

Karlův most:

spojnice materiálových znalostí antiky a moderní doby

**RICHARD
PŘIKRYL**

**ANETA
ŠTĀSTNÁ**

**MIROSLAVA
NOVOTNÁ**

**ZUZANA
WEISHAUPTOVÁ**

Doc. Mgr. Richard Prikryl, Dr., vystudoval PĚF UK v Praze. Zde se věnuje výuce a výzkumu v oblasti ložiskové geologie se zaměřením na průmyslové nerosty a horniny a stavební suroviny. V posledních letech se zabývá studiem vlastností a zvětrávacích procesů přírodního kamene na památkách.

Mgr. Aneta Štátná, Ph.D., vystudovala PĚF UK v Praze. Zde se zabývá tématy jako určování proveniencí dekoracních kamenů, reaktivita kameniva přidávaného do dopravních staveb a dlouhodobě spolupracuje na průzkumu stavu lícního a výplňového zdiva Karlova mostu.

Ing. Miroslava Novotná, CSc., vystudovala VŠCHT. Je vedoucí laboratoře molekulové spektroskopie Centrálních laboratoří VŠCHT. Zabývá se problematikou analýzy historických materiálů, archeologických artefaktů, barevných vrstev obrazů, nástěnných maleb, polychromie soch apod.

Ing. Zuzana Weishauptová, DrSc., vystudovala VŠCHT. V Ústavu struktury a mechaniky hornin AV ČR, v. v. i., se zabývá sorpční a porometrickou analýzou porézních materiálů.

Karlův most zpravidla vnímáme jako doklad vyspělosti stavitelského a kamenického umění středoevropské vrcholné gotiky. Kromě bezpochyby cenného kamenného pláště se řada zajímavých informací, ba přímo tajemství skrývá ve výplňovém zdivu. Byly poodhaleny až v posledních letech, kdy mohly být, vzhledem k probíhající rekonstrukci, provedeny průzkumné sondy do původních částí mostu. Jedna z kopaných sond, umístěná v původní klenbě mostního pole nad Čertovkou, poskytla velké množství gotického výplňového zdiva, jehož materiálový průzkum přinesl zjištění, která prokazují technologickou vyspělost středověkých stavitelských hutí.

Výplňové zdivo Karlova mostu bylo v pilířích i klenbách budováno technikou litého smíšeného zdiva, které kombinuje různé velké kusy (od velikosti pěsti až do 1 m) neopracovaného přírodního kamene (v případě Karlova mostu svrchnokřídové opuky z nedalekého Petřína) a maltu v poměru přibližně 3 : 1 (obr. 1). Základem vysoké trvanlivosti byl jak výběr správného typu přírodního kamene, tak volba vhodného druhu stavebního pojiva.

Svrchnokřídové opuky (vzhledem k proměnlivému zastoupení hlavních složek by měly být podle pravidel petrografické nomenklatury označovány jako jílovito-křemičité vápence až vápenato-jílovité silicity) patřily v českých zemích k oblíbeným stavebním kamenům již od 9. století a v době výstavby Karlova mostu proto existovala více než čtyřsetletá zkušenost s jejich těžbou, opracováním, trvanlivostí i způsobem vazby s tehdy dostupnými typy stavebních pojiv. Opuky se navíc vyznačují oproti jiným tehdy běžně používaným typům hornin nižší objemovou hmotností, poměrně značnou mikroporovitostí a velkým měrným povrchem, který usnadňuje provázání s maltou. Kromě toho to byl snadno dostupný materiál, lámavý v bezprostřední blízkosti na Petříně a na o něco vzdálenější Bílé hoře.

Druhou složkou výplňového zdiva je malta pozoruhodných kvalit. Její pojivo totiž tvoří hydraulické vápno. Hydraulická pojiva (tedy nejen hydraulické vápno, ale též přírodní, resp. římský cement a dnes nejrozšířenější portlandské a další cementy) mají schopnost tuhnout a tvrdnout pod vodou bez přístupu vzduchu, což neumějí vzdušná pojiva, mezi něž patří vzdušné vápno. Hydraulická pojiva se po vytvrdnutí vyznačují mnohem lepšími mechanickými vlastnostmi, a proto se také

portlandský cement stal univerzálním pojivem moderního stavitelství.

Hydraulické vápno, použité při gotické výstavbě Karlova mostu, bylo pravděpodobně páleno z devonských vápenců vyskytujících se v Podolí, Braníce, Radotíně a v dalších místech jihozápadně od historického centra Prahy. Dřívější označení „černé pražské vápno“ naznačuje možnou zdrojovou horninu – kosořské vápence v minulosti těžené v Černé roklí u Radotína. Tuto lokalitu by mohl potvrzovat i ojedinělý nálezný tentakulita, mikrofosilie charakteristické pro tento typ vápenců, náhodně objevený při mikroskopickém výzkumu malty (obr. 2). Jde o velmi jemnozrnné vápence s hojnou příměsí organického uhlíku (z jejich šedočerné barvy by mohlo pocházet označení černé pražské vápno), avšak s relativně nízkým obsahem křemíku a zejména hliníku. Přítomnost těchto dvou prvků (vázaných na křemennou hmotu a na jílové minerály) určuje míru hydraulicity vypáleného pojiva.

Při podrobné analýze složení pojiv malt Karlova mostu však bylo zjištěno, že se ve vytvrdlém pojivu nachází velké množství hydraulických fází. Tyto hydratované křemičity, hliníto-křemičity a hlinity zřejmě vznikly tím, že středověcí stavitelé přidávali k zmíněným vápencům před výpalem určitý díl nejmenno nadrcené opuky, která obsahuje křemík i hliník ve vyšší míře než pražské vápence. Tím vlastně napodobili to, co se stalo běžnou praxí až ve 20. století, tedy „ladění“ optimální surovinové směsi před výpalem pomocí pečlivého míchání několika materiálů odlišného složení. Přítomnost vypálených úlomků opuky se rovněž podařilo potvrdit mikroskopickým rozbořem malt.

Kvalita takto vyráběných pražských hydraulických vápen byla zřejmě známa ve velké části Evropy, což ostatně popisuje barokní vzedlanec Bohuslav Balbín:¹

„O vápenci 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 naskytanou poutníkům do Prahy na pravém břehu Vltavy za Vyšehradem, a bloky odsekávané na Bílé hoře dávají vápence tak bělostný, lesklý a čistý, že při pálení a hašení nezůstane téměř žádný odpad. Celý kamenný blok je vlastně čistý vápence; pražské vápno se mění v kašovitou hmotu tak bílou, že se dobře hodí pro štukatérskou výzdobu, jak se tomu

nyní říká. Italové dokonce nazývají jakékoliv dobré italské vápno slovy *pasta di Praga*.“

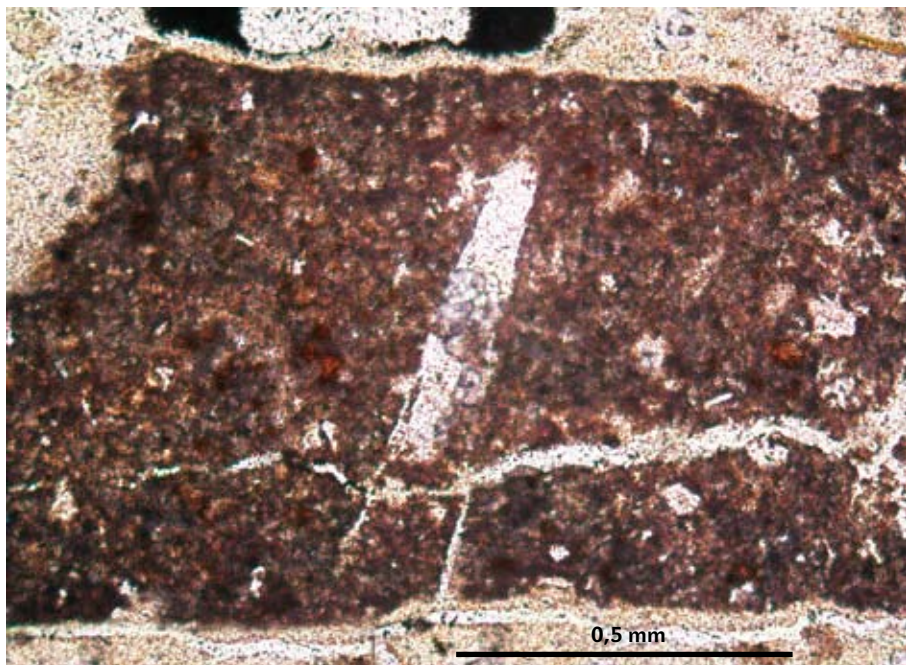
Do jaké míry jsou zjištěné poznatky významné? V první řadě je nutné si připomenout, že používání anorganických vápenných pojiv je velmi starého data. Vzdušná vápenná pojiva jsou doložena již od neolitu a patřila k běžným pojivům ve všech zemích Blízkého východu a Středomoří. Ve starověkém Egyptě se během 3.–2. tisíciletí př. Kr. začala objevovat směs vzdušného vápna a sádry. V prvním tisíciletí se ve středomořské oblasti (Kréta, Řecko, Kartágo, Řím) začala prosazovat pojiva hydraulická, vytvářená mícháním vzdušného vápna a hydraulicky aktivních přísad – sopečného popela (tzv. pucolánové přísady podle italského města Pozzuoli) nebo drčeného, na nízkou teplotu páleného keramického střepu (technika označovaná jako *cocciopesto*). Vrcholného rozšíření dosáhla tato pojiva v pozdně republikánském a posléze císařském Římě, kde usnadnila nejen technologickou expanzi Říše římské. Tato pojiva totiž umožňovala rychlou výstavbu potřebné infrastruktury včetně silnic, akvaduktů, veřejných budov a zejména přístavů v celém Středomoří. Existují dokonce písemné doklady o námořní přepravě potřebných surovin z Apeninského poloostrova do východních částí říše. Rozvoj používání těchto pojiv podnítil další stavební inovaci – vynález tzv. lehkého konstrukčního betonu, který byl použit na skořepinové konstrukce typu římského Pantheonu.

Mnozí se domnívají, že s úpadkem Říše římské došlo k úplnému zapomnění znalosti přípravy a použití hydraulických stavebních pojiv a že se znovu začala objevovat až s počátkem průmyslové revoluce (patent na římský cement podaný Jamesem Parkerem v r. 1796 a zejména patent anglického zedníka Josepha Aspdina na výrobu portlandského cementu z r. 1824). Období mezi 5.–18. st. mělo tedy alespoň z hlediska výroby a použití stavebních pojiv představovat určité období „temna“, v kterém se údajně používalo pouze vzdušné vápno, popřípadě sádra.

Zasadíme-li však zjištěné poznatky o materiálech výplňového zdiva Karlova mostu do tohoto historického kontextu, musíme je interpretovat jako určitou „znalostní“ kontinuitu se stavebními postupy používanými v antice. S pádem Říše římské se tedy zřejmě nevytratily všechny technické a technologické znalosti dřívější doby. Spíše byly předávány ve velice úzkém okruhu odborníků („zasvěcenců“), kteří je pečlivě střežili a podle různých důkazů i zdokonalovali.

Původní gotické výplňové zdivo Karlova mostu má vlastnosti, jejichž obdobu můžeme hledat nejen u antických předchůdců, ale také u moderních následovníků. O stavební roz-

Abstract: Charles Bridge: connection of material knowledge of antiquity and modern times by Richard Příkryl, Aneta Štátná, Miroslava Novotná and Zuzana Weishauptová. Fill of the Gothic Charles Bridge in Prague (Czech Republic) presents a carefully designed mortared rubble masonry which gained benefit from the use of hydraulic lime. The hydraulic lime was prepared by burning a raw material mixture composed of low-silica/alumina-free limestone and clayey-calcareous silicite. This binder mixed with clayey-calcareous silicite as an aggregate formed material which properties resemble modern lightweight structural concrete (LSC).



1. Nahoře: Makroskopický vzhled původního gotického výplňového zdiva zastiženého v průzkumné sondě na mostním poli XIV (klenba nad Čertovkou) dokumentuje přítomnost hrubého kameniva (opuky) a hydraulické malty.

2. Dole: Ojedinelý nálezk mikrofosilie v úlomku přepáleného spodnopaleozoického vápence – mikrofosilie byla určena jako tentakulit (převzato z publikace Příkryl R., Novotná M., Weishauptová Z., Štátná A.: Materiály původního zdiva Karlova mostu a jejich skladba. Průzkumy památek 16(1), 107–123, 2009).

mach, který zaznamenáváme od konce 19. a po většinu 20. století, se mimo jiné zasloužil vývoj řady typů betonů, včetně lehkých betonů. Ty mají důležité vlastnosti tepelně a zvukově izolační (zejména při objemové hmotnosti pod 1000 kg/m^3) a také stavebně-konstrukční – kombinaci nižší objemové hmotnosti v rozmezí $1500\text{--}2000 \text{ kg/m}^3$ a pevnosti v tlaku nad 17 MPa je dosahováno vysoké stability konstrukce při nízké vlastní hmotnosti. Toho využívají nejen dopravní stavby (mostní konstrukce), ale rovněž výškové budovy (mrakodrapy) a stavby technické (konstrukce vrtných ropných plošin v mořích). Když srovnáme experimentálně zjištěné vlastnosti původního gotického výplňového zdiva Karlova mostu (objemová hmotnost v rozmezí $1850\text{--}1900 \text{ kg/m}^3$, pevnost v prostém tlaku $18\text{--}61 \text{ MPa}$, modul pružnosti nad 11 GPa), nezbyvá než žasnout nad zručností našich předků, kteří dokázali bez moderní techniky vytvořit dílo, jež přečkalo nepřítelů šesti a půl století. ∞

Poděkování: Výzkum Karlova mostu je finančně podporován magistrátem hlavního města Prahy, výzkumným záměrem geologické sekce přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze (projekt MSM0021620855 Mechanismy transportu látek ve svrchních sférách Země) a badatelskými projekty GAČR 205/08/0676 a GAČR 205/09/P138.

1) Balbín B., Krásy a bohatství české země: výbor z díla *Miscellanea Historica Regni Bohemiae (1679–1687)*, český překlad latinského originálu, Panorama, Praha 1986.