

PETROGRAFICKÝ VÝZKUM OPUKOVÉHO NÁHROBKU ARNOŠTA Z PARDUBIC S OHLEDEM NA URČENÍ ZDROJOVÉ OBLASTI PŘÍRODNÍHO KAMENE

RICHARD PŘIKRYL – MARTIN RACEK – ZUZANA WEISHAUPTOVÁ –
JIŘINA PŘIKRYLOVÁ

Petrographic examination of opuka-stone tombstone of Arnošt of Pardubice with specific focus on provenance determination of natural stone

Detailed petrographic study of two stone pieces taken from the figural tombstone of the first Prague Archbishop Ernst of Pardubice confirmed its similarity to highly porous, fine-grained sedimentary rocks from the Bohemian Cretaceous Basin (Bílá Hora Form.). This so-called opuka stone is composed of prevailing fine-grained silica with common, but variable admixture of carbonates and clay minerals, making intrabasinal component, supplemented with minor extrabasinal clastic component with fine- to medium-grained silt granulometry. Based on the results from analytical and observational methods, the stone is equal to the so-called "zlatá opuka" which has been quarried in the very vicinity of medieval Prague (Strahov – Bílá Hora area).

Keywords: Arnošt of Pardubice, figural tombstone, opuka-stone, petrography, provenance

Detailní petrografická studie kamenného náhrobku prvního katolického arcibiskupa Arnošta z Pardubic († 1364), umístěného v kostele Nanebevzetí Nejsvětější Panny Marie v Kladsku, prokázala, že studovaný materiál je opukou bělohorského souvrství z pražské oblasti české křídové pánve. Výsledky získané souborem exaktních metod, zahrnujících optickou mikroskopii, skenovací elektronovou mikroskopii s mikroanalýzou, práškovou RTG difrakci a porosimetrickou analýzu pórového prostoru rtuťovou porozimetrií, prokázaly, že pro zmiňovaný náhrobek byla použita bělohorská opuka z vrstvy tradičně označované jako „zlatá opuka“. Předpokládaným místem výlomu byly s největší pravděpodobností strahovské lomy, které v té době poskytovaly kvalitní stavební i sochařský kámen.

Klíčová slova: Arnošt z Pardubic, figurální náhrobek, opuka, petrografie, zdrojová oblast

ÚVOD

K nejvíce využívaným přírodním kamenům vrcholného středověku zemí Koruny české patřily opuky české křídové pánve. Několik staletí trvající zkušenost s jejich těžbou, zpracováním a využitím od prostého stavebního kamene až po nejnáročnější architektonické či sochařské práce vyvrcholily v závěru 14. století v tzv. krásném slohu s typickými polychromovanými madonami a pietami,¹⁾ často provedenými právě v opuce. Hojně zastoupení opukových artefaktů v kulturním dědictví zemí Koruny české i v širším střeoevropském prostoru vedlo v minulých desetiletích ke zvýšenému badatelskému zájmu, zaměřenému nejen na prokazování zdrojových oblastí hornin použitých pro krásnoslohová sochařská díla (Konta 1993; Šrámek 1998; 2004), ale též na hledání spojitostí zejména s pražskou parléřovskou hutí.

Umělecky obdobně hodnotná sochařská díla se však objevují již v počátcích druhé poloviny 14. století (tedy ještě v předkrásnoslohovém období). Souvisejí mimo jiné s funerální plastikou a sochařskou výzdobou nově budované metropolitní katedrály, opět za účasti parléřovské hutí.²⁾

Cenné opukové artefakty, časově řazené do tohoto období, lze nalézt i mimo centrální území Čech a jejich hlavní opukové lomařské oblasti; což je mimo jiné příklad Kladského hrabství s hlavním městem Kladskem, tvořícím nedílnou součást zemí Koruny české již ve 14. století. Zhotovení opukového figurálního náhrobku Arnošta z Pardubic, prvního katolického arcibiskupa a metropolitě českého, umístěného ve zdejší farní kostele Nanebevzetí Nejsvětější Panny Marie, je většinou badatelské obce spojováno s pražskou parléřovskou hutí,³⁾ ať již stylem provedení, nebo s odkazem na logické vazby Arnošta z Pardubic ke královskému dvoru. Objevily se však i další názory, které připouštějí možnou účast středověkých stavebních hutí v Kladsku, využívajících tamní zdroje přírodního kamene.⁴⁾ Ani jednu z těchto domněnek dosud nepodpořil cílený výzkum přírodního kamene zmiňova-

2) Např. G. Schmidt, Peter Parler und Heinrich VI. Parler als Bildhauer, Wiener Jahrbuch für Kunstgeschichte 23, 1970, s. 108–153.

3) Např. A. Schädler, Peter Parler und Die Skulptur des Schönen Stils, in: A. Legner ed., Die Parler und der Schöne Stil 1350–1400. Europäische Kunst unter den Luxemburgern. Ein Handbuch zur Ausstellung des Schnütgen-Museums in der Kunsthalle Köln. III. Taschenbuch. Köln 1978, s. 17–25.

4) J. Šura, Možnosti materiálového výzkumu náhrobku Arnošta z Pardubic, in: R. Gladkiewicz – V. Šebek red., Tradycja Arnošta z Pardubic w kulturze Ziemi Kłodzkiej. Wrocław – Pardubice 2008, s. 129–133.

1) Viz např. M. S. Frinta, The beautiful style in the sculpture around 1400 and the Master of the Beautiful Madonnas. MS doktorské disertační práce, University of Michigan 1960; A. Kutal, České gotické sochařství 1350–1450. Praha 1962.

ného artefaktu a jeho srovnání s horninami ze známých těžebních center té doby. Tato práce je tedy prvním pokusem, který se snaží na základě kvantitativních petrografických a doplňujících rozborů prokázat, že místem výlomu přírodního kamene, použitého pro figurální část náhrobku Arnošta z Pardubic, byla právě pražská oblast. V širším kontextu má tento příspěvek rovněž význam pro provenienční studie navazujících uměleckých období, tedy zejména krásného slohu, neboť potvrzuje materiálovou kontinuitu kamenných sochařských děl druhé poloviny 14. století v zemích Koruny české.

MATERIÁLOVÝ ROZBOR PŘÍRODNÍHO KAMENE SOCHAŘSKÝCH VÝTVARNÝCH DĚL A JEHO ÚLOHA BĚHEM PŘEDRESTAURÁTORSKÉHO PRŮZKUMU

Obecně

Řešení problematiky přírodního kamene sochařských výtvorných děl během předrestaurátorského průzkumu má význam nejen z hlediska poznání typu kamene a jeho aktuálních vlastností, ale též pro zjištění zdrojové oblasti, odvození technologie opracování, určení míry narušení zvětrávacími procesy nebo pro identifikaci starších restaurátorských zásahů (Příkryl 2007). Přínosem může být i rozpoznání kopií z jiného materiálu či padělků. Podklady takového průzkumu se pak stávají samozřejmou součástí restaurátorského záměru a zásahu.

Metodický přístup materiálového rozboru se musí řídit požadavky zadavatele (tedy konkrétním účelem průzkumu), ale zároveň musí respektovat typ zkoumané horniny, jenž ovlivňuje volbu konkrétních nástrojů rozboru. Nejinak je tomu i v případě opuk, pro něž byl autory tohoto příspěvku vypracován ucelený metodický postup (Příkryl – Štátná – Příkrylová – Zamrazilová – Weishauptová 2014), který v ideálním případě umožňuje věrohodné stanovení zdrojové oblasti, případně i určité vrstvy, z níž může zkoumaný vzorek pocházet.

Petrografický rozbor

Uvedený metodický postup vyžaduje odběr kusového vzorku z nepohledové partie artefaktu a jeho následný petrografický a materiálový rozbor. Možnost provedení potřebných rozborů je samozřejmě ovlivněna velikostí a stavem odebraného vzorku: u opuk by vzorek měl mít velikost alespoň 2×2×2 cm a musí být soudržný. Velikost vzorku podmiňuje možnost provést všechny potřebné rozborů⁵⁾ (tab. 1), soudržnost je naopak klíčová pro mikroskopický výzkum, bez něž se petrografický rozbor neobejde.

Z části odebraného vzorku je zhotoven horninový výbrus, následně studovaný pomocí optického mikroskopu a elektronové mikroskopie s mikroanalýzou. U velmi jemnozrnných hornin typu opuk tvoří pozorování pomocí elektronové mikroskopie s mikroanalýzou zásadní součást petrografického zkoumání; neboť kromě určení přítom-

ných horninotvorných součástí dovoluje odvodit modální složení (tj. zastoupení přítomných minerálních fází a horninotvorných složek) z kompozičních prvkových map.⁶⁾ V případě opuk jsou pro tyto účely zásadní stanovení plošného zastoupení vybraných prvků, charakteristických pro přítomné horninotvorné složky: vápníku, jenž slouží k určení přítomné karbonátové složky; křemíku, u něž lze na základě rozdílných intenzit v distribuci odlišit přítomnou klastickou složku tvořenou dobře krystalickým křemenem od základní hmoty obsahující hůře strukturně uspořádanou křemitou hmotu (zpravidla rekrystalované křemité bioklasty); hliníku a draslíku, u nichž lze na základě rozdílných intenzit, resp. absence draslíku v prvkové mapě oddělit zrna živců, slíd a kaolinitu; a hořčíku či železa, které spolu s dalšími prvky dovolují interpretovat agregáty glaukonitu. Údaje získané kompozičním mapováním pomocí elektronové mikroskopie s mikroanalýzou jsou dále zpracované specializovaným postupem, označovaným jako petrografická analýza obrazu,⁷⁾ jehož výstupy slouží kromě stanovení modálního složení k vyjádření zrnitosti jednotlivých fází nebo jejich dalších geometrických vlastností, které jsou indikativní jak z hlediska geneze, tak z hlediska provenienční analýzy. Význam má rovněž určení indikativních minoritních horninotvorných součástí, které jsou charakteristické pouze pro určité úseky české křídové pánve (tj. naznačují zdrojový materiál z blízkých starších jednotek).⁸⁾

S ohledem na velmi jemnozrnný charakter všech horninotvorných součástí opuk a kvůli nemožnosti stanovit přesné mineralogické (fázové) složení samotnou elektronovou mikroskopii s mikroanalýzou,⁹⁾ je součástí standardního rozboru opuk též práškový rentgen (RTG) difrakční rozbor. Pro něj dostačuje malé množství potřebného materiálu (2–3 g) v práškové podobě, jenž se v případě opuk získává odloužením v kyselině rozpustné karbonátové složky.¹⁰⁾ Přínosem této přípravy vzorku je informace o celkovém obsahu uhličitánů (karbonátové složky), aniž by se musela provádět celková silikátová analýza, která vyžaduje větší množství materiálu, než je zpravidla možné získat u většiny studovaných artefaktů. Nevýhodou tohoto stanovení naopak je, že nedovoluje pozorovat přímou vazbu uhličitánové složky vůči ostatním horninotvorným

6) Kompoziční mapy, zobrazující distribuci prvků v analyzované části výbrusu opuk, jsou načítány při urychlovacím napětí 15 kV a proudu svazku 6 nA. Rozsah území pro načítání kompozičních map je vždy volen s ohledem na zrnitost daného vzorku. Rozlišení výsledné mapy je 1024 na 1024 bodů, doba načítání signálu jednoho bodu je zvolena na 28 ms živého času. Kompoziční mapy poskytují kvalitativní informaci o koncentraci jednotlivých prvků, barevná škála udává relativní koncentrace daného prvku (studené barvy nízké a teplé barvy vysoké koncentrace).

7) Jedná se o postup, během něž jsou vymezeny jednotlivé objekty – minerální zrna, jejichž plošný rozsah a geometrické charakteristiky se stanovují specializovaným počítačovým programem. Blíže k metodě např. R. Příkryl, Some microstructural aspects of strength variation in rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanical Abstracts* 38, č. 5, 2001, s. 671–682.

8) Z dosud získaných poznatků lze za indikativní minerální fáze považovat např. dolomit nebo detritické slídy specifického chemického složení.

9) Jedná se o spektrometrickou metodu, nikoliv o metodu fázového rozboru.

10) Zpravidla se používá 1M HCl. Viz např. B. F. Molnia, A rapid and accurate method for the analysis of calcium carbonate in small samples, *Journal of Sedimentary Research* 44, č. 2, 1974, s. 589–590.

5) I přes nesplnění požadavku na minimální velikost ani u jednoho ze studovaných vzorků z figurální části náhrobku Arnošta z Pardubic se podařilo provést většinu nezbytných analytických rozborů. Množství materiálu dostupného k rozborům však mohlo významně ovlivnit rozptyl naměřených hodnot.



Obr. 1: Vzhled figurální části náhrobku Arnošta z Pardubic ve farním kostele Nanebevzetí Panny Marie v Kladsku: a – pohled na spodní část figurálního náhrobku s příčnými prasklinami a odlomením povrchové modelace; b – detailní pohled na vzhled přírodního kamene v místě čerstvého odlomení povrchové modelace; c – vzhled přírodního kamene na jednom z úlomků v přirozeném stavu (na snímku je dobře patrná laminární vrstevnatost); d – stopy po kamenickém nástroji (ploché dlátko) dokumentující opracování kamene v čerstvém stavu (foto R. Příkryl).

součástí či odlišit různé morfologické a genetické typy přítomných karbonátů tak, jak to umožňuje mikroskopický rozbor. Práškový RTG difrakční rozbor je nezbytný zejména pro stanovení přítomných vrstevnatých křemičtanů (tj. jílových minerálů a slíd) a pro zjištění stupně krystalinity křemité hmoty.¹¹⁾

Petrografický rozbor nezkoumá pouze přítomné minerální fáze a horninotvorné složky z hlediska jejich složení či zrnitosti, ale též jejich vzájemné prostorové vztahy, jakožto součást studia vnitřní stavby hornin. Ta je podmíněna nejen přítomnou pevnou hmotou (minerálními fázemi), ale i volným prostorem mezi jednotlivými minerálními zrny – tzv. pórovým prostorem, který se často zjednodušuje na petrofyzikální veličinu pórovitost.¹²⁾ V případě studia přírodního kamene z památek se rozbor pórového prostoru musí zaměřit i na četnost pórů různé velikosti, vztah pórů k vnitřní horninové stavbě či identifikaci pórů různé geneze. Tato část studia přírodního kamene se často označuje jako porosimetrická analýza a sestává se jak z mikroskopických pozorování, tak analytického vý-

zkumu kvantitativních charakteristik pomocí texturní analýzy vysokotlakou rtuťovou porosimetrií.¹³⁾ Získaná data (např. četnostní rozložení pórů, resp. pórových hrdel dle velikosti průměru průřezové plochy, měrný povrch ad.) slouží k interpretaci trvanlivosti. V případě opuk se navíc ukázalo, že vybrané porosimetrické charakteristiky neztvrdělého materiálu mohou poskytnout důležité vodítko při interpretaci zdrojové oblasti horniny (Šrámek 1997; Šrámek – Rathouský – Schneider 1992; Příkryl a kol. 2017a; 2017 b; Žák – Příkryl – Weishauptová 2017).

VÝSLEDKY PETROGRAFICKÉHO STUDIA

Makroskopický vzhled

Opuku figurální části náhrobku Arnošta z Pardubic lze popsat jako velmi jemnozrnnou sedimentární horninu se zřetelnou sedimentární laminární vrstevnatostí, pozorovatelnou zejména při prohlídce materiálu *in situ* (obr. 1a, b). Makroskopický vzhled tohoto materiálu vynikne na relativně čerstvých lomových plochách oddělené uložených fragmentů (obr. 1c). Tyto plochy mají nerovný, jemně zrnitý povrch, místy až s náznakem k lasturnatému lomu.

Při ohledání náhrobku *in situ* byla v nepohledové ložní části zjištěna přítomnost rozsáhlé odlehčovací dutiny,

11) Blíže k určování stupně krystalinity křemité hmoty (indexu krystalinity křemene, quartz crystallinity index, QCI) z intenzit difrakčního záznamu v úhlovém oboru $2\theta \sim 67-69^\circ$ (tzv. „silica quintuplet“) viz např. K. J. Murata – M. B. Norman, An index of crystallinity for quartz, American Journal of Science 276, 1976, s. 1120–1130.

12) Pórovitost je definována jako objemové zastoupení pórů vůči celkovému objemu studovaného pórového prostředí. Blíže např. J. H. Schön, Physical properties of rocks: fundamentals and principles of petrophysics. Amsterdam: Elsevier 2004.

13) Blíže k metodě např. K. Rübner – D. Hoffmann, Characterization of mineral building materials by mercury-intrusion porosimetry, Particle & Particle Systems Characterization 23, č. 1, 2006, s. 20–28.

jež musela být, vzhledem k charakteru opracování jejího povrchu (obr. 1d), vytvořena velmi brzy po vylomení surového bloku přírodního kamene, kdy si materiál ještě podržel přirozenou, tzv. „lomovou“ vlhkost a choval se spíše plasticky.¹⁴⁾

Na žádném z úlomků ani na artefaktu samotném nebylo možné rozeznat žádné minerální fáze prostým okem, což logicky souvisí s velmi jemnozrnným charakterem horniny náhrobku. Na čerstvé lomové ploše má studovaná opuka velmi světlou, žlutavě béžovou až béžovo-okrovou barvu (obr. 1a–c). Makroskopicky nebylo možné rozeznat žádné projevy zvětrávacích procesů; exponovaný povrch však byl značně barevně pozměněn do špinavě šedobéžového odstínu (obr. 1a, b), což souvisí s předchozími úpravami povrchu a usazováním prachu. Pohledová plocha figurální části náhrobku je velmi pečlivě opracovaná, prostá stop po hrubších kamenických nástrojích. Ty se zachovaly pouze na stěnách výše zmíněné odlehčovací dutiny.

Horninotvorné složky studovaných opuk

Pro petrografické studium a následnou interpretaci zdrojové oblasti horniny figurální části náhrobku Arnošta z Pardubic byl klíčový mikroskopický a analytický rozbor odebraných horninových vzorků (tab. 1).

Podrobný popis zjištěných horninotvorných součástí (tab. 2) a jejich vzájemných vztahů vychází z mikroskopického studia horninových výbrusů v optickém a skenovacím elektronovém mikroskopu s mikroanalýzou.¹⁶⁾ Pro správné systematické zařazení opuk je

Vzorek	Typ vzorku	Rozměr/množství vzorku	Připravený preparát / provedené analýzy
Přírodní kámen			
S1622/1	Odseknutý odštěpek nepravidelného tvaru	1 úlomek	3 výbrusy pro OM, CL, SEM/EDS, SEM/EDS_KM, Hg-por, NZ, RTGd
S1622/3	Odseknutý odštěpek nepravidelného tvaru	1 úlomek	3 výbrusy pro OM, CL, SEM/EDS, SEM/EDS_KM, Hg-por, NZ, RTGd

Tab. 1. Seznam studovaných vzorků opuky, odebraných z náhrobku Arnošta z Pardubic v Kladsku.¹⁵⁾ Vysvětlivky zkratk: OM = optická mikroskopie, CL = katodová luminiscence, SEM/EDS = skenovací elektronová mikroskopie s energiově disperzní spektrometrií, SEM/EDS_KM = skenovací elektronová mikroskopie s energiově disperzní spektrometrií a kompozičním mapováním, Hg-por = vysokotlaká rtuťová porosimetrie, NZ = nerozpustný zbytek, RTGd = RTG difrakční rozbor.

Složka dle původu / povaha složek	Složky (minerály) a jejich formy	S1622/1 Obsah (obj. %)	S1622/3 Obsah (obj. %)
Pevninská (terigenní) úlomkovitá zrna	Celkem	10–12	9–11
	Křemen	7–8	6–7
	K-živce	2–3	2–3
	Muskovit	1–1,5	1
	Akcesorie	< 1	< 1
Pánevní (autigenní) fáze	Celkem	88–90	89–91
	SiO ₂ (hůře krystalické formy)	55–57	56–58
	Kaolinit	4–6	6–7
	Glaukonit	0,5–1	0,5–1
	Illit	< 0,5	< 0,5
	Fe-oxyhydroxidy	< 0,5	< 0,5
	Kalcit	25–27	22–24
	Mikrit I (pod 4 μm)	11–13	10–12
	Mikrit II (4–30 μm)	6–8	7–9
	bioklasty	7–9	5–6

Tab. 2. Zastoupení horninotvorných složek pevné hmoty v obou studovaných vzorcích opuk z figurální části náhrobku Arnošta z Pardubic. Zastoupení jednotlivých složek, resp. rozptýl očekávaných hodnot založený na měření plošného zastoupení studovaných složek pomocí petrografické obrazové analýzy, je uvedeno v objemových procentech z celkového množství pevné hmoty.

Vzorek	Použitá kyselina	Původní hmotnost vzorku [g]	Hmotnost nerozpustného zbytku [g]	Hmotnostní úbytek [hm. %]
S1622/1_d	1M HCl	0,1806	0,1205	33,28
S1622/3_d	1M HCl	0,3849	0,2814	26,89

Tab. 3. Stanovení hmotnostního úbytku pomocí odloužení uhlíčitanů (kalcitů) a dalších rozpustných složek ze dvou vzorků opuky figurální části náhrobku Arnošta z Pardubic a zjištěný hmotnostní úbytek.¹⁹⁾

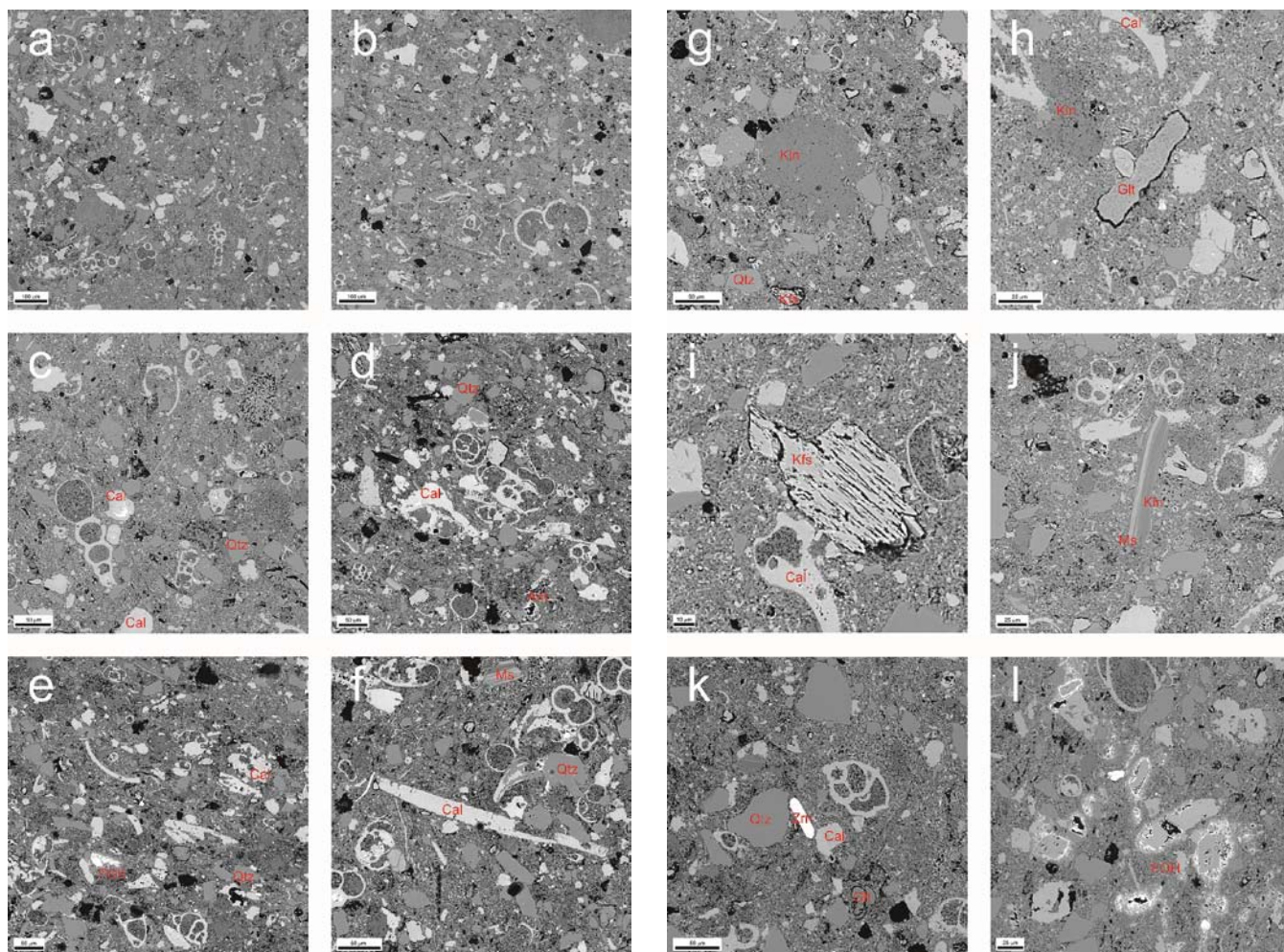
klíčové, že se jedná o velmi jemnozrnné sedimentární horniny s komplikovaným vývojem, během něž se mísil úlomkový materiál, přinášený do sedimentární pánve (česká křídová pánev) z pevniny (tzv. terigenní úlomkovitá složka) s materiálem, pocházejícím z vlastního sedimentárního prostředí (tzv. autigenní složka) během ukládání (sedimentace) a zpevňování (litifikace, resp. diagenese).

Ve studovaných vzorcích opuky jednoznačně převažuje složka pánevní; její podíl na pevné hmotě horniny dosahuje 88–91 obj. % (tab. 2). Pánevní složka je více než ze dvou třetin tvořena strukturně hůře uspořádanými formami křemité hmoty (obr. 2), přičemž velikost jednotlivých krystalitů, často shluklých v rozsáhlejších agregátech, prorůstajících se zrný jílových minerálů nebo mikritu, nepřesahuje první mikrometry. Tato více méně rovnoměrně rozprostřená složka (obr. 3) má jednoznačně cementační povahu a lze ji interpretovat jako diageneticky přetvoře-

14) Obdobný jev byl pozorován autory tohoto příspěvku při studiu tzv. Jihlavské Piety – blíže R. Přikryl – Z. Weishauptová – M. Racek – J. Přikrylová. Opuka Piet krásného slohu: srovnávací petrografický rozbor Piety ze sbírky olomouckého kanovníka Petra Kriváka a Piety z Jihlavy, in: J. O. Hrbáčová ed., Piety krásného slohu. Olomouc: Muzeum umění 2017, s. 82–93. Přítomnost takové dutiny může indikovat snahu o snížení hmotnosti výsledného artefaktu, jenž měl být přepravován na větší vzdálenost.

15) Vzorky odebral restaurátor Mgr. art. Jakub Ďoubal, Ph.D.

16) Leštěné výbrusy vzorků opuk byly analyzovány v laboratoři elektronové mikroskopie Ústavu petrologie a strukturní geologie (Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, operátor Mgr. Martin Racek, Ph.D.) pomocí elektronového mikroskopu Tescan Vega s energiově disperzním detektorem (Oxford Instruments X-Max 50). Leštěné výbrusy byly před vlastním pozorováním a měřením pokoveny cca 20 nm mocnou vrstvou amorfního uhlíku.



Obr. 2: Mikroskopický vzhled opuk z figurální části náhrobku Arnošta z Pardubic dle studia v elektronovém mikroskopu (vše snímky ve zpět odražených elektronech). Vysvětlivky: a, b = celkový pohled na mikrostrukturu s částečně nerovnoměrnou distribucí kalcitové složky (světle šedá zrna); c-f = detaily mikrostruktury s přítomnou karbonátovou hmotou (Cal), bioklasty a klastickým křemenem (Qtz), případně též Fe-oxihydroxidy (FOH) a muskovitem (Ms); g-h = hojné agregáty kaolinitu (Kln), případně též glaukonitu (Gln); i = detail K-živce (Kfs); j = detail částečně kaolinizovaného (Kln) lupínku muskovitu (Ms); k = klasty křemene (Qtz) a akcesorického zirkonu (Zrn); l = hojné impregnace pórovité základní hmoty Fe-oxihydroxidy (FOH).

nou SiO_2 hmotu křemitých bioklastů, původně tvořených s největší pravděpodobností opálem A.¹⁷⁾ Zmiňované bioklasty však ve studovaném materiálu chybí, stejně jako v opukách z pražských lomů. Pozorovaná křemitá hmota vykazuje dle RTG difrakčních dat¹⁸⁾ nižší, ale kolísavý index krystalinity křemene (QCI = 3–6) (obr. 4), což jednak indikuje hojné zastoupení strukturně hůře uspořádaných forem křemité hmoty (tridymitu, CT-opálu) i proměnlivé zastoupení klastické příměsi, reprezentované dobře krystalickým nízkým α křemenem, který ovšem zdrojově patří k terigenní složce (viz dále).

Druhou nejčastější složkou, rovněž spojovanou s vlastním pánevním prostředím, jsou karbonáty (uhličitany),

zastoupené pouze kalcitem. Obsah mikroskopicky zjiitelného kalcitu byl o několik obj. % nižší, než obsah karbonátové složky, stanovené výluhem vzorku v kyselině chlorovodíkové (tab. 3).

Tato skutečnost souvisí s rozlišením kompozičního prvkového mapování pomocí elektronové mikroskopie s mikroanalýzou, která nedovoluje interpretovat zastoupení submikronových částic. Převažující část karbonátové hmoty lze označit jako mikrit (obr. 2, 5) v širším slova smyslu,²⁰⁾ pouze menší podíl připadá na bioklasty (dírkonošce – Foraminifera), případně druhotné sparitické výplně komůrek bioklastů i větších zrn; mezi něž patří hojné bioklasty (schránky dírkonošců), ale též velice vzácně se vyskytující druhotná sparitická²¹⁾ výplň těchto bioklastů.

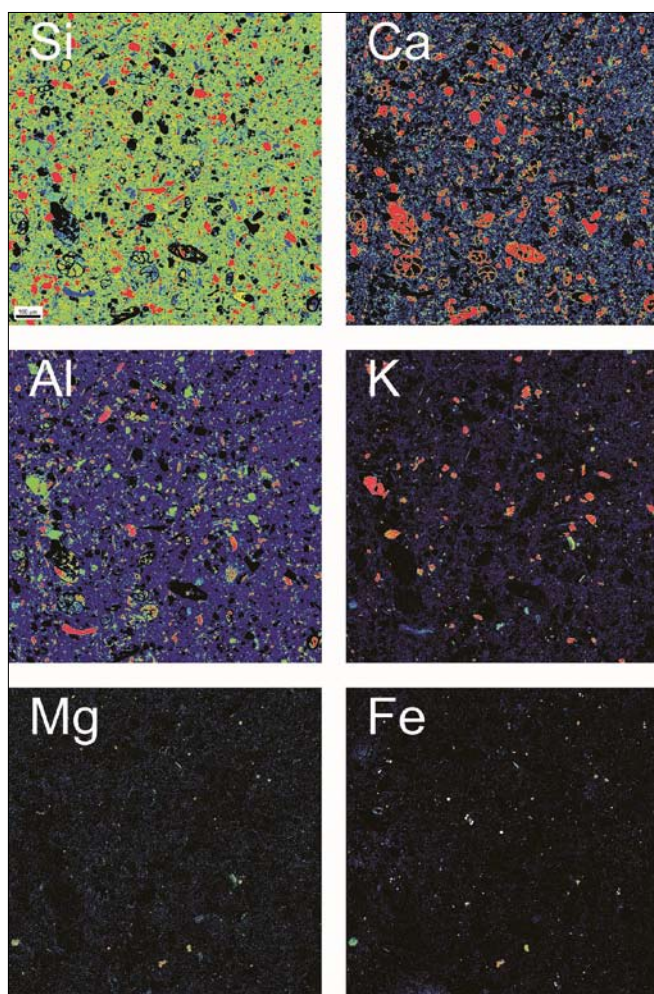
17) Opál A je strukturně velmi neuspořádaná forma křemité hmoty, charakteristická pro křemité schránky některých mořských organismů. Při dalším vývoji sedimentu přechází do strukturně uspořádanějších forem jako je CT opál ad. (viz např. R. Hesse, Diagenesis of biogenic siliceous sediments, Geoscience Canada 15, č. 3, 1988, s. 171–192.

18) Uvedená data byla pořízena pomocí difraktometru X'Pert Pro, PANalytical B.V. (laboratoř RTG difrakční analýzy, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PŘF UK) s následujícími podmínkami měření: zdroj CuK α , napětí 40 kV, proud 30 mA, úhlový obor 2Theta: 3–70° (texturně orientovaný preparát), resp. 3–30° (glykovaný preparát), krok 0,005°, doba načítání 200 s; PŘF UK v Praze (operátor Mgr. Petr Drahotka, Ph.D.).

19) Stanovil Mgr. Petr Kozlovcev v chemických laboratořích Ústavu geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů PŘF UK.

20) Jedná se jak o mikrit v původní definici Folka (R. L. Folk, Practical petrographical classification of limestones, Amer. Ass. Petrol. Geol. Bull. 43, 1959, s. 1–38), tj. částice pod 4 mm, tak v rozšířeném pojetí Boselliniho (A. Bosellini, Sul significato genetico e ambientale di alcuni tipi di rocce calcaree in base alle più recenti classificazioni, Museo di storia naturale Venezia Tridentina 15, č. 2, 1964, s. 1–58), které pod mikrit zahrnuje karbonátové částice, jejichž velikost nepřesáhne 30 mm. Větší částice a bioklasty jsou obecně označovány jako „zrna“.

21) Pod pojmem sparit se rozumí zrnitá karbonátová hmota, reprezen-



Obr. 3: Kompoziční prvkové mapy opuky z figurální části náhrobku Arnošta z Pardubic (vzorek S1622/1) získané plošnou analýzou leštěného výbrusu v elektronovém mikroskopu. Vysvětlivky: a = distribuce Si (růžovo-červené plochy odpovídají křemenným klastům, žlutozelená plocha základní hmotě tvořené strukturně hůře uspořádanými formami křemité hmoty); b = distribuce Ca (růžovo-červené plochy odpovídají přítomným uhličitánům – kalcitu); c = distribuce Al (růžovo-červené plochy odpovídají detritické slídě, případně též kaolinitu, zelená plocha klastům K-živců); d = distribuce K (růžovo-červené plochy odpovídají přítomným K-živcům); e = distribuce Mg; f = distribuce Fe.

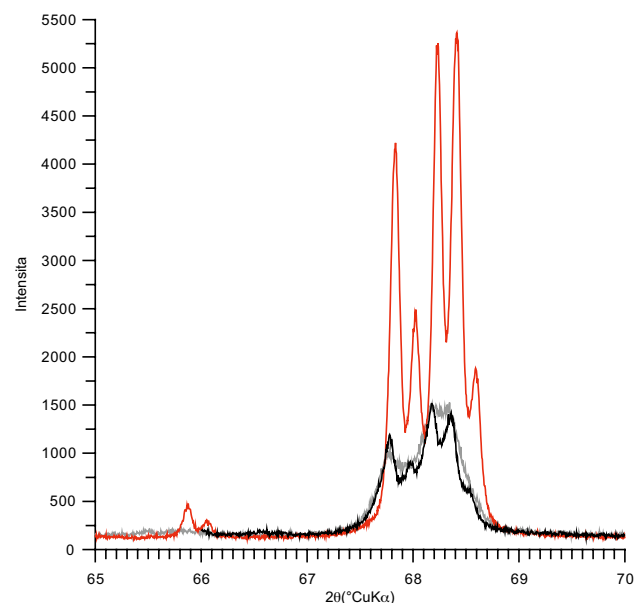
V opuce z náhrobku Arnošta z Pardubic nebyla zjištěna přítomnost dolomitu, který je indikativní minerální fází pro opuky z břevanských lomů lounské oblasti.

Z pánevních složek tvoří nejméně čtenou, přesto však významnou složku (5–8 obj. %) nově vzniklé vrstevnaté křemičitany – jílové minerály (obr. 2). Nejhojnější zjištěnou fází této skupiny byl ve studované opuce kaolinit, následovaný agregáty glaukonitu, jenž naznačuje vznik sedimentu v mořském prostředí.²²⁾ Méně čtený byl illit, který lze na základě výsledků práškové RTG difrakce interpretovat jako špatně krystalický illit (obr. 6), jenž vzniká jako autigenní složka v mořském prostředí.²³⁾ Poměrně hojné oxidy, resp. oxihydroxidy železa tvoří opakní složku, vyskytující

tující často rekrystalizovaný kalcit nebo druhotnou karbonátovou výplň. V porovnání s mikritem bývá výrazně hrubozrnnější.

22) Jedná o vnitropánevni autigenní glaukonit bez známek transportu (blíže A. Amorosi, Use of glauconites for stratigraphic correlation: a review and case studies, *Giornale di Geologia* 55, 1993, s. 117–137).

23) K určování krystalinity illitu a následným interpretacím viz např. A. Meunier – B. Velde, *Illite: Origins, Evolution and Metamorphism*. Berlin: Springer-Verlag 2004.



Obr. 4: Výřez části difrakčních dat v úhlovém oboru 65–70°2theta, používaný pro zjištění stupně krystalinity přítomné křemité hmoty a porovnaného s difrakčními daty dobře krystalického nízkého α křemene z pegmatitu (červená křivka). Z uvedeného srovnání vyplývá výrazně nižší stupeň krystalinity obou studovaných vzorků opuk (zejména pak u vzorku S1622/3 – šedá křivka), ale též rozptýl ve stupni jejich krystalinity, který souvisí s rozdílným obsahem křemenných klastů v obou studovaných vzorcích.

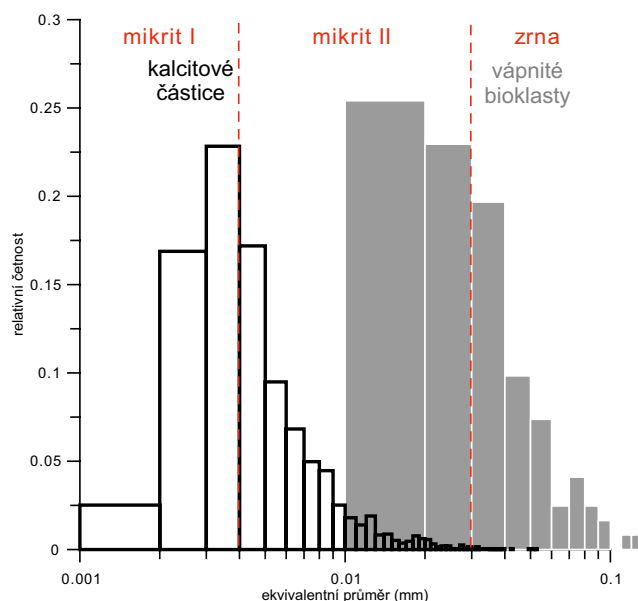
se v jemně rozptýlené podobě mezi ostatními horninotvornými součástmi (obr. 2), místy ale též ve shlucích, které vyplňují komůrky schránek dírkonošců. Prokazatelnou součástí základní hmoty je též witherit (BaCO_3) (obr. 6), který může vznikat přeměnou barytu.

V ne příliš hojném terigenním úlomkovitém materiálu (9–12 obj. % z celkového podílu pevné hmoty) převládají jemnozrnná ostrohranná zrna křemene (dobře krystalický nízký α křemen), doprovázená méně četnými úlomky živců (jedná se výlučně o draselný živec odpovídající ortoklasu či mikroklinu) a slíd (zastoupené tenkými lupínky převážujícího muskovitu s různým rozsahem kaolinizace, pouze akcesoricky doprovázené biotitem). Úlomkovitou příměs doplňují akcesorická zrna zirkonu, ilmenitu, monazitu, xenotimu a Cr-spinelu. Velikost úlomkovitých částic zanesených z pevniny odpovídá prachové frakci s převážujícími jemnými prachovými částicemi (0,004–0,008 μm); jejich maximální velikost nepřesahuje 50 μm (obr. 7).

PÓROVÝ PROSTOR A JEHO VÝZNAM PRO INTERPRETACI ZDROJOVÝCH OBLASTÍ OPUKY

Opuky jsou známy jako sedimentární horniny s vysokým podílem pórů drobných rozměrů, jimž je přičítána relativně nízká odolnost těchto hornin vůči zvětrávacím procesům spojených s atmosférickými vlivy. Tento pórový prostor je nedílnou součástí vnitřní stavby opuk, přičemž odráží nejen pochody při jejich vzniku i pozdějších přeměnách, ale má zásadní význam pro transport látek včetně vody, vlhkosti či vodorozpustných solí; zásadním způsobem tedy podmiňuje trvanlivost hornin. Rovněž významně ovlivňuje další fyzikální vlastnosti, zejména mechanické.

Nedávné studie vzorků opuk z různých stavebních konstrukcí či artefaktů prokázaly (Příkryl a kol. 2017a; 2017 b; Žák – Příkryl – Weishauptová 2017), že kvantitativ-



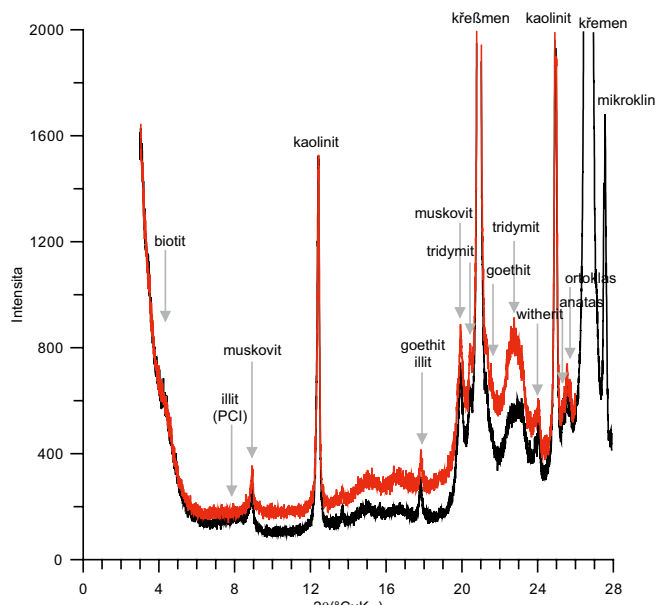
Obr. 5: Distribuce zrnitosti kalcitu (úlomky nad 4 mm bíle, bioklasty šedě) ve vzorku opuky S1622/1 na základě petrografické analýzy obrazu snímku distribuce vápníku, získaného elektronovou mikroskopií. Celkem bylo analyzováno 1968 objektů mikritických částic a 123 objektů bioklastů.

ní porosimetrická data lze rovněž účelně využít jako jeden z diagnostických znaků při určování zdrojové oblasti opuk. Tento přístup vychází z prokazatelné stability vybraných porosimetrických charakteristik při zvětrávacím procesu i z významné homogenity těchto dat v jednotlivých polohách či těžebních oblastech.

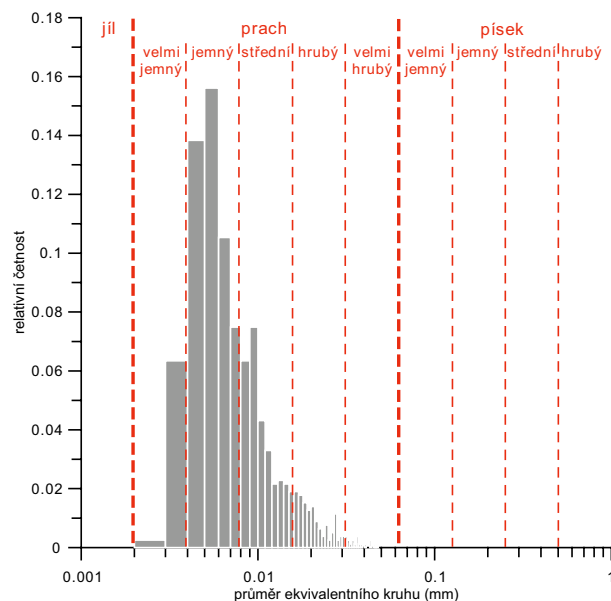
Pro zmíněné účely nestačí jednoduché numerické vyjádření pórovitosti jakožto procentuálního podílu v jednotkovém objemu, ale je zapotřebí kvantitativního stanovení porosimetrických charakteristik. K tomu se zpravidla využívá rtuťové porosimetrie, při níž je do hierarchicky uspořádaného pórového prostředí opuky vtlačena nesmáčivá látka – rtuť. Na základě idealizované geometrie pórů lze získaná data matematicky zpracovat a vyjádřit například četnostní rozložení zastoupení pórů (resp. pórových hrdel) určité velikosti. Uvedené měření je vhodné zejména při porovnání různých vzorků téhož materiálu, což byl i případ studované opuky z náhrobku Arnošta z Pardubic, jejíž porosimetrické charakteristiky byly porovnány s obdobnými daty získanými měřeními vzorků z historických lomů, které lze považovat za možné zdrojové lokality dané opuky.

Pórovitost studované opuky náhrobku Arnošta z Pardubic je značně vysoká a pohybuje se od 22 obj. % do 31 obj. % (tab. 4). Rozptýl hodnot pórovitosti dvou studovaných vzorků ukazuje na heterogenitu materiálu, která bude spojená spíše se zvětrávacími (degradačními) procesy než s přirozenou proměnlivostí materiálu. Tomu by odpovídal změněný podíl zejména hrubých pórů a mezopórů²⁴⁾ v porovnání s nezvětralou opukou z předpokládané

24) Rozlišení tzv. mezopórů, makropórů a hrubých pórů odpovídá terminologii IUPAC (IUPAC, Manual of symbols and terminology for physicochemical quantities and units — appendix II. Definitions, terminology and symbols in colloid and surface chemistry. Part II: heterogeneous catalysis, Pure and Applied Chemistry 46, č. 1, 1976, s. 71–90). Praktický význam tohoto rozlišení tkví mimo jiné v tom, že jednotlivé velikostní kategorie pórů vykazují rozdílné mechanismy zadržení vody, čímž přispívají k jiným mechanismům porušení při zvětrávacích procesech (k tomu aspektu blíže R. Příkrýl, Durability



Obr. 6: Difraktogram dokumentující fázové složení nerozpustného zbytku vzorku S1622/1. Ze zjištěných měření je patrná přítomnost málo strukturně uspořádaných forem křemité hmoty a klastického křemene, K-živce (ortoklas i mikroklín), kaolinitu, muskovitu (případně dobře krystalický illit). Nelze vyloučit přítomnost ojedinělých zrn hůře strukturně uspořádaného illitu (PCI). Dále bylo možné identifikovat fáze příslušející oxidům resp. oxidohydroxidům železa (goethit) a oxidům titanu (anatas). V RTG difrakčním záznamu je též prokazatelně přítomen witherit (BaCO_3).



Obr. 7: Distribuce zrnitosti křemenných klastů ve vzorku opuky S1622/1 na základě petrografické analýzy obrazu mikroskopického snímku, získaného elektronovou mikroskopií. Celkem bylo analyzováno 803 klastů.

zdrojové vrstvy. U obou studovaných vzorků z artefaktu lze více než polovinu až dvě třetiny pórů (56–63 % podíl všech pórů) řadit k tzv. makropórům, 23–24 % k hrubým pórům a 14–20 % k mezopórům.

Pozorovaný pórový prostor studované opuky pak lze interpretovat jako hierarchicky uspořádaný pórový systém nedílně spjatý s vnitřní stavbou horniny a jejími stavebními součástmi, jehož konečnou podobu ovlivnil genetický a postgenetický vývoj horniny. Póry s největší velikostí (30–70 μm) odpovídají mikroskopicky pozorova-

assessment of natural stone, Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 46, č. 4, 2013, s. 377–390).

označení vzorku	V_{mmh} [mm ³ /g]	S_{mmh} [m ² /g]	r [nm]	$\phi_{e,Hg}$ [obj. %]	mezopóry		makropóry		hrubé póry	
					[mm ³ /g]	[%]	[mm ³ /g]	[%]	[mm ³ /g]	[%]
S1622/1	94	5,9	55	23	13	14	59	63	22	23
S1622/3	145	7,7	61	31	29	20	81	56	35	24

Tab. 4. Přehled základních texturních parametrů pórového prostoru dvou vzorků opuky z figurálního náhrobku Arnošta z Pardubic, odvozených z měření pomocí vysokotlaké rtuťové porosimetrie.²⁵⁾ Vysvětlivky zkratk: V_{mmh} = objem mezo-, makropórů a hrubých pórů, S_{mmh} = specifický povrch mezo-, makropórů a hrubých pórů, r = poloměr pórů (střední hodnota), $\phi_{e,Hg}$ = otevřená (efektivní) pórovitost stanovená vtlačáním rtuti. Uvedené hodnoty reprezentují aritmetický průměr vždy dvou měření pro každý zkoumaný vzorek.

Vzorek	Obsah uhlíčitanové složky [hm. %]	
	Rozsah hodnot	Průměrná hodnota
Pražská oblast (zlatá opuka z Přední Kopaniny)	24,0–41,4	33,4
Pražská oblast (opuka ze strahovských lomů)	10,0–43,5	25,7
Lounská oblast (břvanská opuka)	8,5–51,6	25,5
Náhrobek Arnošta z Pardubic	26,9–33,3	30,1

Tab. 5. Porovnání obsahu uhlíčitanové složky v opukách z historických těžebních oblastí²⁶⁾ diskutovaných v textu a v opuce náhrobku Arnošta z Pardubic.

telním pórům v komůrkách bioklastů, případně otiskovým pórům po rozpuštěných bioklastech či minerálních zrnech. Nejvíce zastoupené póry (50–300 nm) jsou odrazem pórovitého charakteru základní hmoty horniny, tvořené mikrokrytalickou křemitou hmotou, karbonátovým mikritem a jílovými minerály. Tento nejvíce zastoupený pórový prostor přechází relativně plynule do nejdrobnějších identifikovaných pórů s charakteristickým průměrem průřezové plochy 20–30 nm, jež souvisejí s intraagregátovou pórovitostí (obr. 2).

Jedním z důvodů kvantitativních měření pomocí rtuťové porosimetrie je možnost využití získaných dat pro určení zdrojové oblasti, resp. horninové vrstvy opuky. Tuto možnost v minulých desetiletích naznačil zejména J. Šrámek (Šrámek 1997; Šrámek a kol. 2000), ale detailněji byl přístup rozpracován až autory tohoto příspěvku, kteří rovněž naměřili sadu referenčních hodnot pro opuky z nejvýznamnějších historických lomů a následně ji aplikovali pro určení zdrojových oblastí opuk krásnoslohových madon a piet (Příkryl a kol. 2017a), mladších opukových artefaktů (Příkryl a kol. 2017 b) nebo pro opuky z románského hradního zdiva (Žák – Příkryl – Weishauptová 2017).

Distribuční porosimetrické křivky obou studovaných vzorků opuky z náhrobku Arnošta z Pardubic byly porovnány s distribučními porosimetrickými křivkami referenčních vzorků tzv. „zlaté opuky“ z lokality Přední Kopanina (archivní data prof. Příkryla) (obr. 8). Z uvedeného srovnání vyplývá jednoznačná shoda uvedených charak-

teristik, jak v průběhu křivek, tak i poloh hlavních a dílčích maxim. Porovnávání křivek se liší v absolutních změřených hodnotách, což ovšem souvisí s přirozenou heterogenitou přírodního kamene. S vysokou mírou pravděpodobnosti lze tedy konstatovat, že opuka figurální části náhrobku Arnošta z Pardubic byla vylomena z vrstvy v bělohorském souvrství české křídové pánve, označované jako tzv. zlatá opuka.

Výsledky porosimetrického studia opuk mají též velký význam pro interpretaci odolnosti studovaných hornin vůči některým zvětrávacím procesům, zejména účinku krystalizačních

tlaků vodorozpuštěných solí, případně též mrznoucí vody. V obou případech se při použití dostupných přepočtů (např. Yu a Oguchi 2010) ukazuje, že obě studované opuky lze klasifikovat jako materiály extrémně náchylné k porušení tlaky, zapříčiněnými krystalizujícími vodorozpuštěnými solemi nebo mrznoucí vodou.²⁷⁾

ODVOZENÍ ZDROJOVÉ OBLASTI STUDOVANÉ OPUKY

Určování zdrojové oblasti přírodního kamene patří k hlavním cílům předrestaurátorských materiálových průzkumů. Má význam nejen pro archeology, historiky umění či pracovníky památkové péče při studiu nálezů, historických artefaktů, stavebních objektů či sochařských děl nebo při řešení otázky autenticity, ale též pro restaurátory v případě hledání vhodného materiálu pro doplňky nebo kopie. Archeometrické badatelské postupy využívají řady postupů, které závisejí nejen na popisných pozorováních při makro- a mikroskopickém studiu vzorků, ale též na výsledcích analytických rozborů. Každý typ materiálu přitom vyžaduje volbu určitých metod studia, které umožní kvantifikovat ty parametry, jimiž se daný typ materiálu může v jednotlivých produkčních oblastech lišit.

V případě opuk se autorům tohoto příspěvku ukázala jako nejúčinnější kombinace (1) mikroskopických metod (zejména elektronové mikroskopie s mikroanalýzou, kompoziční prvkové mapování) pro určení přítomnosti či absence indikativních horninotvorných složek, (2) stanovení množství přítomných horninotvorných složek (buď normativním přepočtem z chemické – silikátové analýzy nebo vyjádřená modálním složením stanoveného pomocí petrografické analýzy obrazu) a (3) porosimetrické analýzy pórového prostředí. Tyto tři soubory metod se vzájemně doplňují; absence některého z nich výrazně snižuje věrohodnost určení zdrojové oblasti.

25) Měření bylo provedeno metodou vysokotlaké rtuťové porosimetrie na sestavě porosimetrů Pascal 140 + 240 fy Thermo Electron – Porotec v rámci společné „Laboratoře sorpční a porosimetrické analýzy“ Ústavu struktury a mechaniky hornin AVČR, v. v. i. a Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze (měřila Alena Janděčková, vyhodnotili Ing. Zuzana Weishauptová, DrSc. a prof. Mgr. Richard Příkryl, Dr.). Pro každý vzorek opuky byla uskutečněna dvě kontrolní měření dílčích vzorků velikosti přibližně 5 mm při teplotě 25 °C. Získaná porosimetrická data byla vyhodnocena pomocí programu MILESTONE 200 firmy Carlo Erba. Bližší podrobnosti k teorii chování nesmáčivých kapalin v kapilárním prostředí viz např. A. W. Adamson – A. P. Gast, Physical Chemistry of Surfaces. New York: John Wiley & Sons 1997 (6th ed.). Závislost mezi použitým tlakem a dopovídajícím poloměrem průnikové průřezové plochy pórů odvozuje Washburnova rovnice (E. W. Washburn, The dynamics of capillary flow, Physical Review 17, č. 3, 1921, s. 273–283).

26) Data převzata z R. Příkryl – Z. Weishauptová – M. Racek – J. Příkrylová, o. c. v pozn. 14.

27) Citlivost pórovitého přírodního kamene k porušení různými typy zvětrávacích procesů se obecně zvyšuje s rostoucím podílem pórů submikronových rozměrů, často označovaných jako kapilární póry.

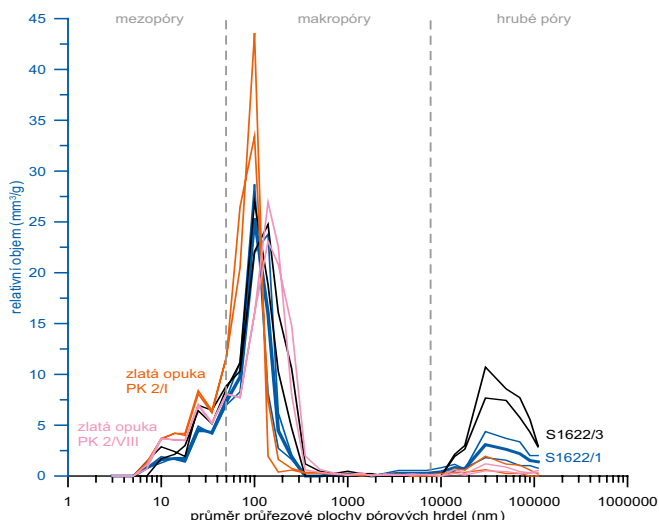
Při pohledu na zastoupení hlavních horninotvorných složek je patrný překryv hodnot ve složení studované opuky s hlavními historickými lomařskými oblastmi na opuku v Čechách. Opuka náhrobku Arnošta z Pardubic je svým složením celkově blízká opukám z širší pražské produkční oblasti, konkrétně opuce z nejkvalitnější vrstvy, označované jako „zlatá opuka“ (Frič 1879; Krejčí 1870; Zahálka 1926; Schütznerová-Havelková 1979; 1981). Kvůli absenci vhodného srovnávacího materiálu ze zaniklých strahovských lomů bylo využito dat získaných z obdobné vrstvy v donedávna činném lomu v Přední Kopanině. Zde je třeba upozornit na fakt, že studovaná opuka náhrobku Arnošta z Pardubic se obsahem uhličitánové složky (tab. 5) sice nevymyká ani opukám z lounské oblasti, ale od nich se výrazně odlišuje porozimetrickými charakteristikami i absencí dolomitu, který je zde indikativní minoritní součástí. Lounskou oblast lze proto s jistotou vyloučit.

Podle porozimetrických měření (konkrétně relativní četnost zastoupení pórových hrdel) lze pro vzorek opuky z náhrobku Arnošta z Pardubic pozorovat nejvyšší shodu s opukou z vrstvy označované jako „zlatá“ (obr. 8), shoda s porozimetrickými charakteristikami opuk z odlišných vrstev ze strahovských lomů je výrazně nižší. Velmi odlišná je též distribuce průměrů pórových hrdel u opuk lounské oblasti.

SHRNUTÍ

Předložená studie se soustředila na petrografický a analytický výzkum vzorků opuky z významného předkrásnoslohového sochařského díla – figurální části náhrobku prvního katolického arcibiskupa a metropolitů českého Arnošta z Pardubic, umístěného ve farním kostele Nanebevzetí Nejsvětější Panny Marie v Kladsku (hrabství Kladsko). Studovaný materiál je nade vše pochybnost opukou bělohorského souvrství z pražské oblasti české křídové pánve. Výsledky získané souborem exaktních metod, zahrnujících optickou mikroskopii, skenovací elektronovou mikroskopii s mikroanalýzou, práškovou RTG difrakci a porozimetrickou analýzu pórového prostoru rtuťovou porozimetrií, prokázaly, že pro zmiňovaný náhrobek byla použita bělohorská opuka z vrstvy tradičně označované jako „zlatá opuka“. Předpokládaným místem výlomu byly s největší pravděpodobností strahovské lomy, které v té době poskytovaly kvalitní stavební i sochařský kámen. Ostatní zdrojové oblasti opuk české křídové pánve lze vyloučit.

Přes panující nejistotu ohledně přesného vymezení doby zhotovení náhrobku zůstává nepochybné, že toto dílo druhé poloviny 14. století (avšak předkrásnoslohové) je materiálově spjata s centrem zemí Koruny české – Prahou, jejími středověkými opukovými lomy (v oblasti Strahova až Bílé Hory) a s největší pravděpodobností i parlářovskou hutí, čemuž by odpovídalo postavení Arnošta z Pardubic. Výsledky petrografického rozboru jeho náhrobku tak prokazují kontinuitu v používání jednoho z nejvýznamnějších typů přírodního kamene tehdejší střední Evropy pro vrcholné figurální sochařství. Na zkušenosti v jejich opracování a užívání založených v předcházejících dobách poté navázaly sochařské dílny spojené s krásným slohem v závěrečných dekádách 14. století.



Obr. 8: Relativní četnost objemového zastoupení pórů, resp. pórových hrdel ve vzorcích opuk z figurální části náhrobku Arnošta z Pardubic (vzorky S1622/1 a S1622/3) a jejich porovnání s referenčními materiály „zlaté“ opuky z lomu v Přední Kopanině – Praha 6 (vzorky PK 2/I a PK 2/VIII). Zobrazená data představují dvě nezávislá měření (díleč vzorky a, resp. b). Na základě zjištěných porozimetrických charakteristik lze opuku náhrobku Arnošta z Pardubic interpretovat jako materiál vysoce náchylný k jedno- až vícevrstvé adsorpci vody doprovázené kapilární kondenzací.

Tento příspěvek vznikl s finanční podporou projektu **DF13P01OVV008 programu NAKI**, poskytovatel Ministerstvo kultury ČR.

Autoři jsou velmi zavázáni vlastníkům studované památky i restaurátorům za poskytnutí studijního materiálu i za souhlas s publikováním dosažených výsledků.

prof. Mgr. Richard Příkryl, Dr. – Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ústav geochemie, mineralogie a nerostných zdrojů

Mgr. Martin Racek, PhD. – Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, Ústav petrologie a strukturní geologie

Ing. Zuzana Weishauptová, DrSc. – Ústav struktury a mechaniky hornin AVČR, v. v. i.

Ing. Jiřina Příkrylová – Akademie výtvarných umění v Praze, Ateliér restaurování sochařských výtvarných děl, laboratoř

POUŽITÁ LITERATURA

- Frič, F. 1879: Studie v oboru křídového útvaru v Čechách. Paleontologické prozkoumání jednotlivých vrstev. II. Bělohorské a Malnické vrstvy. Archiv pro přírodovědecké prozkoumání Čech, IV. díl. Praha.
- Konta, J. 1993: Stone of a Gothic Pieta discovered in Bern: Comparison with Cretaceous marly chert from Prague, Applied Clay Science 7/5, s. 357–366.
- Krejčí, J. 1870: Studie v oboru křídového útvaru v Čechách I. Všeobecné a horopisné poměry, jakož i rozčlenění křídového útvaru v Čechách. Praha: Komitét pro výzkum Čech, s. 37–161.
- Příkryl, R. 2007: Understanding the earth scientist's role in the pre-restoration research of monuments: an overview, in: R. Příkryl – B. J. Smith ed., Building Stone Decay: From Diagnosis to Conservation. Geological Society London, Special Publications 271, s. 9–21.
- Příkryl, R. – Štátná, A. – Příkrylová, J. – Zamrazilová, A. – Weishauptová, Z. 2014: Materiálový rozbor přírodního kamene – opuky – exaktními laboratorními metodami jako nástroj ke stanovení zdrojové oblasti. Certifikovaná metodika č. 33, v rámci řešení projektu NAKI č. DF-13P01OVV008 vedeného pod názvem „Přírodní kámen v sochařství a architektuře zemí koruny České – komplexní znalostní systém“

- o zdrojích, vlastnostech, využití, trvanlivosti, historie využití, kompatibilitě a vzájemné zaměnitelnosti". Praha: AVU.
- Příkryl, R. a kol. 2017a: Opuka Piet krásného slohu: srovnávací petrografický rozbor Piety ze sbírky olomouckého kanovníka Petra Křiváka a Piety z Jihlavy, in: J. O. Hrbáčová ed., Piety krásného slohu. Olomouc: Muzeum umění, s. 82–93.
- Příkryl, R. a kol. 2017 b: Decay mechanism of indoor porous opuka stone: a case study from the main altar located in the St. Vitus Cathedral, Prague (Czech Republic), Environmental Earth Sciences 76, s. 290.
- Schütznerová-Havelková, V. 1979: The thousand year old building stone of Romanesque Prague, in: Bulletin of the International Association of Engineering Geology 19, s. 374–380.
- Schütznerová-Havelková, V. 1981: Použití opuky ve středověké architektuře v Praze, in: Sborník geologických věd, HIG 15, s. 65–82.
- Šrámek, J. 1997: Ještě jednou k pražským opukám, jejich identifikaci a možnosti zjištění jejich provenience, Zprávy památkové péče 57, č. 1, s. 24–28.
- Šrámek, J. 1998: Stone of Gothic Pieta from Toruň, in: P. Sulovský ed., 15th Conference on Clay Mineralogy and Petrology, Brno (Czech Republic), September 6–10, 1998. Scripta Fac. Sci. Nat. Univ. Masaryk. Brun. 26, s. 32–33.
- Šrámek, J. 2004: Kámen gotické piety z Magdeburku, Zprávy o geologických výzkumech 2003, s. 162–163.
- Šrámek, J. – Rathouský, J. – Schneider, P. 1992: Porozita opuk, Věstník Českého geologického ústavu 67, č. 4, s. 259–276.
- Šrámek, J. – Kotlík, P. – Kaše, J. 2000: Opuka. Praha: STOP.
- Yu, S. – Oguchi, C.T. 2010: Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones, Engineering Geology 115/3–4, s. 226–236.
- Zahálka, B. 1926: Pražská opuka, Zprávy veřejné služby technické 8/18, s. 564–569.
- Žák, K. – Příkryl, R. – Weishauptová, Z. 2017: Posouzení původu neobvyklých hornin ve zdivu hradu Týřova, Průzkumy památek XXIV, č. 1, s. 153–159.

DIE PETROGRAPHISCHE UNTERSUCHUNG DES PLÄNERTEILS VOM GRABMAL ERNST V. PARDUBITZ MIT RÜCKSICHT ZUR BESTIMMUNG DER QUELLENREGION DES NATURSTEINS

Die vorliegende Studie konzentrierte sich auf die petrographische und analytische Untersuchung der Proben vom Pläner eines der bedeutenden Bildwerke der Periode vor dem „schönen Stil“ – dem figürlichen Teil des Grabmals des ersten Erzbischofs von Prag und Metropolit von Böhmen Ernst v. Pardubitz, das sich in der Pfarrkirche der Himmelfahrt Mariä in Klodzko (Glatz, Polen, Wojwodschaft Niederschlesien) befindet. Das studierte Material stellt ohne jeden Zweifel den Pläner des Schichtenkomplexes vom Weißen Berg aus der Prager Region des böhmischen Kreidebeckens dar. Die durch exakte Methoden (optische Mikroskopie, scannende Elektronenmikroskopie mit Mikroanalyse, Pulver-Röntgen-Diffraktion und porosimetrische Analyse des Porenraums mit Quecksilber-Pososimetrie) erworbenen Forschungsergebnisse bewiesen die Verwendung des traditionell als „goldenen“ bezeichneten Pläners vom Weißen Berg. Man setzt voraus, dass der Stein höchstwahrscheinlich in den Strahover Brüchen gebrochen wurde, die in jener Zeit den qualitativsten Bau- und Bildstein boten. Andere Pläner-Quellenregionen des böhmischen Kreidebeckens lassen sich ausschließen.

Trotz der herrschenden Unsicherheit seitens der genauen Herstellungszeitbestimmung des Grabmals bleibt es ohne Zweifel, dass dieses Werk der 2. Hälfte des 14. Jahrhunderts (aber vor der Periode des „schönen Stils“) durch sein Material mit Prag als Zentrum der böhmischen Kronländer, seinen mittelalterlichen Plänerbrüchen (von der Umgebung von Strahov bis zum Weißen Berg) und höchstwahrscheinlich der Parlerhütte, der Stellung Ernsts v. Pardubitz entsprechend, verbunden ist. Die Ergebnisse der petrographischen Analyse seines Grabmals beweisen somit die Kontinuität der Verwendung eines der bedeutendsten Natursteintypen damaligen Mitteleuropas für die Höchstleistungen der figürlichen Bildhauerkunst. An die Erfahrungen mit ihrer Bearbeitung und Verwendung aus den vorherigen Zeiten knüpften danach die mit dem „schönen Stil“ verbundenen Bildwerkstätten in den letzten Jahrzehnten des 14. Jahrhunderts an.

Abb. 1: Klodzko (Glatz, Polen, Wojwodschaft Niederschlesien), Maria Himmelfahrtkirche, figürlicher Teil des Grabmals Ernst v. Pardubitz: a – Ansicht des Unterteils des figürlichen Grabmals mit schrägen Risslinien und abgebrochener Oberflächenmodellierung; b – Detailansicht des Natursteins in der jüngsten Oberflächenmodellierungsabbruchstelle; c – Aussehen des Natursteins, eines der Bruchstücke im Naturzustand (deutliche laminare Lagerung); d – Spuren nach dem Steinmetzwerkzeug (kleiner flacher Meißel), die das Steinbearbeiten im frischen Zustand dokumentieren (Foto R. Příkryl).

Abb. 2: Mikroaufnahme der Pläner vom figürlichen Teil des Grabmals Ernst v. Pardubitz, dem Studium im Elektronenmikroskop gemäß (alle Aufnahmen in zurückgestrahlten Elektronen). Erläuterungen: a, b – Gesamtansicht der Mikrostruktur mit der zum Teil unregelmäßigen Distribution der Kalzit-Komponente (hellgraue Körner); c–e – Mikrostrukturdetails mit der vorhandenen Karbonatmasse (Cal), Bioklasten und dem klastischen Quarz (Qtz), bzw. Fe-Oxihydroxiden (FOH) und Muskovit (Ms); g–h – häufige Kaolinit (Kln), bzw. Glaukonit-Aggregate (Gln); i – Detail vom K-Feldspat

(Kfs); j – Detail des z. T. kaolinisierten (Kln) Muskovitblättchens (Ms); k – Quarz (Qtz) und akzessorische Zirkon-Klaste (Zrn); l – häufige Imprägnierungen der porösen Grundmasse mit Fe-Oxihydroxiden (FOH).

Abb. 3: Mappen der Kompositionselemente vom Pläner aus dem figürlichen Teil des Grabmals Ernst v. Pardubitz (Probe S1622/1), durch Flächenanalyse des geglätteten Dünnschliffs im Elektronenmikroskop erworben. Erläuterungen: a – Distribution von Si (rosarote Flächen entsprechen den Quarzklasten; gelbgrüne Fläche der Grundmasse aus struktural schlechter geordneten Formen der Quarzmasse); b – Distribution von Ca (rosarote Flächen entsprechen den vorhandenen Karbonaten – Kalzit); c – Distribution von Al (rosarote Flächen entsprechen dem degradierten Glimmer, bzw. auch dem Kaolinit, grüne Fläche den Klasten der K-Feldspate); d – Distribution von K (rosarote Flächen entsprechen den vorhandenen K-Feldspaten); e – Distribution von Mg; f – Distribution von Fe.

Abb. 4: Ausschnitt eines Teils von Diffraktionsdaten im Winkelbereich 65–70°2theta, zur Bestimmung der Kristallinitätsstufe der vorhandenen quarzhaltigen Masse verwendet, und Vergleich mit den Diffraktionsdaten des gut kristallinen niedrigen Quarzes und des vom Pegmatit (rote Kurve). Aus dem angeführten Vergleich kommt die erheblich niedrigere Kristallinitätsstufe beider studierten Plänerproben (besonders bei der Probe S1622/3 – graue Kurve) heraus, aber auch die Streuung in ihrem Kristallinitätsgrad, die mit dem unterschiedlichen Inhalt von Quarzklasten in beiden Proben zusammenhängt.

Abb. 5: Distribution der Kalzitkörnergröße (Fragmente über 4 µm weiß, Bioklaste grau) in der Probe vom Pläner S1622/1 auf Grund der petrographischen Analyse der durch die Elektronenmikroskopie erworbenen Aufnahme der Distribution vom Kalzium. Man analysierte insgesamt 1968 Objekte der mikritischen Teilchen und 123 Objekte von Bioklasten.

Abb. 6: Das Diffraktogramm, das die Phasenzusammensetzung des unlöslichen Restes der Probe S1622/1 dokumentiert. Aus den analysierten Messungen kommt das deutliche Vorhandensein der schwach struktural geordneten Formen der quarzhaltigen Masse und des klastischen Quarzes, K-Feldspats (Orthoklas sowie Mikroklin), des Kaolinit, Muskovits (bzw. gut kristallinen Illiths) heraus. Nicht auszuschließen ist das Vorhandensein von Einzelkörnern des schlechter struktural geordneten Illiths (PCI). Man konnte weiter die den Eisenoxiden bzw. -oxihydroxiden (Goethit) und den Titanoxiden (Anatas) angehörenden Phasen identifizieren. In der Röntgen-Diffraktionsaufnahme ist auch das Vorhandensein des Witherits (BaCO₃) bewiesen.

Abb. 7: Distribution der Quarzklastkörnergröße in der Plänerprobe 1622/1 auf Grund der petrographischen Analyse der durch die Elektronenmikroskopie erworbenen Aufnahme. Man analysierte insgesamt 803 Klaste.

Abb. 8: Relative Häufigkeit des volumetrischen Vorhandenseins der Pore, bzw. Porenhäse in den Plänerproben vom figürlichen Teil des Grabmals Ernst von Pardubitz (Proben S1622/1 und S1622/3) und ihr Vergleich mit den Referenzmaterialien des „goldenen“ Pläners aus dem Steinbruch in Přední Kopanina-Prag 6 (Proben PK 2/I und PK 2/VIII). Die abgebildeten Daten stellen zwei unabhängige Messungen dar (Teilproben a, bzw. b). Anhand der festgestellten porosimetrischen Charakteristiken lässt sich der Pläner des Grabmals Ernst v. Pardubitz als ein Material mit hoher Neigung zu der von Kapillarkondensation begleiteten ein- bis mehrschichtigen Wasseradsorption deuten.

(Übersetzung J. Noll)