FORUM / 2021 / ROČ. XI / Č. 1

PRO KONZERVÁTORY-RESTAURÁTORY
FORUM FOR CONSERVATORS-RESTORERS

2021 / Vol. XI / No. 1
Peer-reviewed open access journal

Chief editor: Ing. Alena Selucká
Editors: Mgr. Pavla Stöhrová, Mgr. Jana Fricová

Editorial Board:
Ing. Ivo Štěpánek (Head of Editorial Board)
doc. Dr. Ing. Michal Ďurovič
akad. mal. Igor Fogaš
Ing. Pavel Jirásek
Ing. Jan Josef
doc. akad. soch. Petr Kuthan
prof. RNDr. Jiří Příhoda, CSc.
Ing. Radka Šefců
Mgr. Pavla Stöhrová (Secretary)

Open acces since 2019 available for free
on https://mck.technicalmuseum.cz/casopis-fkr/
The journal is indexed and abstracted in EBSCO.

Published by:
Technické muzeum v Brně
Purkyňova 105, 612 00 Brno, Czech Republic

Contact for communication:
fricova@tmbrno.cz / stohrova@tmbrno.cz / selucka@tmbrno.cz

© Technické muzeum v Brně, 2021
ISSN (Online) 2571-4384
ISSN (Print) 1805-0050

TECHNICKÉ MUZEUM V BRNĚ

METODICKÉ CENTRUM KONZERVACE

EXPERIMENTÁLNÍ RENTGENOFLUORESCENČNÍ SKENOVACÍ ANALYZÁTOR V MUZEU HL. M. PRAHY

František Míček[1] • Radek Prokeš • Tomáš Trojek[2] • Daniel Bursák[3]

1 Muzeum hlavního města Prahy – oddělení konzervace sbírek
2 České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
3 Muzeum hlavního města Prahy – oddělení archeologických sbírek

Bc. František Míček je zaměstnanec Muzea hl. m. Prahy na poloviční úvazek, působící v restaurátorských dílnách jako konzervátor kovů a obsluha XRF spektrometru. Současně také student navazujícího magisterského programu Technologie konzervování a restaurování na VŠCHT v Praze.
micek@muzeumprahy.cz

Představení využití rentgenofluorescenčního (XRF) analyzátoru v muzejní praxi, prezentované na příkladu experimentálního XRF analyzátoru Muzea hl. města Prahy (MMP), vyvinutého a realizovaného Fakultou jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze. Projekt experimentálního XRF spektrometru pro MMP uspěl ve výzvě vyhlášené Hlavním městem Prahou dne 13. ledna 2016 v tématu památkové péče, obnovy a ochrany památkově chráněných objektů a byl podporován z operačního programu Praha – pól růstu ČR. Účelem článku bylo pomoci dalším muzejním a obdobným institucím při rozhodování o pořízení XRF spektrometru, prezentování možností dané metody v běžné praxi a diskutování výhod a nevýhod experimentálního řešení jako případné alternativy komerčních přístrojů.
Klíčová slova: Rentgenová fluorescence (XRF), spektrometrie, prvková analýza, mapování, využití v muzejní praxi

EXPERIMENTAL X-RAY FLUORESCENCE ANALYSER AT THE CITY OF PRAGUE MUSEUM

Presentation of the use of X-ray fluorescence (XRF) analyser in museum practice, presented on the example of an experimental XRF analyser of The City of Prague Museum, developed and made by the Faculty of Nuclear Sciences and Physical Engineering of the Czech Technical University in Prague. The project of experimental XRF spectrometer succeeded in the call announced by the City of Prague on 13 January 2016 in the category of monument care, restoration and protection of listed buildings and was supported by the Operational Program Prague – the Growth Pole of the Czech Republic. The purpose of the article was to help other museums and similar institutions in deciding on the acquisition of XRF spectrometers, presenting the possibilities of the method in common practice and discussing the advantages and disadvantages of experimental solutions as possible alternatives to commercial devices.
Keywords: X-ray fluorescence (XRF), spectrometry, elemental analysis, mapping, use in museum practice

Technologický pokrok vědeckého průmyslu v posledních letech vedl k výraznému zvýšení dostupnosti pokročilých analytických přístrojů, jak z důvodů nižší pořizovací ceny, tak nároků na provoz a údržbu. Není tedy již zapotřebí dřívější praxe mnoha muzejních institucí ve využívání vyřazených přístrojů z druhé ruky (například staré nemocniční rentgeny).

Mnohá odborná pracoviště muzeí rozšiřují své vybavení, aby zdokonalili průzkům a dokumentaci sbírkového fondu. V oblasti výzkumu děl hmotného kulturního dědictví získala obzvláště významné využití rentgenová fluorescenční analýza (XRF analýza), která bývá jednou z nejčastějších metod identifikace prvkového složení sbírkových předmětů. Tato metoda je stále zdokonalována, zcela běžně je možné se setkat s ručními přenosnými přístroji schopnými kvalitativně i kvantitativně analyzovat materiál do několika minut [Beckhoff, 2006].

I přes vyšší dostupnost XRF spektrometrů a navyšování financí investovaných do kultury a památkové péče, je pořízení podobného analytického vybavení stále výraznou položkou rozpočtů muzejních příspěvkových organizací. Pořízení přístroje musí tedy předcházet podrobná rozvaha využití a samotné potřebnosti takového vybavení. Z definice muzeí [ICOM, 2010] mají muzea za úkol, krom pouhého uchovávání a péče o předměty, také zajišťovat výzkum pro co nejvyšší přesnost interpretace informací, které tyto předměty nesou. Během zpracovávání akvírovaných předmětů by mělo tedy být dbáno na získání co největšího množství informací, které nám může předmět předat. Rychlá prvková analýza může být použita již během restaurátorského průzkumu k určení vhodného postupu restaurování nebo konzervace či jako podklad pro doložení pravosti. Redukuje nutnost vystavit povrch předmětů více chemikáliím (například analýza důkazovými reakcemi), než je nutné a při zaběhnutém postupu i šetří čas. Samozřejmostí je i vyšší spolehlivost takové informace [Čechák, 2005].

Pořízení XRF spektrometru bylo v dlouhodobém plánu zvyšování vybavenosti oddělení konzervace sbírek Muzea hl. m. Prahy pro možnost dříve externě zadávané analýzy zpracovávat přímo. Pořízení bylo schváleno v rámci dlouhodobé udržitelnosti provozu. Výběr konkrétního přístroje byl komplikován nároky jednotlivých oddělení odborného úseku muzea a také prostorovými možnostmi pracoviště. Přenosný přístroj řešící prostorové omezení nevyhovoval potřebám z hlediska přesnosti analýzy, požadované pro měření archeologických předmětů. Bylo proto přistoupeno ke zcela odlišnému přístupu. V rámci projektu „Koncept Praha“, reg. číslo: CZ.07.1.02/0.0/0.0/16_023/0000113 byl pro Muzeum hl. m. Prahy (MMP), na Fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské (FJFI) Českého vysokého učení technického v Praze (ČVUT), zkonstruován unikátní rentgenofluorescenční (XRF) analyzátor.

Tento projekt uspěl ve výzvě vyhlášené Hlavním městem Prahou dne 13. ledna 2016 v tématu památkové péče, obnovy a ochrany památkově chráněných objektů a byl podporován z Operačního programu Praha – pól růstu ČR. Jedná se o přístroj vyvinutý speciálně pro potřeby muzea s důrazem kladeným na dlouhodobou ekonomickou udržitelnost provozu. Proto bylo zvoleno umístění do rentgenové kabiny, k již provozované rentgenové technice.
Díky poměrně vysokému zájmu kolegů z ostatních muzeí bylo usouzeno, že podobné praktické řešení by mohlo být vhodné i pro mnoho dalších pracovišť. Na základě tohoto zájmu bylo rozhodnuto o shrnutí zkušeností s experimentálním XRF spektrometrem a o předložení kladů a záporů takového řešení k diskuzi. Také byly zahrnuty příklady využití a možností tohoto experimentálního XRF spektrometru, které by mohly pomoci při rozhodování o využitelnosti takového přístroje.

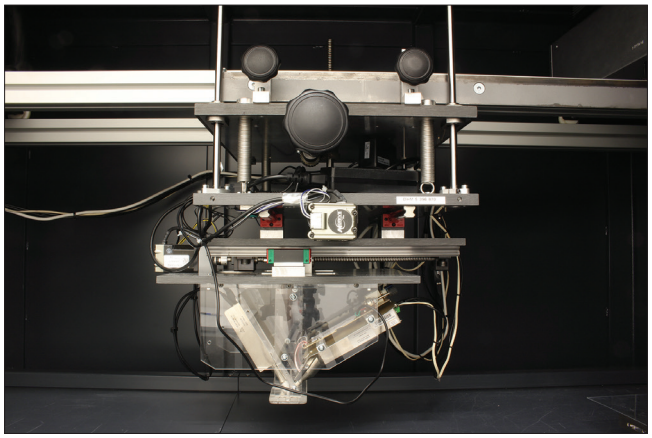
RENTGENOFLUORESCENČNÍ ANALÝZA

Rentgenofluorescenční analýza představuje ve světě dobře zavedenou metodu prvkové analýzy vzorků, která je využívána ve vědě i průmyslu. Obzvláště významné využití získala XRF analýza v oblasti výzkumu děl hmotného kulturního dědictví, zejména díky faktu, že se jedná o zcela nedestruktivní a neinvazivní metodu. Tato vlastnost představuje při zkoumání vzácných archeologických nálezů či uměleckých děl často rozhodující kritérium při výběru analytické metody [Trojek, 2014].
Kromě své nedestruktivní povahy má XRF analýza další výhody. Metoda je velmi rychlá (prvotní informaci o prvkovém složení vzorku dokáže poskytnout během několika vteřin), univerzální (detekuje všechny měřitelné prvky současně a umožňuje měřit zcela odlišné vzorky s použitím stejného přístroje) a reprodukovatelná (díky nedestruktivnosti dovoluje měřit stejný vzorek opakovaně). XRF analýza dále umožňuje nejen kvalitativní (přítomnost prvku), ale také kvantitativní analýzu (koncentrace přítomných prvků) na základě vyhodnocení množství detekovaného charakteristického záření X.
Omezením metody XRF je nemožnost analyzovat lehké prvky, které emitují charakteristické záření X s energií příliš nízkou pro detekci. Prakticky je XRF analýza použitelná pro měření prvků v rozsahu od Al po U. Fyzikální princip XRF analýzy spočívá v buzení a detekci tzv. charakteristického záření X z elektronového obalu atomů vzorku. Měřený vzorek je ozařován primárním zářením X ze zdroje. Fotony primárního záření X dopadají na vzorek a obecně interagují s elektrony v atomech prvků přítomných v tomto vzorku. Žádoucí interakcí pro XRF analýzu je tzv. fotoefekt. Při tomto procesu dochází v důsledku nárazu fotonu k vyražení elektronu z vnitřních slupek elektronového obalu, tedy slupek K nebo L. V důsledku toho vzniká na této energetické hladině prázdné místo (tzv. vakance), které je ihned zaplněno jiným elektronem, který na pozici vyraženého elektronu přeskočí z nějaké vyšší energetické hladiny. Při tomto přeskoku elektronu se uvolňuje energie, jejíž velikost je rovna rozdílu energií obou hladin. Tato energie se vyzáří právě ve formě fotonu charakteristického záření X. Prvkovou analýzu předmětů zkoumaných pomocí metody XRF lze pak provádět na základě faktu, že energii tohoto charakteristického záření X lze jednoznačně přiřadit protonovému číslu prvku, který je emituje.
Při praktickém provedení XRF analýzy tedy ozařujeme měřený vzorek primárním zářením X a měříme charakteristické záření X, které ze vzorku vychází. Zařízení pro XRF analýzu tudíž vždy sestává z následujících dvou hlavních součástí: zdroje primárního záření X (nejčastěji rentgenové trubice s maximálním urychlovacím napětím do 50 kV) a detektoru charakteristického záření X (obvykle spektrometrický polovodičový detektor). Další součásti přístroje a jeho celkové uspořádání potom závisí na konkrétním konstrukčním řešení a primárním účelu použití zařízení. Základní způsob provedení XRF analýzy představuje bodové (1D) měření, kdy je analyzován vybraný bod na povrchu předmětu. Kromě toho lze také provádět tzv. plošné (2D) prvkové mapování, při kterém je vybraná oblast povrchu vzorku automaticky skenována s malým krokem postupně v obou osách a výsledkem je pak plošná mapa prvkové distribuce měřené oblasti vzorku. Pro účely XRF analýzy s vysokým prostorovým rozlišením je nutno použít úzký svazek primárního záření X. Toho lze dosáhnout buď použitím otvorového kolimátoru s velikostí otvoru řádově desetin až jednotek mm, případně lze svazek primárního záření X fokusovat do velmi malého ohniskového bodu tzv. polykapilární optikou, čímž lze dosáhnout velikosti svazku v ohnisku pouhých desítek µm (tzv. µ-XRF analýza).

RENTGENOFLUORESCENČNÍ SKENOVACÍ ANALYZÁTOR V MUZEU HL. M. PRAHY

Rentgenofluorescenční analyzátor je nyní umístěn v RTG laboratoři Muzea hl. m. Prahy ve Stodůlkách a je zde využíván pro nedestruktivní prvkové analýzy sbírkových předmětů. Pro účely zajištění ochrany duševního vlastnictví byl tento přístroj dne 26. 11. 2018 Úřadem průmyslového vlastnictví zapsán pod názvem „Rentgen fluorescenční skenovací analyzátor", jako užitný vzor (č. dokumentu 32 376). Díky umístění spektrometru do již používané rentgenové kabiny nebylo zapotřebí nové povolení Státního úřadu pro jadernou bezpečnost (SÚJB) k umístění zdroje ionizujícího záření a pro obsluhu není zapotřebí akreditace radiačního pracovníka. Zkonstruovaný přístroj lze klasifikovat jako laboratorní XRF zařízení, které umožňuje bodové měření i automatizované plošné prvkové mapování analyzovaných vzorků.
Při umístění v kabině je spektrometr klasifikován jako tzv. drobný zdroj ionizujícího záření, na který se vztahuje pouze ohlašovací povinnost na SÚJB [Česko, 2002].
Přístroj sestává ze dvou základních komponent:
a) měřicí hlavice (Obr. 1),
b) motorizované plošiny pro automatické 2D skenování (Obr. 2).

Obr. 1 Detail měřicí hlavice / Detail of the measuring head



Obr. 2 Celkový pohled na zařízení a jeho umístění v RTG komoře / General view of the device and its placement in the X-ray chamber

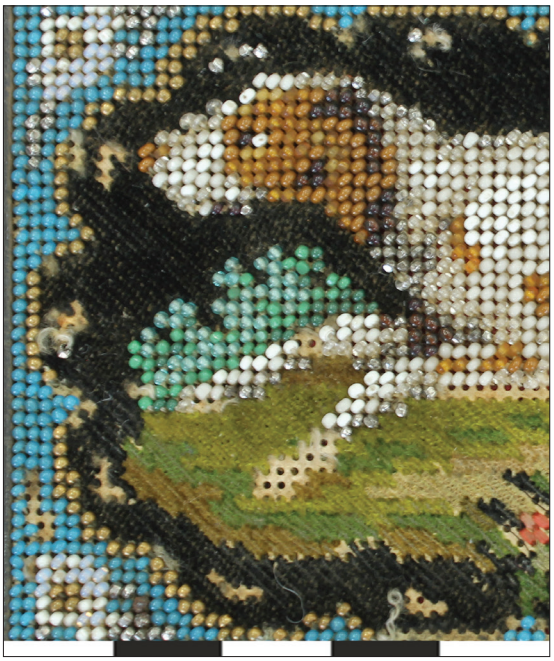
Měřicí hlavice obsahuje zdroj primárního záření X, kterým je rentgenová trubice s malým výkonem (typ Mini-X X-Ray Tube) od firmy Amptek, Inc. Tato rentgenka s Rh transmisní anodou má maximální výkon 4 W a napětí 50 kV. Generovaný svazek primárního záření X prochází přes 127 µm tenké Be okénko a na výstupu z rentgenky je kolimován 1 mm kolimátorem. Detekci charakteristického záření X zajišťuje polovodičový (křemíkový) detektor typu SDD. Jedná se o detektor typu X-123 SDD taktéž od výrobce Amptek, Inc. Detektor má aktivní plochu 25 mm^2, tloušťku 0,5 mm a jeho využití pro XRF analýzu je výhodné zejména díky jeho výborné hodnotě energetického rozlišení (až 125 eV FWHM pro energii 5,9 keV) a schopnosti pracovat při vysokých četnostech detekovaných impulsů. Rentgenová trubice a detektor jsou uchyceny v plastovém držáku, který zajišťuje nastavení vhodné geometrie při měření (zvolené konstrukční řešení umožňuje například měnit úhel náklonu detektoru vůči tečné rovině vzorku).
Druhou základní součástí tohoto XRF zařízení je motorizovaná plošina, na které je připevněna měřicí hlavice, a která zajišťuje její pohyb vzhledem k analyzovanému vzorku. Díky motorizované plošině lze přístroj kromě bodové XRF analýzy využít pro automatické plošné mapování prvkového složení zkoumaného předmětu. XRF skenovací analyzátor je pro tento účel vybaven softwarem, který prostřednictvím ovládání přes PC zajišťuje jak postupný automatický posun plošiny při 2D skenování, tak i nabírání a ukládání spekter naměřených v každém kroku posunu. Plošina je pohyblivá v obou osách s minimálním reprodukovatelným krokem posunu 5 µm – takto nízká hodnota však vzhledem k podstatně větší velikosti svazku primárního záření X nebývá využívána. Velikost kroku posunu při 2D prvkovém mapování závisí na velikosti analyzované oblasti a požadovaném rozlišení výsledné prvkové mapy – nejčastěji bývá volen krok posunu plošiny v rozmezí od 0,25 mm (vizuální mapa rozložení prvků) do 2 mm (důkaz nehomogenity analyzovaného předmětu). Níže jsou uvedeny celkové rozměry a váha zkonstruovaného XRF skenovacího analyzátoru:

- výška: 60 cm,
- šířka (včetně dosahu pojezdu motorizované plošiny): 60 cm,
- hloubka (včetně dosahu pojezdu motorizované plošiny): 50 cm,
- celková váha: 25 kg.

Naměřená data jsou vyhodnocována několika analytickými softwary, dle konkrétní analýzy. K rychlému vizuálním zhodnocení měřeného spektra je používán sharewarový program od firmy Amptek, DppMCA Display & Acquisition Software, který je nutné kombinovat s programem pro ovládání rentgenky Mini-X2 Control v1.0.0.10.[3] Spolu s detektorem bylo dodáno i licenční CD a hardwarový klíč k pokročilejšímu programu XRS-FP2 CrossRoads Scientific.[4] Tento program umožňuje po náročnějším počátečním nastavení téměř automatické vyhodnocování naměřených spekter pro získání jak kvalitativních, tak kvantitativních výsledků. Tento program je používán nejčastěji, jelikož po prvotním nastavení umožňuje velmi rychlou analýz u typově shodných předmětů (stejné kvalitativní prvkové složení). Pro 2D prvkové mapování je zapotřebí kombinovat softwarový ovladač posuvu plošiny od ČVUT, s ovladačem rentgenky. Odběr spekter tvořících výslednou mapu po nastavení probíhá zcela samostatně. Pro zasazení spekter do mapy je používán sharewarový program PyMCA 5.5.4, který byl vyvinut přímo pro potřeby muzeí a galerií.[5] Kombinace vícero různých analytických programů klade vyšší nároky na odbornost a proškolení obsluhy. XRF skenovací analyzátor je umístěn v RTG laboratoři v odstíněné kabině spolu s radiografickým rentgenovým zařízením od firmy Testima. Rozměry kabiny a způsob instalace omezuje maximální rozměry analyzovaných předmětů na 80 x 50 x 20 cm (š, h, v). Oba přístroje jsou vedle sebe zavěšeny na kolejnicích, které dovolují jejich vzájemný posun, což umožňuje provádět kombinovanou XRF a radiografickou analýzu zkoumaných předmětů.

VYUŽITÍ PŘÍSTROJE A MODELOVÁ MĚŘENÍ

Při výběru přístroje byly kladeny podmínky na co nejvyšší přesnost (archeologické předměty), prostorovou nenáročnost a co nejvyšší variabilitu. Během zkušebního provozu bylo provedeno přes 170 srovnávacích analýz již analyzovaných předmětů ze sbírkového fondu, pro zdokonalení aplikované metodiky a ověření měřených dat. Za čtvrt roku po uvedení do provozu bylo provedeno více než 100 analýz archeologických předmětů. Dále několik desítek identifikací materiálu předmětů zpracovávaných restaurátory. Analýzy již byly využity i pro ověřování pravosti/ryzosti akvírovaných předmětů. V současné době se snažíme o zdokonalení v identifikaci pigmentů a rozšíření tak aplikace analýz i na předměty z oblasti malby. Podkladem pro zkušební měření byla Specializovaná databáze pigmentů a barviv Národní galerie v Praze [Šefců, 2017].
Většina měření je prováděna na základě požadavků pracovníků oddělení archeologických sbírek. Získaná data jsou dále zpracovávána do odborných publikací v rámci jejich výzkumů. Slouží ke zpřesnění datace a původu předmětů. V plošných měřeních vytipovaných předmětů, byla například identifikována mosaz ve sponě z 50.–30. let 1. století př. n. l., která se tak nyní řadí mezi nejstarší mosazné předměty na území střední Evropy a ukazuje na nečekaně rychlé rozšíření tohoto progresivního mediteránního kovu do zaalpské Evropy[3] [Bursák, 2020; Craddock, 1998; Istenič, 2007].
Funkce 2D mapování byla využita pro zkoumání problematiky nehomogenit archeologických předmětů. V případě vysokých rozdílů v naměřených hodnotách bodových analýz (> 10 %) je provedeno mapování povrchu předmětu pro stanovení rozložení prvků v předmětu, aby bylo možné vyloučit chybné měření (například vměstku), případně určit bod vhodný pro dodatečnou analýzu.
Je zřejmé, že přístroj našel v odborné praxi MMP široké a četné uplatnění. K potřebám tohoto článku bylo provedeno dvojí mapování předmětů ze sbírkového fondu muzea pro vytvoření vhodné ukázky výstupních dat a zároveň přiblížení problematiky jejich interpretace. Pro vyšší srozumitelnost byly záměrně zvoleny předměty nearcheologické. Pro ukázku mapování plochého povrchu bylo použito pouzdro na doutníky zdobené korálkovou výšivkou (Obr. 3).



Obr. 3 Detail mapované části korálkové výšivky 5 × 6 cm / Detail of the surveyed area of a bead embroidery 5 × 6 cm

Na mapování reliéfního povrchu byl použit pohřební štít cechu kožešníků, hojně vyšívaný zlatými a stříbrnými dracouny (Obr. 4).

Obr. 4 *Detail mapované oblasti pohřebního štítu 8 × 8 cm / Detail of the surveyed area of a funeral shield 8 × 8 cm*

Při měření bylo postupováno jako u běžné analýzy. Nejprve byly bodově analyzovány jednotlivé odlišné součásti předmětů (Tab. 1 a 2). Jedná se vždy o průměr dvou a více analýz daného materiálu (čím menší přesnost výsledků, tím vyšší byl počet provedených měření).

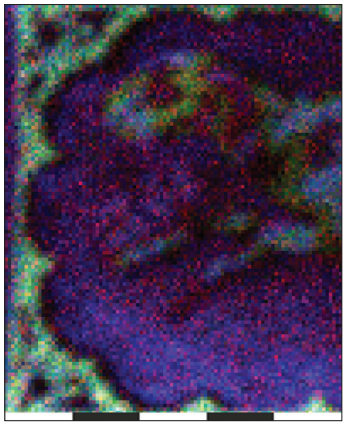
Tab. 1 *Prvkové složení korálků výšivky v hm. % stanovené na základě bodové analýzy / Elemental composition of beads in the embroidery in weight %v based on point analysis*

Korálky	Si	K	Ca	Fe	Cu	Zn	Sb	Pb	Mn	Ag	As
Bílé	16	10	6	4	< 1		4	59			
Černé	12	2	3	3			4	73	3		
Hnědé	16	7	6	4	< 1		8	54	1		3
Modré	22	11	9	2	5		18	33			
Zelené		2	4	55	1	3	< 1	33		< 1	
Zlaté		< 1	< 1		63	33		2			
Stříbrné	< 1	< 1	2	94		< 1		2	< 1		

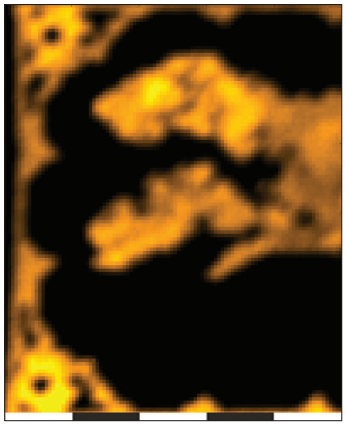
Tab. 2 *Prvkové složení dracounů v hm. % stanovené na základě bodové analýzy / Elemental composition of Leon threads in weight % based on point analysis*

Dracoun	Ag	Au	Cu	Sn	Fe
Snítka	95	1	2	2	
Výplň akantu	92	1	3	3	
Ptačí břicho	94		4	2	
Řetěz kolem ptačího krku	95	3	< 1	2	
Koruna na erbu	91	< 1	2	4	2

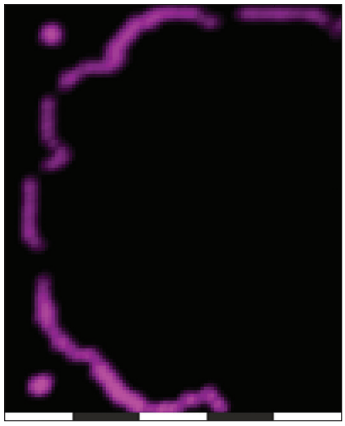
Tyto bodové analýzy jsou nezbytné pro následnou správnou interpretaci prvkových map. Spektra map byla snímána s délkou kroku 0,5 mm, dobou nabírání spektra 5 sekund, s napětím na rentgence 40 keV a proudu 20 µA. Výsledné mapy byly vytvořeny v programu PyMCA, funkcí Batch Fitting. Do map byly zahrnuty prvky identifikované v předchozích dílčích analýzách.
Interpretace výsledného mapování je snazší u ploché korálkové výšivky (Obr. 5–13)



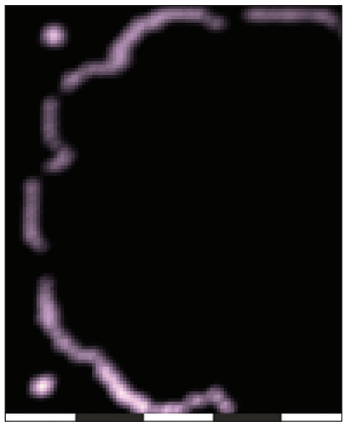
Obr. 5 *Sdružená mapa rozložení Si (červená), K (zelená) a Ca (modrá) / Summarised map of distribution Si (red), K (green) and Ca (blue)*



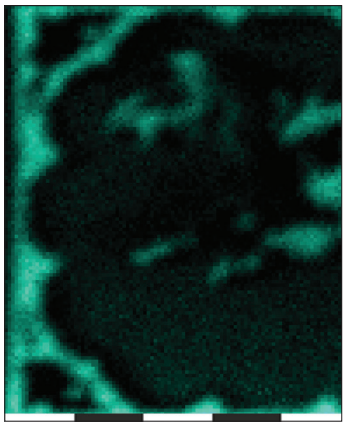
Obr. 6 *Pb*



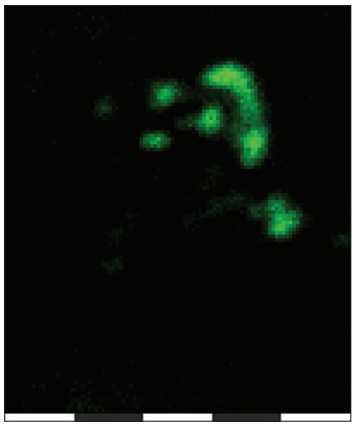
Obr. 7 *Cu*



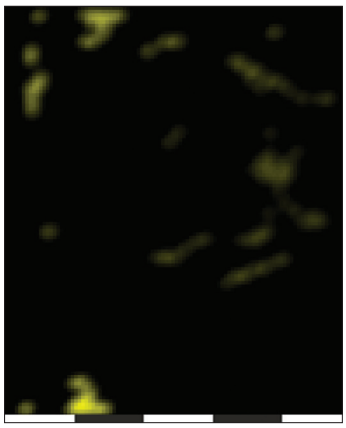
Obr. 8 *Zn*



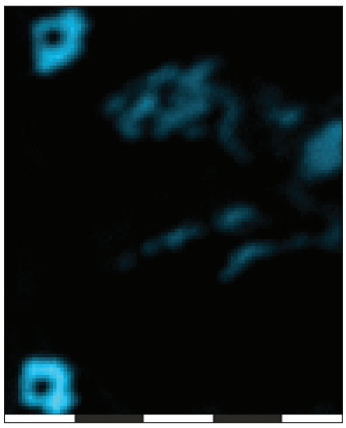
Obr. 9 *Sb*



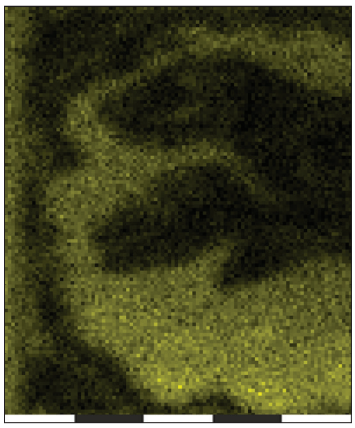
Obr. 10 *Mn*



Obr. 11 *Fe*

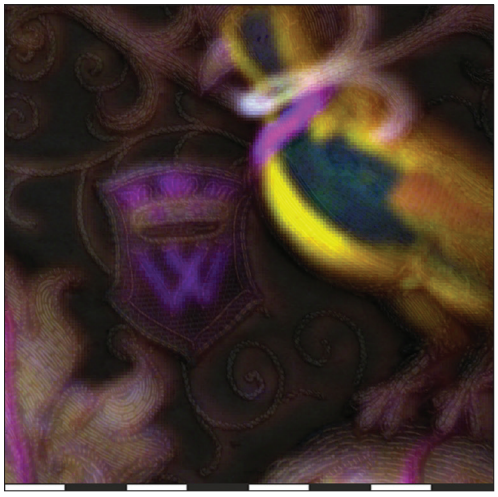


Obr. 12 *As*

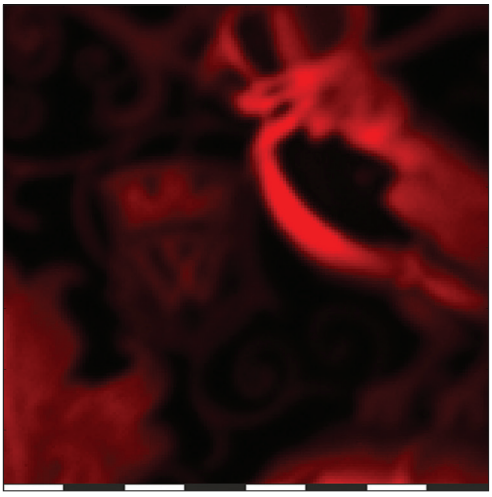


Obr. 13 *Ag*

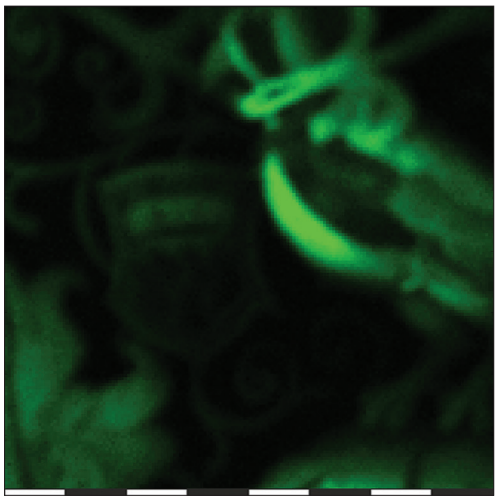
Barvy jsou přiřazeny prvkům zcela náhodně, nemají žádnou analytickou informaci. Rozložení prvků přesně odpovídá naměřeným identifikacím. Nejsnáze to lze pozorovat na lemování z mosazných korálků (Obr. 7 a 8).
Intenzity barev neurčují u prvků, které označují, kvantitativní obsah v celku, ale pouze daného prvku. Na tento fakt je nutné pamatovat, aby vyšší intenzita barvy značící některý prvek nebyla interpretována, jako jeho vyšší procentuální zastoupení. Opět na příkladu mosazných korálků. Zatímco Cu bude mít nejvyšší intenzitu v bodech s nejvyšším obsahem mědi (kolem 65 %), Zn má nejvyšší intenzitu v bodech svého nejvyššího zastoupení (kolem 35 %). Tuto problematiku interpretace map dobře dokládá poslední mapa rozložení Ag (Obr. 13). Z Obr. 3 je patrné, že plochy zdánlivě stříbrné jsou oblasti zakryté pouze textilií bez korálků, jedná se tedy pouze o signál podkladového kovu tabatěrky pod výšivkou.
Reliéf mapovaného povrchu tuto interpretaci výsledných dat ztěžuje ještě o trochu více. (Obr. 14–17)



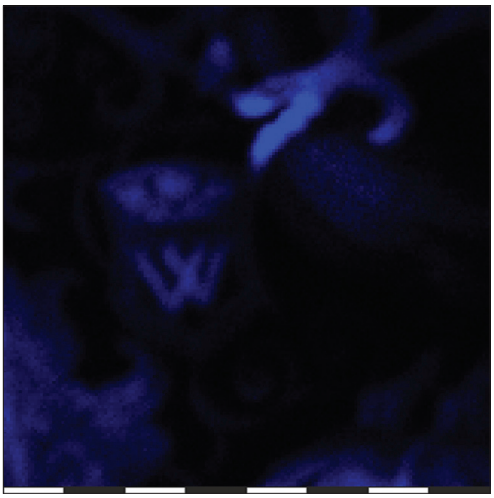
Obr. 14 *Sdružená mapa distribuce Ag (červená), Cu (zelená) a Au (modrá) / Summarised map of distribution Ag (red), Cu (green) and Au (blue)*



Obr. 15 *Ag*



Obr. 16 *Cu*



Obr. 17 *Au*

Mapovaná oblast pohřebního štítu byla cíleně vybrána v místě co největšího množství různých dracounů a také nejvýraznější plasticity. Rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším bodem byl v měřené oblasti 11,5 mm. Opět lze vidět, že intenzita barevnosti mapy Au (Obr. 17) svádí k interpretaci vysokého obsahu zlata v oblasti ptačího krku, přesto z bodových analýz byl obsah stanoven do 1 % hm. Je nutné zohlednit plasticitu předmětu a přihlédnout k zeslabení signálu vzdáleností povrchu od spektrometru. To, jaký vliv má plasticita a geometrie měřeného povrchu na analytický signál je stále předmětem zkoumání [Trojek, 2017].

Funkce mapování je velmi praktickou pomůckou k identifikaci a rozložení pigmentů nebo jako například u korálkové výšivky na pouzdře k identifikaci korálků stejného složení. V případě použití na archeologických kovových předmětech je vhodná pro lokalizaci dochované původní povrchové úpravy pokovení (například stopy cínování). Aplikace této metody pro určení/potvrzení nehomogenity na archeologických předmětech vyžaduje mnoho zkušeností a modelových měření. Ovšem umožňuje archeologům lépe interpretovat dodané materiálové analýzy.

ZÁVĚR

Účelem článku nebylo prezentovat nové analytické metody nebo postupy, ale prezentovat možnosti a využití XRF spektrometru v muzejní praxi. Tento článek by mohl pomoci dalším institucím při rozhodování o pořízení vlastního XRF spektrometru.

K diskuzi lze předložit snad jen stručné shrnutí kladů a záporů řešení XRF spektrometru touto cestou. Výhodou sestavení experimentálního přístroje na míru je samozřejmě možnost modifikace parametrů přístroje, aby co nejvíce odpovídal potřebám muzea. Z toho plyne i vyšší flexibilita oproti komerčním přístrojům při změnách způsobu měření a vyhodnocování dat. Spolupráce s FJFI ČVUT v Praze, které je jedním z předních vědeckých pracovišť s touto technikou u nás, zaručuje modernost a inovativnost přístroje. Umístění do již používané rentgenové komory snížilo legislativní zátěž a prostorové nároky. Oproti cenám komerčních přístrojů obdobných parametrů (jednotky milionů korun) bylo sestavením experimentálního přístroje z jednotlivých komponentů dosaženo řádové snížení pořizovací ceny (statisíce). Pořizovací náklady jsou tedy obdobné nákladům na pořízení ručního spektrometru, oproti kterým má ovšem experimentální přístroj vyšší přesnost měření.

Nevýhodou je nemožnost měření *in situ* a omezení velikosti předmětů k analýze rozměry rentgenové komory. Dále pak vyšší nároky na odbornost obsluhy vzhledem ke složitosti uživatelského rozhraní a nutnosti intuitivních zásahů při měřeních a jejich vyhodnocování. V případě přístroje MMP, financovaného z operačního programu, i nemožnost přístroj používat pro komerční účely (zakázkové analýzy pro jiné instituce).

POZNÁMKY

[1] Muzeum hlavního města Prahy – oddělení konzervace sbírek
[2] České vysoké učení technické v Praze, fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
[3] Muzeum hlavního města Prahy – oddělení archeologických sbírek
[4] Kompletní specifikace DppMCA: https://www.amptek.com/software/dpp-mca-display-acquisition-software
[5] Kompletní specifikace XRS-FP2: https://www.amptek.com/products/analytical-software/xrs-fp2-quantitative-xrf-analysis-software
[6] Kompletní specifikace PyMCA: http://www.silx.org/doc/PyMca/latest/tutorials.html

LITERATURA

- BECKHOFF, B. *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. New York: Springer, 2006. ISBN 35-402-8603-9
- BURSÁK, D. *Spona typu Almgren 18 ze sbírky J. A. Jíry a další nálezy z Lipan (okr. Kolín)*. Praha: Archaeologica Pragensia 25, 2020, ISSN: 0231-6390 (v tisku)
- CRADDOCK, P. T. *2000 Years of Zinc and Brass*. 2. London: British Museum Occasional Paper 50, 1998, 258 s. ISSN 0142-4815.
- ČECHÁK, T. – MUSÍLEK, L. – TROJEK, T. – KOPECKÁ, I. Application of X-Ray Fluorescence Analysis in Investigations of Historical Monuments. *Acta Polytechnica*, 45(5), 2005. https://doi.org/10.14311/772
- ČESKO. § 7 písm. a) vyhlášky č. 307/2002 Sb., Státního úřadu pro jadernou bezpečnost o radiační ochraně. In: *Zákony pro lidi* [online]. © AION CS 2010-2020 [cit. 25. 3. 2020]. Dostupné z: https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2002-307#p7-1-a
- *Definice muzea*. ICOM Czechia [online]. Praha: ICOM, 2010, 2010 [cit. 25. 1. 2020]. Dostupné z: http://network.icom.museum/icom-czech/icom/definicemuzea/
- ISTENIČ, J. – ŠMIT Ž. The beginning of the use of brass in Europe with particular reference to the southeastern Alpine region. LA NIECE, S., D. HOOK a P. CRADDOCK. *Metals and Mines: Studies in Archaeometallurgy*. 1. London: Archetype Publications, 2007, s. 140–147. ISBN 9781904982197.
- ŠEVCŮ, R. – HRICKOVÁ K. – KMONÍČKOVÁ M. – ANTUŠKOVÁ V. *Specializovaná databáze pigmentů a barviv*. 1. Praha: Národní galerie v Praze, 2017. ISBN 978-80-7035-651-7.
- TROJEK, T. – MUSÍLEK, L. – ČECHÁK, T. 2014: X-ray fluorescence analysis of cultural artefacts – Applications to the Czech heritage. In: Radiation Physics and Chemistry. 2014, vol. 95, p. 381–384. ISSN 0969-806X.
- TROJEK, T. (2017). *Rušivé jevy v rentgenové fluorescenční analýze a rekonstrukce reliéfu zkoumaných předmětů* [Habilitační přednáška, ČVUT Praha]. https://portal.cvut.cz/wp-content/uploads/2017/04/HP2012-16-Trojek.pdf