nasákavosti, pórovitosti a dalších vlastností pokládat za dostatečně homogenní, a provedené materiálové charakterizace proto mohou být poněkud zkresleny.

## Výsledky

Již při empirickém hodnocení malt bylo zřejmé, že barva, obsah jednotlivých složek, jejich mechanické a další vlastnosti poměrně kolísají i mezi zástupci malt odebraných ze stejného stavebního elementu Juditina mostu. Je velmi pravděpodobné, že tyto rozdíly spíše odrážejí technologickou heterogenitu jednoho typu materiálu, nežli by v nich bylo možné sledovat úmysl materiál lokálně modifikovat. Tato skutečnost platí zejména v případě výplňového zdiva a je ji třeba při hodnocení malt brát v úvahu. Uvedená variabilita může do určité míry také znejasňovat přiřazení jednotlivých typů popisovaných malt.

Většina zkoumaných malt vozovky a mostovky je velmi pevných, malty nelze dělit v ruce, matrice tvoří s kamenivem kompaktní celek a obvykle se nedrolí ani při řezání diamantovým kotoučem (viz obr. 3). Je-li menší soudržnost některých vzorků důsledkem lokálního kolísání kvality materiálu nebo výsledkem možných druhotných změn, jako je například degradace nebo možné vnější narušení, pak lze mechanické vlastnosti malt



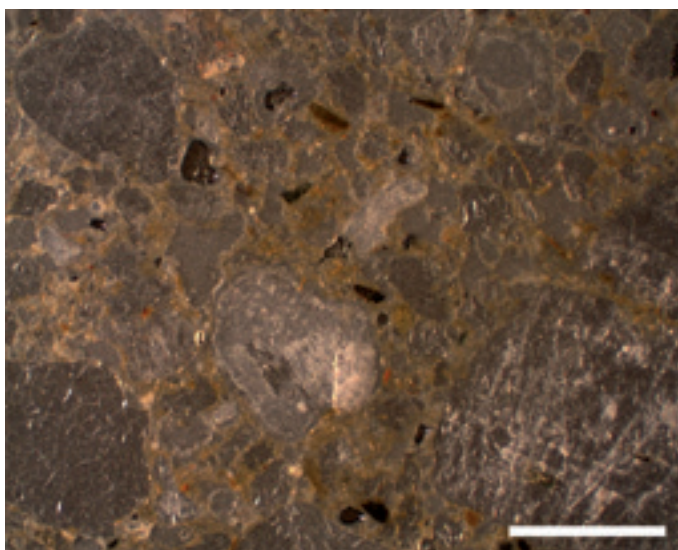
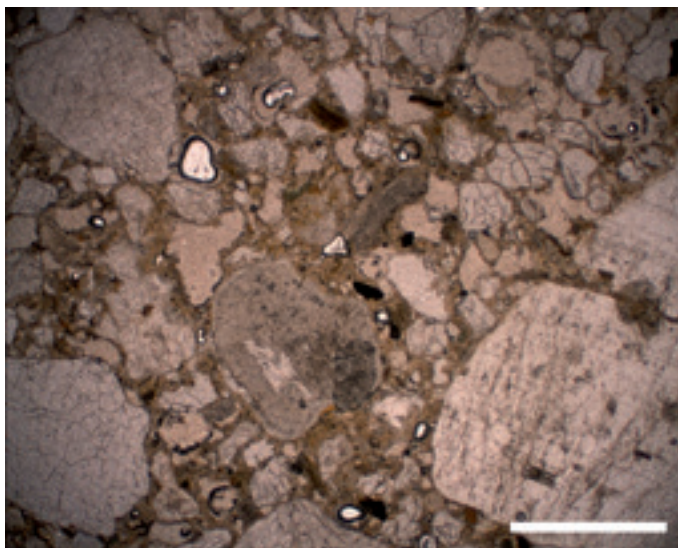
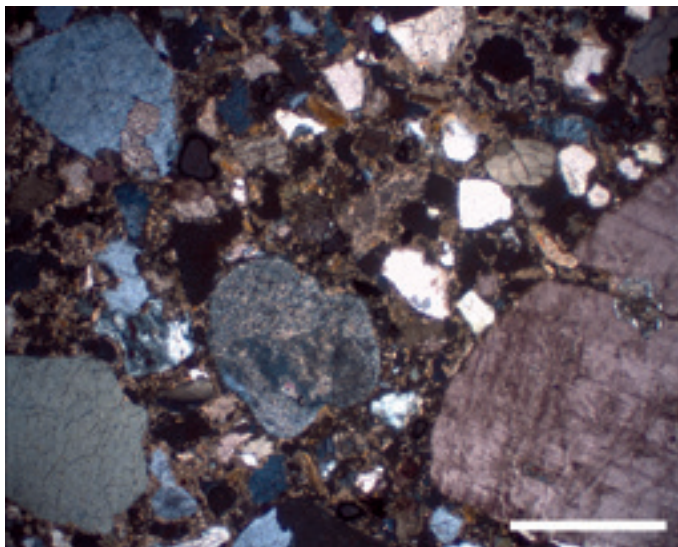
**Obr. 3.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Řez maltou ze zdiva mostovky, malta obsahuje velké úlomky šedých vápenců, světle okrové úlomky opuky, dobře patrný je fragment dřevěného uhlí a poměrně hojně drobné hrudky vápna. Vzorek byl pro zvýšení kontrastu jednotlivých složek jemně navlhčen vodou (foto autor, 2012).



**Obr. 4.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Vzorek malty z vyzdívký jádra mostu, v levé části je patrná oválná částice rezaového pískovce, v pravé části pak dva drobné světlé úlomky opuky a oválná hrudka vápna. Vzorek byl pro zvýšení kontrastu jednotlivých složek jemně navlhčen vodou (foto autor, 2012).

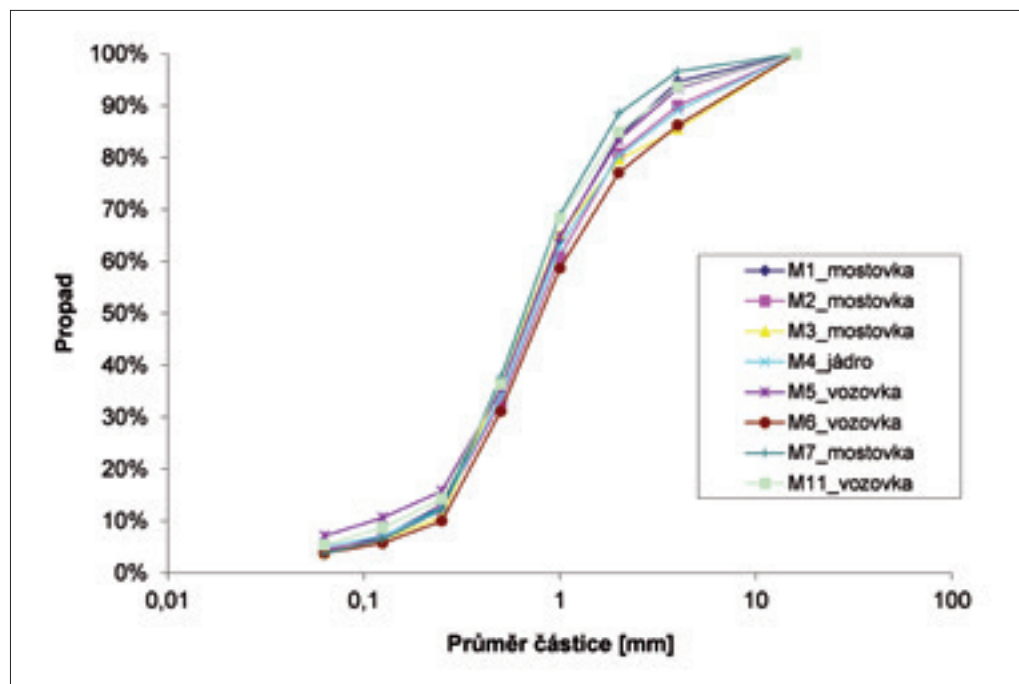
použitých pro vyzdění mostovky a vydláždění vozovky pokládat za velmi dobré. Malty z vozovky jsou v porovnání s maltami mostovky jemnozrnnější a celkově homogennější, úlomky vápence či opuk jsou zde přítomny v maximální velikosti do cca 3 mm. Zastoupení uhličitánů, které je sumou

**Obr. 5, 6 a 7.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Výbrus malty z jádra mostu, procházející polarizované světlo, x nikoly (nahore), || nikoly (uprostřed) a odražené šikmé světlo (dole). Zhruba uprostřed snímku je patrná oválná hrudka vápna. Měřítka odpovídá 500  $\mu\text{m}$  (foto autor, 2012).



uhličitanu přítomného ve vápenném pojivu, v nedopálených zlomcích vápence a v uhličitánovém kamenivu (úlomky nepřepálených vápenců, zčásti i opuk), se v maltách vozovky pohybuje kolem 21 %. Zjištěná pevnost malt vozovky v tlaku kolísá mezi 3 až 5 MPa, pevnost v tahu pak kolem 1,5 MPa, hodnocena byla dvě tělesa (DRDÁČKÝ 2013). Pórovitost přístupná vodě dosahuje u malt vozovky v průměru 30 %, z porovnání výsledků rtuťové porozimetrie pak plyne, že valnou většinu objemu pórů představují póry do průměru 1  $\mu\text{m}$ . Malty mostovky reprezentují podobný typ jako malty vozovky, jsou však výrazně heterogenní jak svojí stavbou tak také v rámci studovaného souboru svými vlastnostmi. Tyto malty obsahují velmi četné úlomky přepálených či nedopálených vápenců a opuk, jejichž velikost dosahuje až prvních jednotek centimetrů. Zjištěný obsah uhličitanu se zde pohybuje od 19 do 40 %. Podobně kolísá také pevnost malt mostovky od relativně málo soudržných zástupců, které lze s námahou lámat v ruce až po velmi kompaktní, téměř lešitelné vzorky s velmi vysokou pevností. Stanovená pevnost malty v tlaku dosáhla 2,7 až 6,2 MPa, pevnost v tahu kolísala mezi 0,5 až 1,2 MPa, testována byla celkem čtyřtělíska (DRDÁČKÝ 2013). Pórovitost přístupná vodě kolísá mezi 30 a 40 %. Z porovnání výsledků rtuťové porozimetrie plyne, že přes obdobnou celkovou pórovitost malt mostovky a vozovky, obsahuje matrice malt mostovky menší podíl pórů pod 1  $\mu\text{m}$ ,





**Obr. 8.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Granulometrie kameniva zkoumaných malt, frakce v rozsahu velikostí částic 0–16 mm (zpracoval autor, 2012).

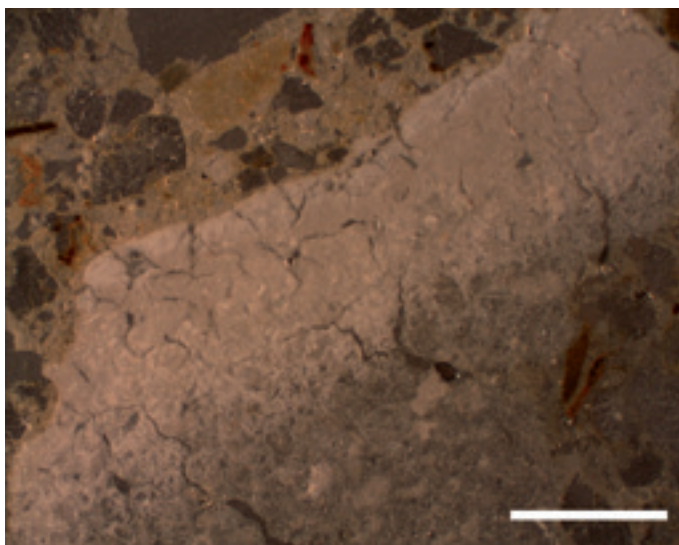
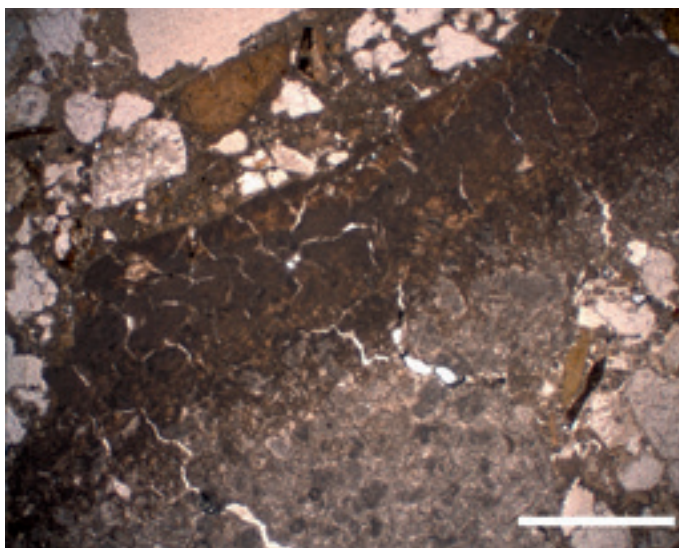
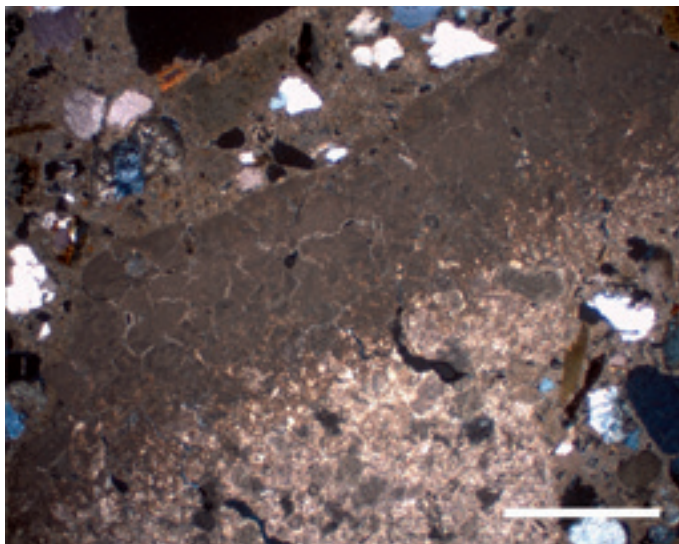
což se projevuje také výrazně menším vnitřním povrchem. Tento rozdíl pravděpodobně souvisí s rozdílným poměrem pojiva a kameniva v těchto maltách, ale také zřejmě odráží odlišný charakter pojiva, jak bude rozebráno dále.

Mechanickými vlastnostmi, barvou i obsahem pojiva se od malt mostovky odlišuje malta z jádra mostu (obr. 4). Malta výplňového zdiva jádra mostu byla v provedeném průřezu zastoupena pouze jediným vzorkem, což poněkud limituje možnost objektivně posoudit dílčí vlastnosti i celkovou kvalitu této malty. Malta jádra je ve srovnání s maltami vozovky a mostovky výrazně chudší na vápenné pojivo, neobsahuje v takové míře ani stopy po nedopalcích z pálení vápna a celkově vykazuje menší soudržnost. Ve srovnání s maltou mostovky je však, alespoň v rámci zkoumaného vzorku, poměrně homogenní. Obsah uhlíkatu v této maltě byl stanoven na pouhých 11 %, nízký obsah pojiva koresponduje s menší pevností malty i jejím tmavším okrovým tónem. Pevnost malty jádra v tahu testovaná na dvou připravených tělesech je 0,7 MPa, pevnost v tlaku nebylo vzhledem k omezené velikosti vzorku možné stanovit (DRDÁČEK 2013). Hydrostaticky stanovená pórovitost malty je 31 %, póry s průměrem pod 1 µm představují zhruba polovinu této hodnoty. Obrázky 5, 6 a 7 zachycují výbrus malty jádra při optické mikroskopii.

Ze síťové analýzy kameniva studovaných malt (obr. 8) je zřejmé, že jeho základem je ve všech případech shodný říční písek. Písek je charakteristický vysokým obsahem živců, zejména plagioklasů, v jednotlivých maltách obsah živců dle hodnocení z výbrusu mírně kolísá. Křemen se vyskytuje v podobě monokrystalických, méně často polykrystalických zrn obvykle subagulárního až oválného tvaru. Dále jsou přítomna zrna prachovců často s hematitickým nebo limonitickým lemem, v malém množství také degradované lístky muskovitu. Nejmenější frakce nerozpustného zbytku s velikostí částic pod 0,063 mm, kterou tvoří především prachové částice křemene, jílových a dalších minerálů, má světle béžovou až světle okrovou barvu a ve všech maltách je zastoupena v poměrně hojné míře okolo 5 % hmotnosti kameniva. Kamenivo v oblasti částic zhruba do 10 mm odpovídá říčnímu písku, který byl pravděpodobně těžen z blízkého zdroje. Potvrzení této hypotézy si v další etapě výzkumu vyžádá srovnání skladeb písků z předpokládaných lokalit. Z technologického hlediska lze však zjištěnou distribuci písku, jako jeden z důležitých předpokladů kompozice kvalitní malty a také jako zásadní faktor minimalizace spotřeby pojiva, hodnotit jako velmi výhodnou.

Kromě výše uvedených součástí tvoří kamenivo malt dále úlomky opuk, spíše výjimečně lze nalézt drobné úlomky pískovce. Ke kamenivu je třeba počítat také částice nedopálených úlomků vápence, které, jak již bylo uvedeno, byly nalezeny v hojné míře zejména v maltě mostovky. V několika případech bylo možné na výbrusu těchto malt sledovat, jak úlomek nedokonale vypáleného vápence difusně přechází v mikritickou hmotu matrice malty (viz obr. 9, 10 a 11).

**Obr. 9, 10 a 11.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Výbrus malty ze zdiva mostovky, procházející polarizované světlo,  $\times$  nikoly (**nahoře**),  $\parallel$  nikoly (**uprostřed**) a odražené šikmé světlo (**dole**). Úlomek přepáleného vápence s rozpraskaným lemem přeměněným v mikrit. Měřítka odpovídá 500  $\mu$ m (foto autor, 2012).

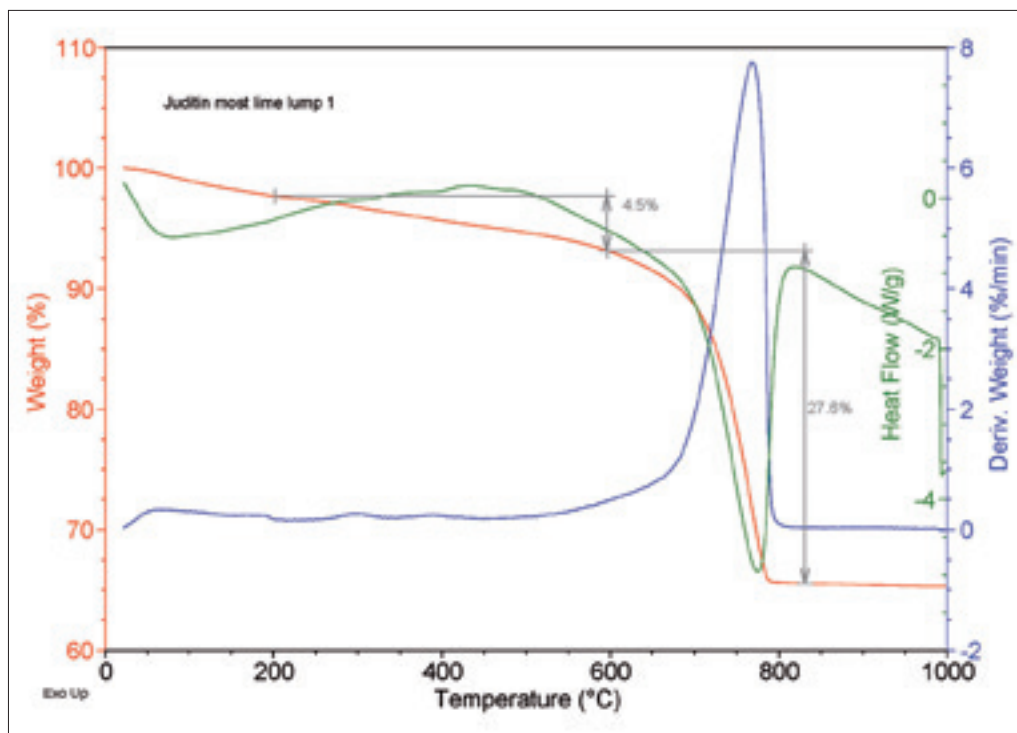


V maltě mostovky byly nalezeny spíše náhodné fragmenty dřevěného uhlí (viz např. velký úlomek zachycený na řezu malty na obr. 4), jiné technogenní materiály jako drcená cihla nebo keramika v maltách zachyceny nebyly. Nejhrubší frakce kameniva v případě výplňového zdiva jádra mostu i v případě zdiva mostovky tvoří úlomky hornin velikosti od několika centimetrů až po jednotlivé lomové kameny. V případě velikostí ještě zachycených v rámci odebraných vzorků malt se jedná se především o ostrohranné úlomky šedých až šedomodrých prvohorních vápenců, drobnější úlomky druhohorních, pravděpodobně bělohorských opuk a vzácněji rezavě zbarvených železitých pískovců.

Z hlediska poznání historických technologií i z hlediska funkčního představuje nejdůležitější složku historických malt jejich pojivo. Již uvedený fakt, že malty vozovky a mostovky dosahují při současném zjištění poměrně nízkého obsahu uhličitanu až výborných mechanických vlastností, nasvědčuje použití velmi kvalitního vápenného pojiva s hydraulickými vlastnostmi. Přímé analytické potvrzení přítomnosti hydraulických fází v pojivu malty a tedy důkaz hydraulických vlastností historických malt je obvykle nesnadné. To souvisí zejména s převážně amorní strukturou hydratovaných křemičitanů vápenatých, tzv. CSH fází, hlavní složkou odpovědnou za dosaženou pevnost a také odolnost malt vodě. Tyto omezeně krystalické fáze lze rentgenovou

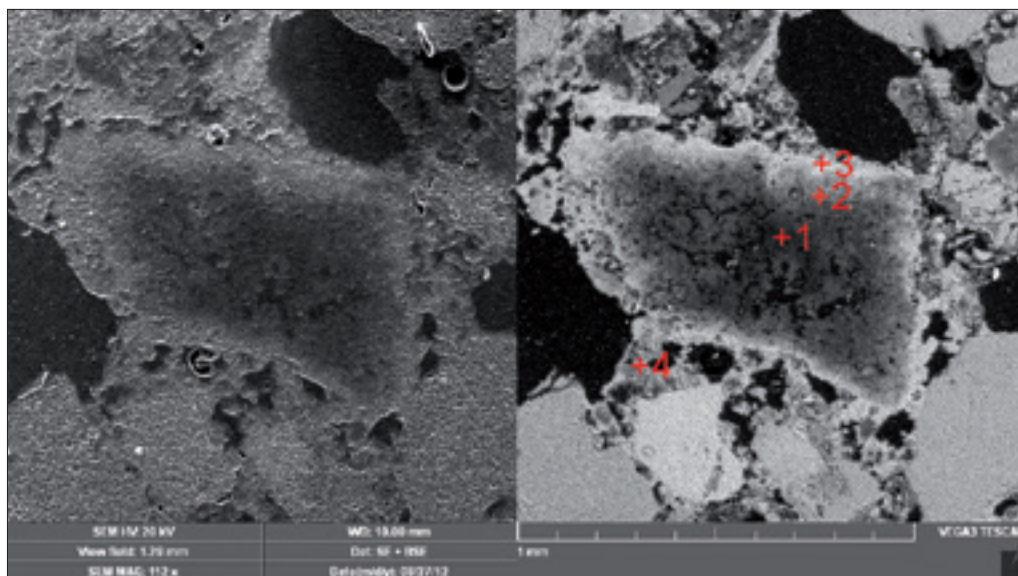
difrakční analýzou ve směsi identifikovat jen velmi obtížně a na jejich existenci se tak obvykle usuzuje nepřímě. Ani v daném případě nebyly rentgenovou difrakční analýzou vzorků matrice ani vzorků hrudek vápna ze zkoumaných malt CSH fáze ani jiné hydraulické fáze prokázány. Opakovaná bodová prvková analýza úlomků přepálených vápenců provedená na výbrusech malt však ukazuje





**Obr. 12.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Výsledky termické analýzy hrudky vápna odebrané z malty mostovky, poměr  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  6,1 a obsah  $\text{CaCO}_3$  63 % odpovídá hydraulickému vápnu (měření a vyhodnocení D. Frankeová, 2012).

poměrně vysoký obsah křemíku. Z naměřených obsahů rozhodných prvků (Ca, Mg, Si, Al a Fe) byl vypočten průměrný teoretický hydraulický modul vápna. Ten vystihuje míru hydraulicity vápna na škále od vápen v podstatě vzdušných ( $\text{HM} > 10$ ) až po vápna silně hydraulická ( $\text{HM} = 1,7\text{--}3$ ) (ROVNANÍKOVÁ 2002, ŠKVÁRA 2003). Zjištěný nízký hydraulický modul v rozmezí 2–8 dokládá, že pálením použitého vápence bylo možné dosáhnout i značně hydraulických vápen. Uvedená měření byla na UTAM doplněna o termogravimetrickou analýzu tří větších hrudek vápna, které bylo možné separovat z malty mostovky. Jejich složení bylo hodnoceno na základě poměru

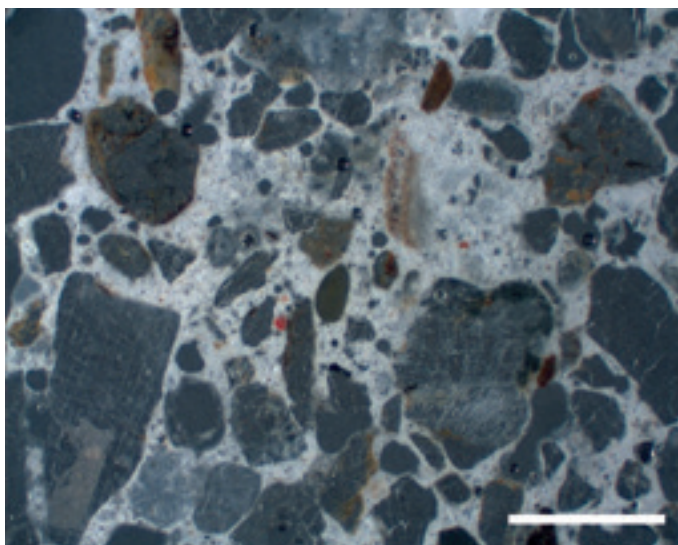
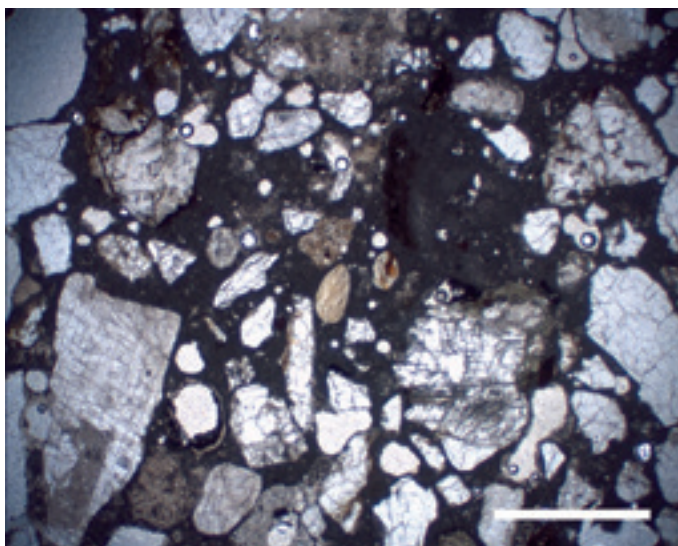
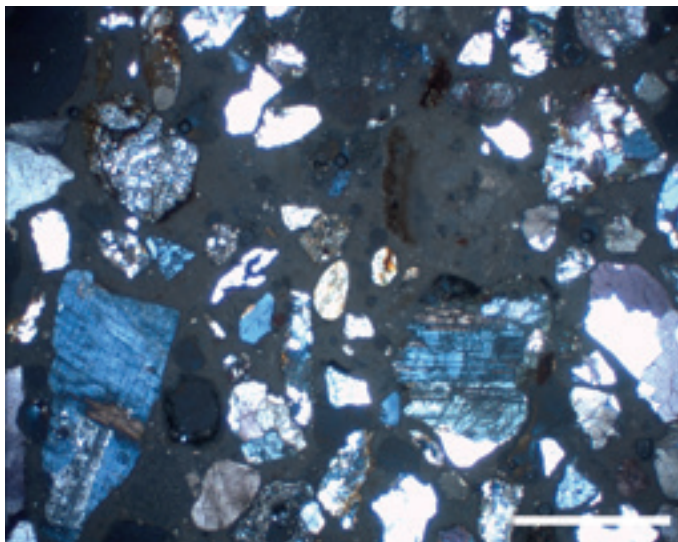


**Obr. 13.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Výbrus malty ze zdiva mostovky, sekundární (vlevo) a zpětně odražené elektrony s vyznačením míst bodové prvkové analýzy (vpravo), uprostřed snímku částice opuky. V místech kontaktu opuky s vápnem je dobře patrný reakční lem obohacený o vápník. Výsledky prvkové analýzy uvádí tabulka 1 (mikrosko-povala A. Michalcová, 2012).

místo	Mg [mol %]	Al [mol %]	Si [mol %]	S [mol %]	K [mol %]	Ca [mol %]	Fe [mol %]
1	2,7	8,4	52,8	0,9	2,1	32,8	0,4
2	1,5	1,5	7,3	0,4	0,4	88,8	0,2
3	1,4	3,0	11,7	0,1	0,5	82,9	0,5
4	0,4	1,1	3,7	0,1	0,1	94,5	0,2

**Tab. 1.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Výsledky bodové prvkové analýzy provedené na výbrusu malty ze zdiva mostovky (viz obr. 13, zpracoval autor, 2012).

**Obr. 14, 15 a 16.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Výbrus malty z vozovky, procházející polarizované světlo,  $\times$  nikoly (**nahore**) a  $\parallel$  nikoly (**uprostřed**), odražené šikmé světlo (**dole**). Snímky dokumentují odlišný charakter matrice malty vozovky s hojným výskytem bílé izotropní látky. Měřítka odpovídá 500  $\mu\text{m}$  (foto autor, 2012).

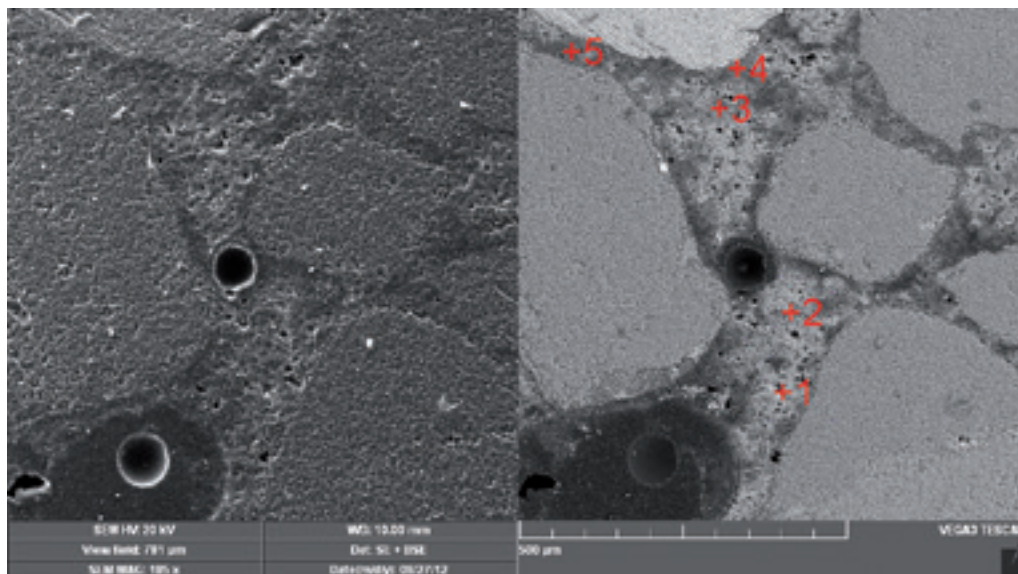


ve vápně chemicky vázané vody a oxidu uhličitého podle dříve publikované metodiky (MOROPOULOU 1995, 2004). I tímto postupem byla zjištěna variabilita vápna, které v jednom případě korespondovalo s vápnem vzdušným, ve druhém pak s vápnem hydraulickým a ve třetím případě se jednalo o vápno s nejvyšší hydraulicitou, které svojí kompozicí hraničně odpovídá vápnu hydraulickému a vápnu s pucolánovou přísadou. Termogravimetrickou křivku této hrudky vápna s vyhodnocením ukazuje obrázek 12. Také tato měření tedy potvrzují, že pálení vápenců použitých pro vápno zkoumaných malt mohlo při vhodných podmínkách vést k hydraulickému vápnu. Další vzrůst hydraulických vlastností v relativně dlouhém časovém horizontu po dokončení stavby je pak možné vztahovat k postupné reakci hydroxidu vápenatého s amorfním křemenem obsaženým v doložených úlomcích opuk. Obrázek 13 zachycuje úlomek opuky s reakčním lemem, který, jak dokládá zastoupení vápníku a křemíku v povrchové vrstvě (tab. 1), vznikl interakcí opuky s hydroxidem vápenatým. Nadrcená přepálená opuka byla dříve identifikována v maltě výplňového zdiva Karlova mostu, kde je dáována do souvislosti se záměrným zvyšováním hydraulicity vyráběného vápna (PŘIKRYL 2009, PŘIKRYL/ŠTASTNÁ 2010).

Pozorování matrice malt na leštěných výbrusech v polarizovaném světle ukázalo výrazně odlišný charakter pojiva malt vozovky. Vápen-

ný tmel, který je zde podobně jako u ostatních malt primárně tvořen mikritem, je místy prostoupen, na jiných místech zcela nahrazen amorfni bělavou izotropní látkou (viz obr. 14, 15 a 16). Prvkovou analýzou provedenou v rámci elektronové mikroskopie bylo zjištěno, že tento materiál obsahuje zejména vápník a křemík (viz obr. 17 a tab. 2). Rostoucí koncentrace křemíku přibližně





**Obr. 17.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Výbrus malty z vozovky, SEM. Bodová prvková analýza změněné matrice malty. Výsledky měření uvádí tabulka 2 (mikroskopovala A. Michalcová, 2012).

místo	Mg [mol %]	Al [mol %]	Si [mol %]	S [mol %]	K [mol %]	Ca [mol %]	Fe [mol %]
1	1,3	9,0	55,6	0,5	0,3	32,8	0,5
2	2,9	10,3	51,8	0,3	0,2	34,1	0,4
3	4,1	8,5	52,9	0,8	0,3	33,1	0,4
4	2,6	11,4	56,8	0,7	1,6	26,4	0,4
5	8,2	9,7	51,9	0,7	0,5	28,5	0,5

**Tab. 2.** Praha 1-Staré Město, Křížovnické náměstí ppč. 72. Výsledky bodové prvkové analýzy provedené na výbrusu malty z vozovky (viz obr. 17, zpracoval autor, 2012).

sleduje intenzitu zastoupení odlišného pojiva a jeho zastoupení vůči vápníku dosahuje poměru až cca 2 : 1. Vzhledem k tomu, že matrice s odlišným optickým charakterem a složením byla pozorována v různém rozsahu ve všech vzorcích zkoumaných malt vozovky, lze vyloučit lokální výskyt či nahodilost tohoto jevu. Způsob, jakým izotropní látka proniká mikritovým tmelem a místy vyplňuje mikropraskliny v matrici, nasvědčuje dlouhodobému sekundárnímu procesu. Pozorované změny matrice tak nejspíše souvisí se specifickou polohou ložné malty dlažby a nikoli s použitím odlišného pojiva nebo postupu přípravy této malty. Sekundární změny matrice pravděpodobně souvisí s expozicí malt vozovky povětrnosti, zejména srážkám. Nejjednodušší vysvětlení, které lze na základě současných poznatků podat, předpokládá postupnou precipitaci gelu kyseliny křemičité nebo gelu CSH v pórovém systému matrice malty. Zdrojem  $\text{SiO}_2$  zde mohly být mimo jiné reaktivní křemičité složky malty z přítomných úlomků opuk.

## Diskuse

Oblast výzkumu historických malt je překvapivě široká a zasloužené pozornosti se jí dostává až v posledních desetiletích. Byť představuje výroba vápna z přírodního vápence společně s pálením keramiky a hutní výrobou nejstarší kontinuálně rozvíjené materiálové technologie vůbec, jsou současné znalosti historického vápenictví značně omezené. Snad největší nedostatek pramenů z téměř neexistujících praktických ověření dopadu konkrétních podmínek pálení, vlivu lokálních surovin a případných přísad hydraulicky aktivních hornin na výsledné vlastnosti vápna páleného tradičním postupem. Vlastnosti historických vápen jsou tak obvykle odvozovány pouze z teoretických předpokladů, archivních pramenů a samozřejmě z analýz dochovaných historických malt. Pro kritické posouzení zatím pouze teoreticky předpokládaných postupů přípravy středověkých malt nejen Juditina či Karlova mostu jsou přitom tyto praktické experimenty nezbytné. Určitým přelomem by tak mohl být aktuálně probíhající prakticky zaměřený výzkum „Tradiční vápenné technologie historických staveb a jejich využití v současnosti“, který se této problematice úzce věnuje a jehož jádrem je experimentální pálení vápna (VÁLEK 2012).

Tabulky 3 a 4 přehledně shrnují zjištěné charakteristiky malt Juditina mostu a porovnávají je s dostupnými daty o maltách příbuzných mostních staveb. Pokud je možné soudit z publikovaných výsledků analýz intaktních malt Karlova mostu z nedávné doby, materiálový průzkum malt

	Nasákavost za atm. tlaku [hm. %]	Pórovitost přístupná vodě [obj. %]	Pórovitost [obj. %] (Hg porozimetrie)	Pórovitost do průměru póru 1 µm [obj. %] (Hg porozimetrie)	Vnitřní povrch do průměru póru 1 µm (Hg porozimetrie)	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]
jádro*	14,8	30,5	27,6	14,6	7,6	–	0,68
mostovka	18,8 ± 3	34,3 ± 5	31,1 ± 5,1	20,0 ± 0,7	12,2 ± 4	2,7–6,2	0,5–1,2
vozovka	17,1 ± 1	30,4 ± 1	30,7 ± 1,8	27,6 ± 1,4	24,7 ± 1	3–5,2	1,4–1,5
malty jádra Karlova mostu (PŘIKRYL 2009, PŘIKRYL/ŠTÁTNÁ 2010)	–	32–39	30,1	–	–	7,5–10,3	–
malty jádra Karlova mostu (FRANKEOVÁ/SLÍŽKOVÁ/DRDÁČKÝ 2010)	–	38–40	–	–	–	2,8–8,9	1,4–2,4
malty spár mostu v Roudnici nad Labem, 14. st. (FRANKEOVÁ/SLÍŽKOVÁ/DRDÁČKÝ 2010)	–	29–39	–	–	–	3,7–5,4	2,4–3,2

\* jediný vzorek

**Tab. 3.** Přehled materiálových charakteristik zkoumaných malt (zpracoval autor, 2012).

**Tab. 4.** Přehled chemických a mineralogických charakteristik zkoumaných malt (zpracoval autor, 2012).

Juditina mostu ukazuje podobnou skladbu i charakter výplňových malt obou mostních staveb. Jak však ukázaly provedené mechanické zkoušky, kvalita zkoumaných malt nedosahuje kvalit malt z Karlova mostu. Započatý výzkum malt Juditina mostu bude dále pokračovat bližší klasifikací jednotlivých hornin hrubého kameniva malt, identifikací zdroje použitého písku a další charakterizací pojiva malt. Logickým krokem by mělo být také přímé porovnání existujících souborů vzorků malt obou pražských mostů.

	Obsah uhlíkatu [hm. %]	Chemicky vázaná H <sub>2</sub> O v pojivu [hm. %]	Vázaný CO <sub>2</sub> v pojivu [hm. %]	Poměr CO <sub>2</sub> / H <sub>2</sub> O	Identifikované fáze v matici malty (XRD)
jádro*	11	–	–	–	kalцит křemen, albit, ortoklas, muskovit
mostovka	26,1 ± 7	2,7–4,5	13–28	3,2–13	kalцит křemen, albit, mikroklin, muskovit, anortit (koninkit, kordierit), ve hrdce vápna stopy kyanitu
vozovka	20,5 ± 2	–	–	–	kalцит křemen anortit, muskovit, kordierit
malty jádra Karlova mostu (FRANKEOVÁ/SLÍŽKOVÁ/DRDÁČKÝ 2010)	25–30	5,9–10	7,8–9,2	0,9–1,4	–
malty spár mostu v Roudnici nad Labem, 14. st. (FRANKEOVÁ/SLÍŽKOVÁ/DRDÁČKÝ 2010)	23–56	4,1–4,6	12,3–23,2	3–5	–

\* jediný vzorek

## LITERATURA

- DRDÁČKÝ 2011 — Miloš DRDÁČKÝ: Non-Standard Testing of Mechanical Characteristics of Historic Mortars, International Journal of Architectural Heritage 5, 2011, 383–394.
- DRDÁČKÝ 2013 — Miloš DRDÁČKÝ: Mechanické zkoušky vzorků malt z Juditina mostu v Praze. Výzkumná zpráva, 2013, nepublikováno.
- DRDÁČKÝ/SLÍŽKOVÁ 2008 — Miloš DRDÁČKÝ / Zuzana SLÍŽKOVÁ: Mechanical characteristics of historical mortars from tests on small-sample non-standard specimens. Material science and applied chemistry 17, 2008, 20–29.
- MOROPOULOU 1995 — Antonia MOROPOULOU ET AL.: Characterization of the lumps in the mortars of historic masonry. Thermochimica Acta 269–270, 1995, 809–816.
- MOROPOULOU 2004 — Antonia MOROPOULOU ET AL.: Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis. Thermochimica Acta 420, 2004, 135–140.



- PODLISKA/SEMERÁD 2012 — Jaroslav PODLIŠKA / Matouš SEMERÁD: Nálezová zpráva, záchranný archeologický výzkum NPÚ ÚOP v hl. m. Praze, 2011/28, Praha 1-Staré Město, Křižovnické náměstí ppč. 72 (Juditin most). Uloženo: archiv nálezových zpráv NPÚ ÚOP v hl. m. Praze čj. 311/85318/2012.
- PŘIKRYL 2009 — Richard PŘIKRYL ET AL.: Materiály původního výplňového zdiva Karlova mostu a jejich skladba. Průzkumy památek 16, 2009/1, 1212–1487.
- PŘIKRYL/ŠŤASTNÁ 2010 — Richard PŘIKRYL / Aneta ŠŤASTNÁ: Contribution of clayey-calcareous silicite to the mechanical properties of structural mortared rubble masonry of the medieval Charles Bridge in Prague (Czech Republic). Engineering Geology 115, 2010, 257–267.
- ROVNANÍKOVÁ 2002 — Pavla ROVNANÍKOVÁ: Omítky. Chemické a technologické vlastnosti. STOP: Praha, 2002.
- ŠKVÁRA 2003 — František ŠKVÁRA: Chemie a technologie anorganických pojiv I. Cement a hydraulická pojiva. Ústav skla a keramiky VŠCHT Praha, 2003.
- VALEČKA 2005 — Jaroslav VALEČKA: Juditin most v Praze a „petřínské“ železité pískovce. Zprávy o geologických výzkumech v roce 2005, 2005, 170–173.
- VÁLEK 2012 — Jan VÁLEK: Představení projektu Tradiční vápenné technologie historických staveb a jejich využití v současnosti. Kolokvium Tradiční vápenné technologie, 13. 9. 2012, NTM Praha. Nepublikováno. Projekt č. DF11P01OVV010 v rámci programu NAKI MK.
- ZAVŘEL 2000 — Jan ZAVŘEL: Petrografie stavebních kamenů Juditina mostu. Kámen 6/2, 2000, 53–66.

## SUMMARY

The study concerns with laboratory research on mortars sampled from Judith Bridge during the rescue excavation in the area of Křižovnické square in 2011 (PODLISKA/SEMERÁD 2012). The samples were taken from the rubble masonry of the bridge core, from the masonry of separate construction of the bridge deck and from bridge paving. The samples were studied macroscopically and on prepared thin sections under polarised light using a binocular microscope. Selected samples were analysed under electron microscope as well. The carbonate percentage in the mortar was determined gravimetrically by dissolving part of the sample in a diluted hydrochloric acid, the insoluble residue was washed, dried and analysed by sieving. The analysis of the binder was provided by X-ray diffraction and thermal analysis of the particles of semi-fired limestone fragments. Mechanical characteristics were evaluated by measuring the compressive and bending strength on prepared non-standard specimens. Most of the analysed mortars from the paving and the deck are very firm; their matrix did not crumble even when being cut by a diamond disc, the matrix forms a compact material with the aggregate. Mortars from the paving compared to the deck mortars are more fine-grained and generally more homogeneous, fragments of semifired limestone or clayey-calcareous silicite (opuka) are present up to a maximum of ca 3 mm. Carbonate proportion in them is usually around 21 %. Mortars of the deck represent a similar type as paving mortars, but they are significantly heterogenic in their composition as well as in their characteristics within the studied set. These mortars contain abundance of fired or semifired spalls of limestone or opuka with a size of up to several centimetres. Carbonate content varies from 19 to 40 %; and the mortar cohesion fluctuates significantly too. Porosity accessible by water reaches in paving mortars 30 % in average, in the deck mortar it ranges between 30 and 40 %. The mortar of the core is poor of lime binder, fragments of semi-fired limestone are not contained and the cohesion of core mortar is generally lower comparing to the others. The carbonate content was only 11 %; the low value corresponds with lower cohesion and darker tone of this mortar. The aggregate of all analysed samples is based on identical river sand which is characteristic with a high content of feldspar, mainly plagioclases. Quartz occurs in mono crystalline, less often poly crystalline grains usually of subangular or oval shape. Also grains of siltstone often with hematite or limonite edge are present and low quantities of degraded leaves of muscovite, along with probably accidentally introduced fragments of charcoal. The finest fraction of the insoluble residue of particles below 0,063 mm, which is formed mainly by dust particles of quartz, clay and other minerals, has light beige to light ochre hue and is represented by around 5 % of the aggregate weight in all mortars. The aggregate with particles up to 10 mm corresponds with river sand, probably taken from a local source. From the technological point of view the distribution of this sand can be estimated as very profitable as an important factor of mortar quality as well as factor minimizing the binder consumption. Apart from the components described above the stone aggregate of mortars is formed by fragments of opuka and to a lesser extent by tiny oval fragments of sandstone. Also particles of semifired limestone can be included in the aggregate, which were identified in high quantities mainly in the deck mortar. The thin sections of these mortars revealed how the grains of semi-fired limestone gradually changes to micritic matter of the mortar matrix. The coarsest fraction of the aggregate in the case of the rubble masonry of the core as well as of the deck comprises of rock fragments with sizes from several centimetres up to individual quarry stones. The coarsest particles captured within these samples are formed by sharp-edged fragments of grey to grey blue Palaeozoic limestone, smaller fragments of Mesozoic opuka probably from Bílá hora and rare ferrous sandstones of a ginger hue.

Altogether good or excellent mechanical characteristics of the analysed mortars (flexural strength was measured in some cases up to 1,5 MPa, compressive strength up to 6,2 MPa) together with relatively low carbonate content indicate the outstanding quality of the lime binder. In order to determine the character of the lime, samples of fired limestone were separated from the mortar of the deck. Composition of the lime lumps was evaluated on the base of X-ray diffraction analysis and thermogravimetry according to methodology already published (MOROPOLU 1995, 2004). Hydraulic phases in the matrix were not directly confirmed by diffraction analysis. The thermally determined character of the lime corresponded in one case with common air lime, in other cases lime with a pozzolan admixture and marginally also hydraulic lime. This confirms that it was possible to produce low hydraulic lime by firing the limestone identified in these mortars. Further development of hydraulic phases can be considered in a relatively long time horizon after the building was finished. It can be related to

the gradual reaction of the calcium hydroxide with the amorphous quartz contained in the clayey-calcareous silicate fragments (PŘIKRYL 2009, PŘIKRYL/ŠTÁSTNÁ 2010), which were identified in the mortars to a limited extent. The hydraulic character of the lime was indicated also by element analysis of the matrix and the lime lumps. Observation of the mortar matrix on the thin section under a polarised light showed significantly different character of the binder of the paving mortar. Lime binder, which composes similarly to other mortars primary of micrite, was partly permeated, in other places completely substituted by amorphous whitish isotropic material. Element analysis pursued within the electron microscopy identified mainly calcium and silicon in this material. A rising concentration of silicon approximately follows the representation of the different binder and the content of silicon compared to calcium rises up to the ratio ca 2 : 1. This effect is more probably caused by a specific position of the mortar deposit rather than by use of different binder or preparation technology of the paving mortar. The way how the isotropic substance penetrates the micrite and in places preferentially fills the microcracks in the matrix indicates a long term secondary process. This could correspond with the exposition of these mortars to weathering. The simplest explanation, which can be found with the current knowledge, presumes gradual precipitation of the siliceous gel in the porous system of the mortar matrix. The source of the  $\text{SiO}_2$  could be the already mentioned activated siliceous components of the mortar from the fully fired clayey-calcareous silicate fragments. Finally the physical and chemical characteristics of the studied mortars from Judith Bridge are compared with published results of mortar characteristics from analogous constructions – Charles Bridge and a gothic bridge in Roudnice nad Labem.

**Fig. 1.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. Detail of the diabase paving of the Judith Bridge in mortar bedding in the trench S01. Position of the mortar samples: 1 – paving, 2 – bridge deck.

**Fig. 2.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. Structure of the bridge deck in the trench S01. Position of the mortar samples 2 – bridge deck, 3 – bridge core.

**Fig. 3.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. A section of the mortar from the bridge deck, the mortar contains big fragments of gray limestone, light ochre fragments of opuka (clayey-calcareous silicate), noticeable fragment of charcoal and abundant tiny lumps of lime. The sample was slightly dampened with water in order to highlight the contrast of its composition.

**Fig. 4.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. A sample of mortar from the bridge core, oval particle of ginger sandstone is on the left, two small light coloured fragments of opuka and an oval lump of lime on the right. The sample was slightly dampened with water in order to highlight the contrast of its composition.

**Fig. 5, 6 and 7.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. Thin section of the mortar from the bridge core, polarised light transmission, crossed nicols (**top**), parallel nicols (**centre**) and reflected skew light (**bottom**). An oval lime lump apparent almost in the centre. Scale 500  $\mu\text{m}$ .

**Fig. 8.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. Granulometry of the aggregate from the researched mortars, fraction component sizes between 0–16 mm

**Fig. 9, 10 and 11.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. A thin section of the mortar from the bridge deck, polarised light transmission, crossed nicols (**top**), parallel nicols (**centre**) and reflected skew light (**bottom**). A fragment of fired limestone with a cracked edge fading into micrite matrix. Scale 500  $\mu\text{m}$ .

**Fig. 12.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. Results of the thermic analysis of the lime lump sampled from the bridge deck mortar, ratio of  $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$  6,1 and the content of  $\text{CaCO}_3$  63 % correspond with hydraulic lime.

**Fig. 13.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. A thin section of the mortar from the bridge deck, secondary (**left**) and back scattered electrons with spots of element analysis (**right**), particle of opuka in the centre. The reaction edge enriched by calcium is well apparent in the contact edge of opuka with lime. Results of the element analysis are in the Table 1.

**Fig. 14, 15 and 16.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. A thin section of the mortar from the bridge paving, polarised light transmission, crossed nicols (**top**), parallel nicols (**centre**) and reflected skew light (**bottom**). The photographs document different character of the paving mortar matrix containing abundance of white isotropic matter. Scale 500  $\mu\text{m}$ .

**Fig. 17.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. A thin section of the paving mortar, SEM. Spot element analysis of the transformed mortar matrix. Measurement results are in the Table 2.

**Tab. 1.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. Results of the spot element analysis pursued on a thin section of the deck mortar (see Fig. 13).

**Tab. 2.** Prague 1-Staré Město, Křižovnické square Plot No. 72. Results of the spot element analysis pursued on a thin section of the paving mortar (see Fig. 17).

**Tab. 3.** Overview of the material characteristics of the researched mortars.

**Tab. 4.** Overview of the chemical and mineralogical characteristics of the researched mortars.

*English by Linda and Patrick Foster and Petr Kuneš*

*Práce vznikla v rámci plnění výzkumného cíle NPÚ „Technologie a materiály“ financovaného z institucionální podpory Ministerstva kultury na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace.*

Ing. Petr KUNEŠ  
NPÚ, ústřední pracoviště  
kunes@up.npu.cz