FORUM / 2023 / ROČ. XIII / Č. 2

PRO KONZERVÁTORY-RESTAURÁTORY
FORUM FOR CONSERVATORS-RESTORERS

2023 / Vol. XIII / No. 2
Peer-reviewed open access journal
https://www.doi.org/10.61574/fkr.2023.2.129

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, 2023
ISSN (Online) 2571-4384
ISSN (Print) 1805-0050

TECHNICKÉ MUZEUM V BRNĚ

METODICKÉ CENTRUM KONZERVACE

KOMPARÁCIA MEDICÍNSKYCH A PRIEMYSELNÝCH TOMOGRAFOV Z HĽADISKA VYUŽITIA V REŠTAURÁTORSKOM VÝSKUME DREVENÝCH POLYCHRÓMOVANÝCH SÔCH

Dušana Ondreková

Vysoká škola výtvarných umení

Mgr. art. Dušana Ondreková, ArtD., študovala doktorandské štúdium na Katedre reštaurovania na Vysokej škole výtvarných umení v Bratislave. V rámci tohto štúdia sa venovala problematike využitia nedeštruktívnych metód v oblasti reštaurátorského výskumu. Na katedre naďalej pôsobí ako Odborná asistentka v Ateliéri reštaurovania drevenej polychrómovanej sôch. (dusana.ondrekova@gmail.com)

Využitie moderných technológií prispieva k hlbšiemu výskumu v oblasti konzervovania a reštaurovania pamiatok. V príspevku sú porovnané medicínske a priemyselné tomografy, ktoré boli využité v nedeštruktívnom výskume umeleckých diel – Kristus na kríži z 18. storočia zo Slovenského národného múzea v Martine a hlava anjela z Oltára sv. Jána Nepomuckého z Pečovskej Novej Vsi. V závere sú zhrnuté rozdiely medzi typmi prístrojov s dôrazom na ich využitie v reštaurátorskom výskume. Okrem dostupnosti prístrojov je podstatný aj zámer, na základe ktorého volíme typ vhodného prístroja.
Klíčová slova: priemyselná tomografia, počítačová tomografia, reštaurátorský výskum, drevená polychrómovaná socha

COMPARISON OF MEDICAL AND INDUSTRIAL COMPUTER TOMOGRAPHY SCANNERS IN TERMS OF THEIR USE IN RESTORATION RESEARCH ON WOODEN POLYCHROME STATUETTES The use of modern technologies enables deeper research in the field of conservation and restoration of artefacts. The article compares medical and industrial CT scanners that were used in non-destructive research on two works of art – Christ on the Cross from the 18th century, the Slovak National Museum in Martin and the head of an angel from the Altar of St. John of Nepomuk from Pečovská Nová Ves. In the conclusion, the differences between the individual types of devices are summarized with emphasis on their use in restoration research. In addition to the availability of the device, the intention on the basis of which we choose the type of suitable device is also essential.
Keywords: industrial tomography, computed tomography, restoration research, polychrome wood sculpture

Počítačová tomografia (CT) je modernou diagnostickou metódou, spočiatku vyvinutou pre medicínske účely, ale s rýchlym rozvojom moderných technológií, sa dnes uplatňuje v oblasti priemyslu, archeológie, antropológie, prieskume umeleckých diel a mnohých ďalších odvetviach. Zobrazovacia metóda využíva RTG žiarenie – jeho schopnosť prechodu tuhými látkami. Spracovaním získaných dát – rôznej intenzity žiarenia na jednotlivých snímkach – je možné rekonštruovať trojrozmerné zobrazenie objektov. Vďaka počítačovej tomografii pozorujeme virtuálne rezy vnútornou štruktúrou snímaného objektu bez jeho reálnej deštrukcie. Dnes sa na trhu nachádza množstvo typov tomografov, pričom prístroje v zdravotníckych zariadeniach sú primárne určené pre diagnostiku v medicíne. Najdostupnejšie medicínske tomografy dosahujú rozlíšenie okolo 400 až 600 µm, najmodernejšie prístroje s plošnými detektormi sa približujú k hodnotám 200 µm. Lepšie rozlíšenie poskytnú už len priemyselné tomografy (mikrotomografy angl. *micro CT*) [Gupta, 2008]. Kvalita tomografov sa však zdokonaľuje každým rokom. Oproti minulosti máme dnes k dispozícii možnosť výberu z rôznych typov prístrojov. Na Vysokej škole výtvarných umení v Bratislave sme sa venovali snímaniu umeleckých diel s viacerými tomografickými prístrojmi. Pri výskume sme využili tri rôzne medicínske a dva priemyselné tomografy [Ondreková, 2019]. Na projekte intenzívne spolupracovali odborníci v oblasti počítačovej tomografie, predovšetkým Ing. Tomáš Dvorák, PhD., z Ústavu materiálov a mechaniky strojov SAV v Bratislave a Bc. Michal Miklušičák z rádiologického oddelenia Nemocnice sv. Cyrila a Metoda v Bratislave.

PRINCÍP FUNGOVANIA MEDICÍNSKYCH A PRIEMYSELNÝCH TOMOGRAFICKÝCH PRÍSTROJOV

Priemyselné tomografy sú koncipované odlišnejšie než medicínske tomografy. Keďže snímané súčiastky v priemyselnom tomografe majú väčšinou tuhú štruktúru, nie je nutné, aby boli v statickej polohe, a nie je potrebné ani tak výrazne obmedzovať radiačné zaťaženie [Kaťuch – Živčák, 2010]. Ak chceme získať 3D obraz, je potrebné spraviť celý rad dvojrozmerných projekcií objektu položeného na otočnom držiaku, pri otáčaní objektu sa prechádzajúce X-žiarenie zachytáva na detektor, ktorý premieňa žiarenie na elektrický signál (čiže na informáciu).

Na Slovensku v posledných rokoch pribudlo viacero rozličných priemyselných tomografov, pričom na trhu je dostupných niekoľko výrobcov, napríklad Phoenix, Carl Zeiss, Werth, Wenzel North Star Imaging, Nikon [Prášilová, 2011]. Hlavný rozdiel medzi medicínskym a priemyselným tomografom spočíva v spôsobe prevedenia prechádzajúceho žiarenia cez objekt. Priemyselný tomograf je obyčajne zostavený tak, že zdroj žiarenia a detektor sú pevne osadené, ale objekt sa otáča okolo zvislej osy [Prášilová, 2011]. Počas otáčania vzorky v tomografe sa snímajú jednotlivé obrazy, tzv. rentgenogramy. Špeciálny zdroj využíva kužeľovitý zväzok žiarenia. Meraná vzorka sa umiestňuje veľmi blízko k zdroju a detektor je vo väčšej vzdialenosti, takže dochádza k projekčnému zväčšeniu obrazu [Ulmann – dostupné on-line]. Vysoká ostrosť a rozlišovacia schopnosť obrazu závisí od správne nastavenej geometrie počas snímania objektu. Rozlišovacie možnosti, ako aj veľkosť voxelov (odvodené z pojmu priestorový bod – volume pixel) ovplyvňuje poloha vzorky medzi zdrojom žiarenia a detektorom. Oproti medicínskemu CT je to zmena, tam zdroj žiarenia a detektory rotujú okolo objektu staticky položenom na pohybujúcom sa stole. Princíp zobrazenia obrazu je rovnaký v oboch typoch tomografov. Z rentgenogramov vytvorí rekonštrukčný softvér 3D model reálnej vzorky vo forme mračna bodov – voxelov, ktoré sa zobrazia v určitých stupňoch sivej farby na monitore. Prechodom žiarenia cez pevné látky dochádza k útlmu žiarenia, ktoré je pohlcované predmetom (útlm žiarenia – angl. *attenuation*). Meraním získava tomograf informácie o čiastkovej absorpcii, keď materiál absorbuje RTG fotóny, zatiaľ čo ďalšie sa prepúšťajú do detektora. Výsledky tomografu v sérii čiernobielych obrázkov vo virtuálnom prostredí znázorňujú vo svetlejších sivých tónoch viac útlmu žiarenia a v tmavších tónoch menej útlmu žiarenia vo vzorke [Application of Micro CT, 2016]. K ďalším najzásadnejším rozdielom priemyselného tomografu oproti medicínskemu tomografu patrí maximálna veľkosť snímaného objektu (v závislosti od veľkosti manipulačného priestoru prístroja). V prípade skenovania rozmernejších celých objektov však úmerne klesá aj rozlíšenie. Oproti medicínskemu tomografickému prístroju, ktoré má bežne rozlíšenie okolo 0,5 mm, môže mať priemyselný tomograf oveľa vyššiu kvalitu s rozlíšením už od 0,001 mm [Comparative specifications CT scanners, 2009]. Rozdielne je aj maximálne možné napätie, ktoré vedie k zmene absorpcie v jednotlivých materiáloch, čo ovplyvňuje kontrast a prechod fotónov cez rôzne husté materiály (maximálne možné nastavenie napätia medicínskeho tomografu je 140 kV, zatiaľ čo priemyselné tomografy majú zdroj RTG žiarenia od 180 kV až do 800 kV [Hrušecký, 2020]. Keďže v priemyselných tomografoch sa nesnímajú živé tkanivá, ale skôr súčiastky s tuhou štruktúrou, nie je nutné tak výrazne obmedzovať radiačné zaťaženie, ako v prípade živého organizmu.

METODIKA

Pri výskume sme využili tri rôzne medicínske a dva priemyselné tomografy. Najprv sa snímali testovacie vzorky vyhotovené pre účely výskumu a následne sme aplikovali poznatky na umeleckých dielach. Priemyselnými tomografmi disponuje Ústav materiálov a mechaniky strojov na SAV. Prvým prístrojom je Nanotom 180 (Prístroj RTG mikrotomograf Phoenix Nanotom 180 od firmy General Electric Measurements & Control Solutions phoenix|x-ray.) nachádzajúci sa v Bratislave, druhým (Nikon – XT H225 ST) disponuje ich detašované pracovisko INOVAL v Žiari nad Hronom. Súbory z priemyselných tomografov sú spracované v zakúpenej verzii softvéru VGS Studio od firmy Volume Graphics [in Volume graphics manual]. Z RAW dát priamo na pracovisku sa môže výstup uložiť vo viacerých formátoch. My sme pracovali s formátom *vgl.* Pri využití medicínskej počítačovej tomografie sme spolupracovali s dvoma zdravotníckymi zariadeniami: S Poliklinikou NovaMed v Banskej Bystrici (prístroj Toshiba Aquilion One s 320 radovým detektorom) a s pracoviskom rádiológie v Nemocnici sv. Cyrila a Metoda v Bratislave (prístroje Siemens Somatom Sensation 64-Slice a Siemens SOMATOM Perspective 128). Výstupy z medicínskych tomografov sme spracovali vo formáte DICOM a freevari TomoCon PACS od firmy Tatramed. Rôzne hodnoty útlmu žiarenia sa vo freevari zobrazili ako rôzne stupne sivej. Postprodukcia prebiehala s rekonštrukčnými rezmi v 2D axiálnom, sagitálnom a koronálnom zobraznení. Rádiologická denzita v priestore sa definuje pomocou stupnice nazvanej podľa prvého výrobcu tomografu – Hounsfielda, jednotkou denzity je HU – Hounsfieldova jednotka (angl. *Hounsfield unit*). Toto číslo kvantifikuje stupeň absorpcie RTG žiarenia pri snímaní objektu v medicínskom tomografe. Objekt je zobrazovaný – rezaný v tranzverzálnej (axiálnej) rovine. Škála denzít má definované dva pevné body: vzduch (–1000 HU) a voda (0 HU). Na našich snímkach sú vysoké denzitné čísla znázornené bielou farbou. Vzduch, ktorý má –1000, je zobrazený čiernou farbou. V okne Window/level sa pomocou histogramu môžu tieto škály meniť podľa zámeru výskumu.

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

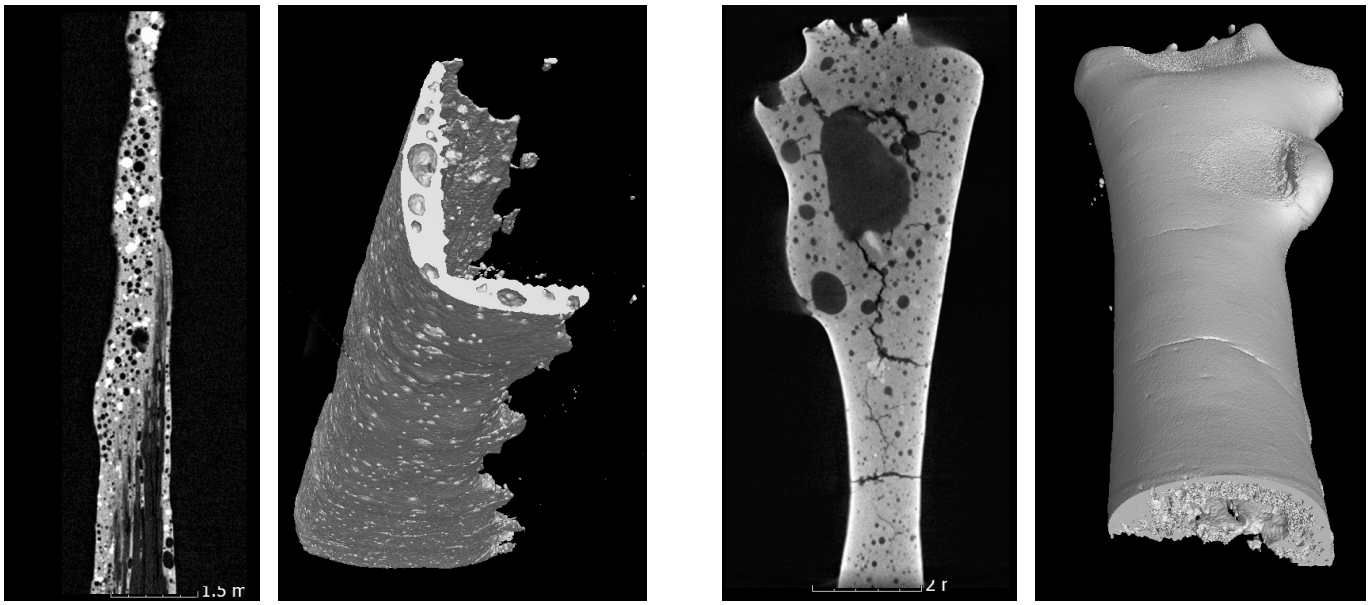
Snímanie testovacích vzoriek pigmentov s priemyselným tomografom Nanotom 180

Z deviatich vzoriek rôznych pigmentov, sa nasnímalo sedem (okrem bielych pigmentov aj azurit, smalt, dračia krv, rumelka), pričom najprv sa skenovali jednotlivo nanesené pigmenty spojené žĺtkom a aplikované na drevo (na obr. 2 položené dole pod metrom znázorňujúcim veľkosť vzoriek). Potom sme tri biele pigmenty naniesli na seba v poradí: 0 drevená špajdľa, 1 olovená bieloba, 2 titánová bieloba, 3 zinková bieloba (na obr. 2 zobrazené vľavo hore nad metrom). Poslednou testovacou vzorkou boli nanesené tri spomínané pigmenty s medzivrstvami šampanskej kriedy v poradí: 0 drevená špajdľa s izoláciou želatíny (2 %), 1 olovená bieloba, 2 šampanská krieda, 3 titánová bieloba, 4 šampanská krieda, 5 zinková bieloba (na obr. 2 zobrazené vpravo hore nad metrom).

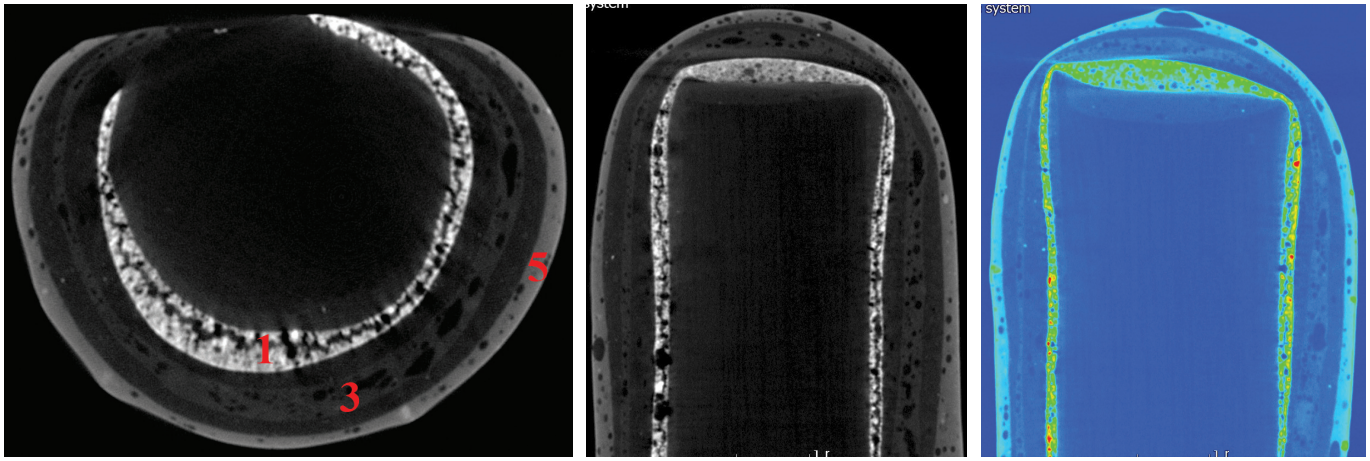
Obr. 1 Manipulačný priestor priemyselného tomografu Nikon – XT H225 ST a jeho vonkajší vzhľad v porovnaní s medicínskym tomografom Siemens Somatom Sensation 64-Slice vpravo / Handling area of the Nikon – XT H225 ST industrial CT scanner and its external appearance in comparison with the Siemens Somatom Sensation 64-Slice medical CT scanner on the right

Obr. 2 *Testovacie vzorky historických pigmentov spojené žĺtkom*
Test samples of historical pigments bound with yolk

Na obrázkoch 3 a 4 je ukážka 2D bočného prierezu dvoch samostatne nanesených bielych pigmentov. V 2D zobrazení môžeme pozorovať bubliny či praskliny farebnej vrstvy.
Na obr. 5 je zobrazená testovacia vzorka kde boli nanesené tri biele pigmenty s medzivrstvami šampanskej kriedy v poradí: 0 drevená špajdľa s izoláciou želatíny (2 %), 1 olovená bieloba, 2 šampanská krieda, 3 titánová bieloba, 4 šampanská krieda, 5 zinková bieloba. Test preukázal, že všetky nanesené vrstvy sa v tomografe Nanotom 180 zobrazili odlíšiteľne. Vzorka bola skenovaná s parametrami 110 kV, 130 µA, 750 ms.

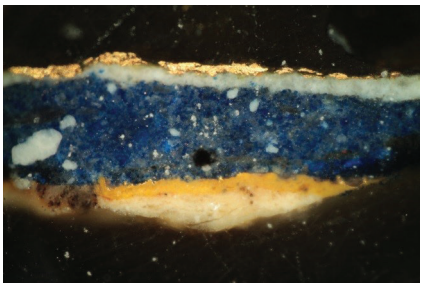
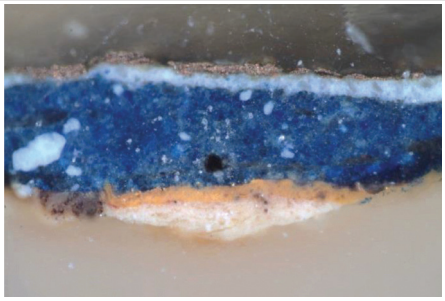
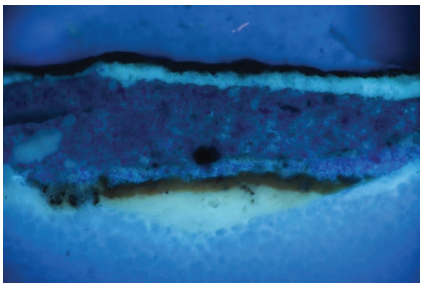
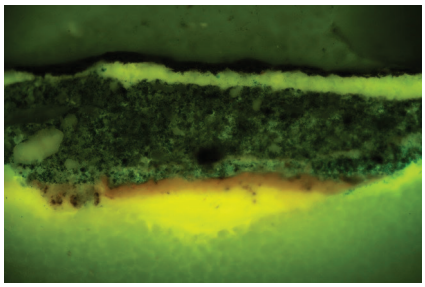
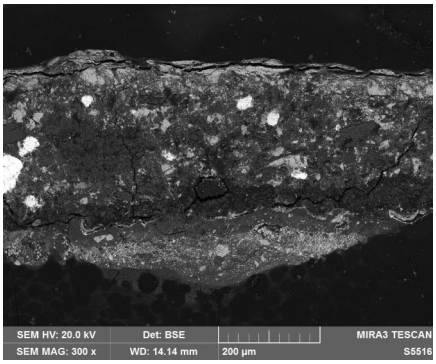


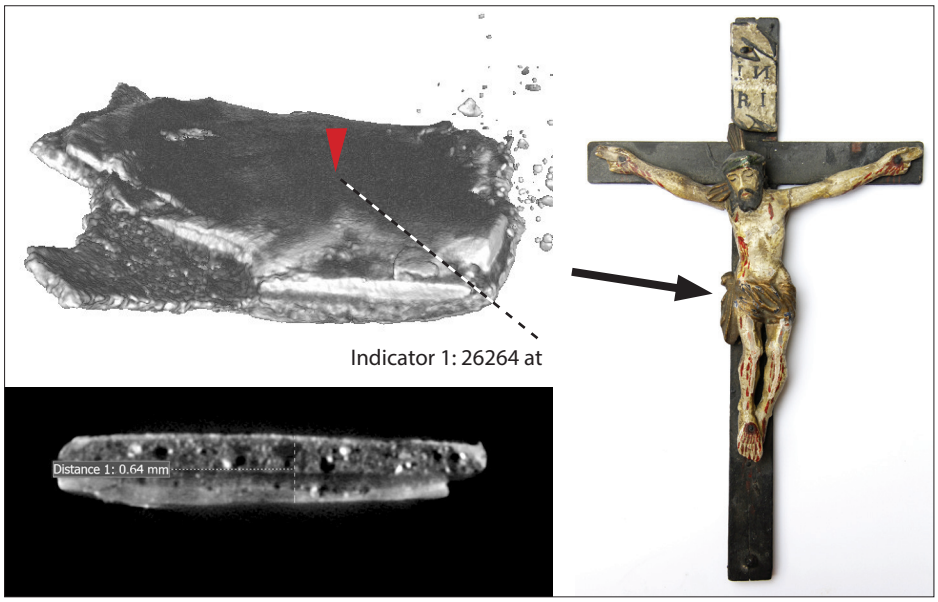
Obr. 3 a 4 *Vľavo 2D bočný prierez titánovej bieloby a 3D pohľad na farebnú vrstvu (skenovaná s parametrami 120 kV, 110 µA, 500 ms, počet snímok 1800 za jednu rotáciu objektu) a vpravo zinková bieloba v 2D a 3D zobrazení (skenovaná s parametrami 125 kV, 100 µA, 500 ms, počet snímok 1800 za jednu rotáciu objektu) / On the left, a 2D side section of titanium white and a 3D view of the colour layer (scanned with the following parameters: 120 kV, 110 µA, 500 ms, 1800 projections per one rotation of the object) and on the right, zinc white in 2D and 3D views (scanned with the following parameters: 125 kV, 100 µA, 500 ms, 1800 projections per one rotation of the object)*



Obr. 5 a, b, c *Vľavo priečny rez cez vzorku a vpravo bočný prierez. Na vzorke je viditeľná každá vrstva pigmentu a aj medzivrstva kriedy. Vpravo je bočný prierez zobrazený vo filtri Components (prednastavená selekcia, ktorá farebne rozlišuje jednotlivé denzity) – pri tomto škálovaní je slabo spozorovateľná aj štruktúra dreva zo špajdle / On the left, a cross-section through the sample and on the right, a side cross-section. Each layer of pigment and also the interlayer of chalk are visible on the sample. On the right, the side cross-section is shown in the Components filter (a pre-set selection that distinguishes the individual densities by colour) – with this scaling, the wood texture of the skewer is also faintly visible*

Tab.1 Chemicko-technologický výskum, vzorka z rúška – S5516 / Chemical-technological research, sample taken from the loincloth – S5516

Nábrus, dopadajúce biele svetlo, fotografované pri zväčšení 200×	Nábrus, dopadajúce biele svetlo, externé osvetlenie, fotografované pri zväčšení 200×
	
Nábrus, UV zdroj, fotografované pri zväčšení 200×	Nábrus, modré svetlo, fotografované pri zväčšení 200×
	
Nábrus, REM, detektor spätne odrazených elektrónov	
	**1. Podklad** – obsahuje olovnatú bielobu, jemnozrnný baryt a malú prímes lithoponu **2a. Okrová vrstva (podklad pod zlátenie)** – obsahuje žltý oker, prímes Pb-bieloby (prípadne masikotu) a malú prímes jemnozrnného barytu **2b. Zlatolesklá fólia** – zlatá fólia (Au) **3. Modrá vrstva** – obsahuje umelý ultramarín, jemnozrnný uhličitan vápenatý, baryt a prímes zinkovej beloby **4. Modrá vrstva s bielymi zrnami** – obsahuje umelý ultramarín, olovnatú bielobu, prímes barytu a zinkovej bieloby, malú prímes sádrovca **5. Svetlomodrá vrstva** – obsahuje baryt, prímes lithoponu a umelého ultramarínu **6. Načervenalá, zlatolesklá vrstva** – obsahuje tzv. práškový bronz (šupinky zliatiny obsahujúcej Cu–Zn v pomere ca. 90 : 10 % hm.)[1]



Obr. 6 a, b Vľavo vzorka z rúška v 3D a 2D, vpravo socha Krista pred reštaurovaním so šípkou označujúcou miesto odberu z rúška / On the left, a sample from the loincloth in 3D and 2D, on the right, a statuette of Christ before restoration with an arrow indicating the place where the sample was taken

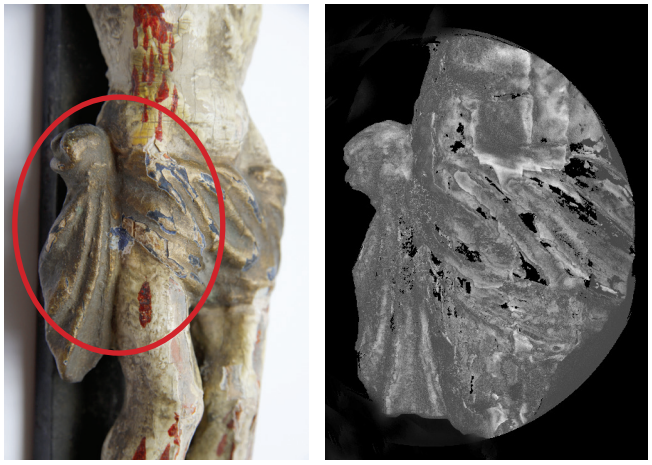
APLIKÁCIA V PRAXI – SNÍMANIE VZORKY HISTORICKEJ PAMIATKY S PRIEMYSELNÝM TOMOGRAFOM

Po výsledkoch testu čitateľnosti vrstiev pigmentov nasledoval odber vzoriek z umeleckého diela. Na priemyselnom tomografe Nanotom 180 bola nasnímaná vzorka z rúška sochy ukrižovaného Krista z polovice 18. storočia (zo zbierky múzea SNM v Martine, obr. 6 a, b). V tomto prípade sa však už nejedná o nedeštruktívny výskum, aj keď vzorku by bolo možné na dielo prinavrátiť, ak by zostala nepoškodená (vzorka sa prenáša na špecializované pracovisko, ale nie je treba ju zalievať do živice). Druhú vzorku odobratú taktiež z rúška sme podrobili chemicko-technologickému výskumu (optická mikroskopia, elektrónová mikroskopia) pre porovnanie s výstupom z priemyselnej tomografie.

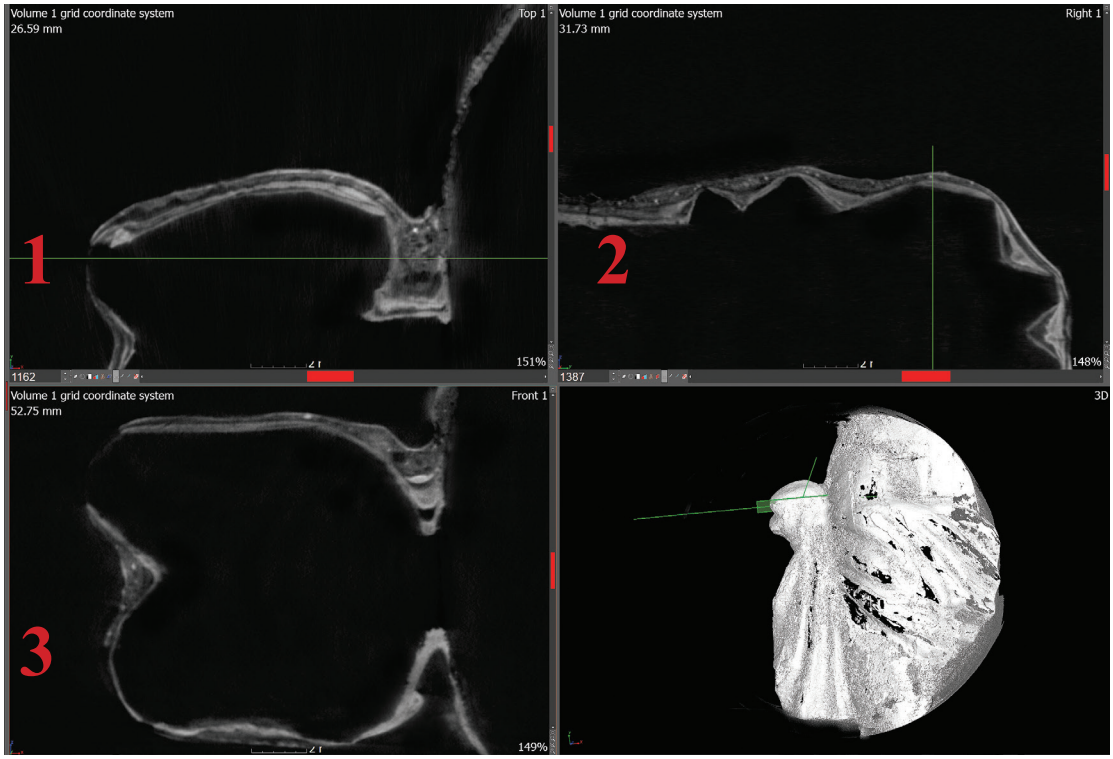
Aplikácia v praxi – snímanie historickej pamiatky s priemyselným CT – socha Krista

Prístrojom Nikon XT H225 ST sa snímala totožná socha Krista na kríži z 18. storočia, ktorá bola pred tým podrobená chemicko-technologickej analýze a výskumu pomocou mikrotomografie. Zatiaľ čo v prístroji Nanotom 180 sa na dosiahnutie rozlíšenia 0,005 mm snímala vzorka odobratá z diela veľkosťou podobná vzorkám na chemicko-technologické analýzy (max. niekoľko milimetrov), v prístroji Nikon XT H225 ST bolo možné nasnímať celé dielo (Kristus bez kríža mal rozmery 228 × 287 × 44 mm). Keby sme však skenovali celú sochu Krista, nemohli by sme dosiahnuť rozlíšenie podobné skenovanej vzorke z prístroja Nanotom 180. Pri snímaní celého Krista sa maximálne možné rozlíšenie pohybovalo pri hodnote 0,08 mm (78,89 µm). Niektoré vrstvy na historických pamiatkach však môžu byť aj tenšie, preto by sa nemuseli zobraziť všetky. Z toho dôvodu sme vybrali len oblasť rúška (obr. 7 a, b), čím sme dosiahli rozlíšenie 0,02 (22,86 µm). Keby sme zvolili ešte menšiu oblasť záujmu, dosiahli by sme ešte lepšie rozlíšenie až do niekoľkých mikrometrov (3 – 5 µm).

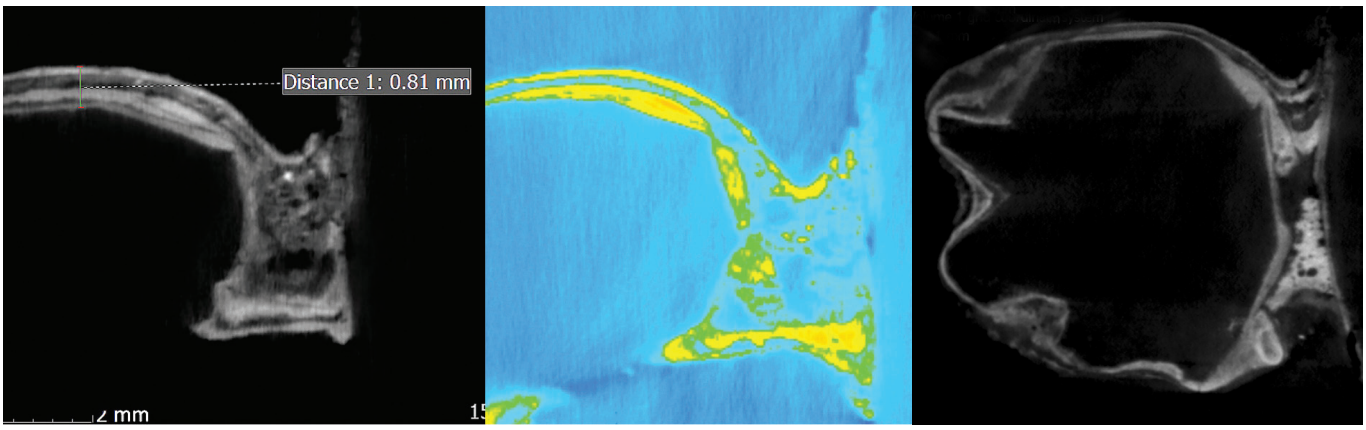
Na obr. 8, 9 a 10 je zobrazená oblasť z rúška Krista z prístroja Nikon XT H225 ST s rozlíšením 0,02 mm. Obr. 9 predstavuje ukážku meraní hrúbky vrstiev a rozličných denzít vrstiev (keďže ide o väčší skenovaný objem, na výber je nespočetné množstvo oblastí, kde sa dá analýza vykonať – napríklad v rôznych záhyboch drapérie). Rúško je skenované s napätím 160 kV. Pre odobratie vzorky na chemicko-technologické analýzy môže slúžiť tento výsledok nedeštruktívneho výskumu aj ako pomôcka pri lokalizácii vhodného miesta odberu vzorky so všetkými historickými vrstvami na diele.



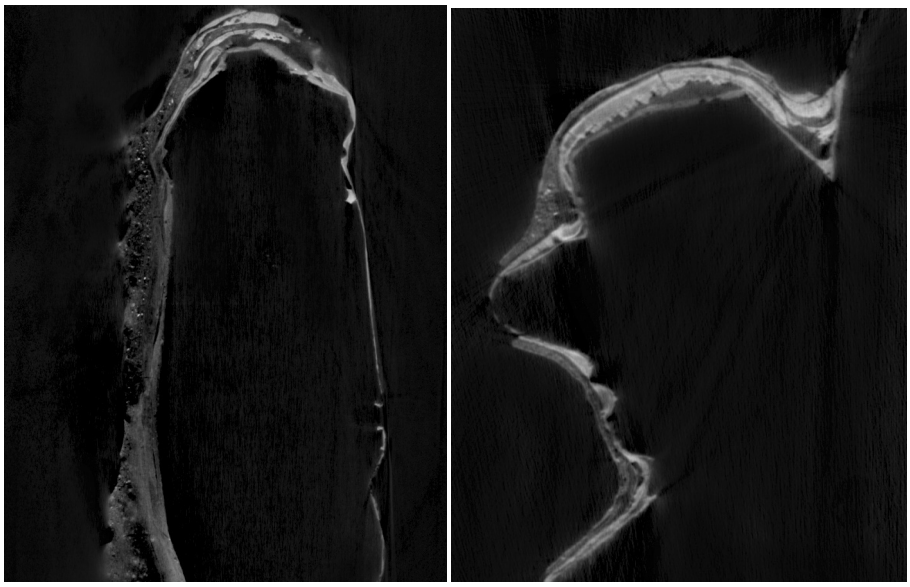
Obr. 7 a, b Detail rúška Krista pred reštaurovaním s vyznačením snímanej oblasti a 3D zobrazenie zvolenej oblasti záujmu skenovanej priemyselným tomografom XT H225 ST od Nikonu / Detail of Christ's loincloth prior to restoration, with the area to be scanned marked and a 3D view of the selected area of interest scanned by Nikon XT H225 ST industrial CT scanner



Obr. 8 Pohľad do softvéru s vyznačením lokalizácie miesta v rámci celého objemu (zelenou v 3D náhľade), na vzorke sa ukázali jednotlivé vrstvy výstavby polychrómie diela v troch smeroch (1: pohľad prechádzajúci spredu dozadu cez rúško, 2: pohľad prechádzajúci sprava doľava a 3: pohľad prechádzajúci zhora dole cez rúško) / Application view showing the location of the place within the whole volume (in green in the 3D view), the sample showed the individual layers of the polychromy of the artwork in three directions (1: view passing from front to back through the garment, 2: view passing from right to left, and 3: view passing from top to bottom through the loincloth)



Obr. 9 a, b, c *Vľavo vo zvolenom mieste bola nameraná hrúbka polychrómie 0,81 mm, v strede je znázornená vzorka vo filtri Components – najvyšší koeficient útlmu predstavuje spodná primárna vrstva, ale tiež vrchná sekundárna vrstva obsahujúca bronz. Vpravo pohľad prechádzajúci zhora dole cez rúško Krista, v niektorých vrstvách vidno aj bublinky a praskliny, meniacu sa hrúbku vrstiev v hĺbkach a výškach drapérie a súvislé zachovanie primárnej vrstvy / On the left, at the selected location, a polychromy thickness of 0.81 mm was measured; the sample in the Components filter is shown in the middle – the highest attenuation coefficient is represented by the lower primary layer, but also by the upper secondary layer containing bronze. On the right, a top-down view through the Christ's loincloth, with bubbles and cracks visible in some of the layers, varying thickness of the layers in the depths and heights of the drapery, and the continuous preservation of the primary layer*

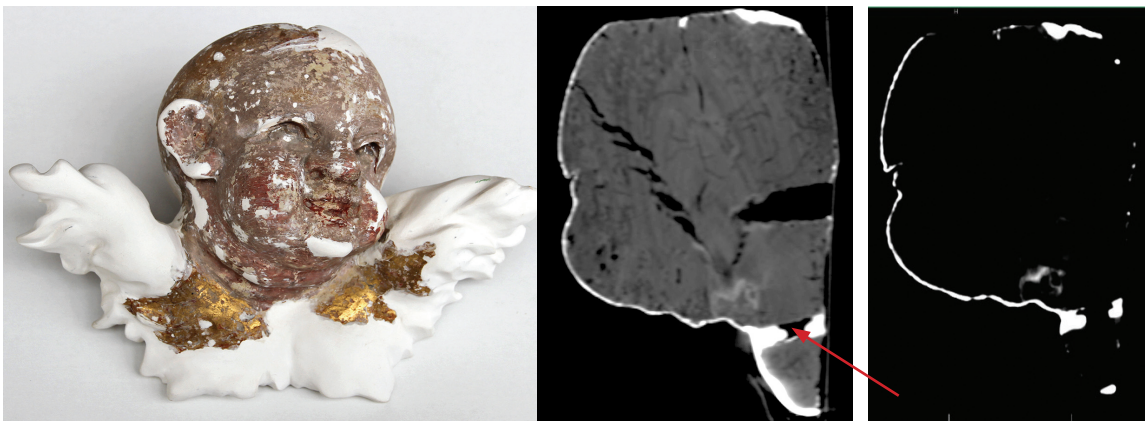


Obr. 10 a, b *Vľavo pohľad cez objekt v smere sprava doľava, vpravo pohľad prechádzajúci spredu dozadu – zobrazenie vrstiev polychrómie v prístroji Nikon XT H225 ST / On the left, a view through the object in the direction from right to left, on the right, a view passing from front to back – display of polychromy layers in the Nikon XT H225 ST device*

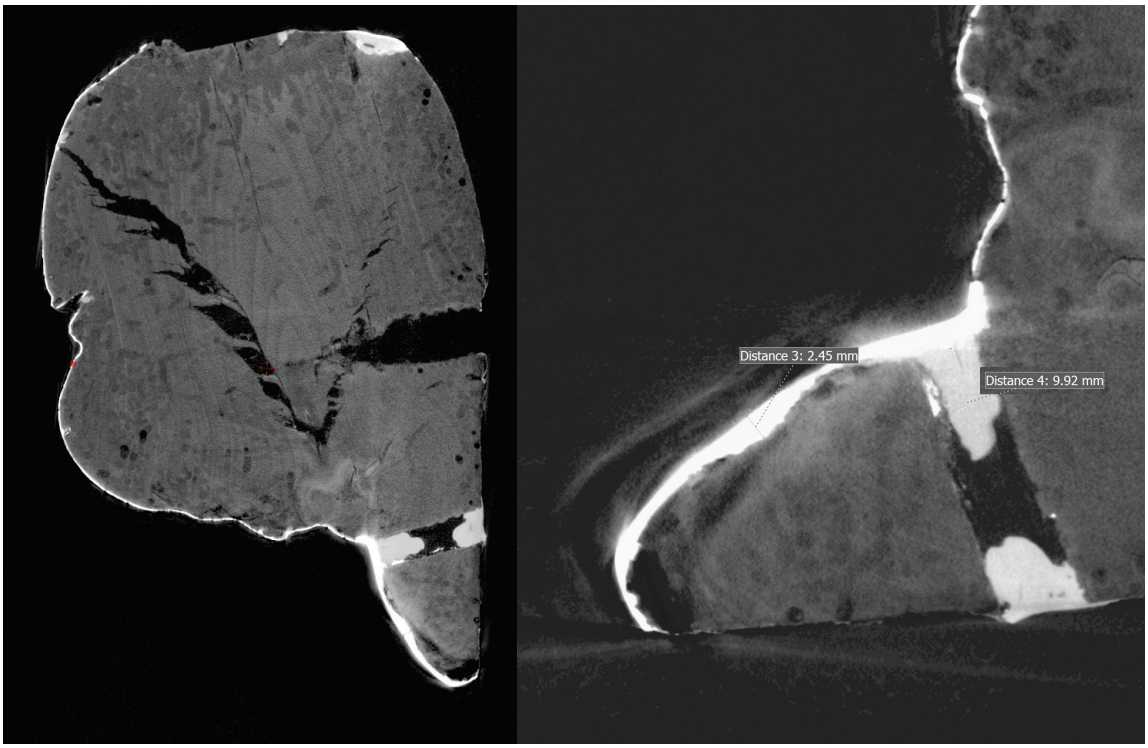
Porovnanie medicínskych a priemyselných tomografov na historickej pamiatke

Pre porovnanie typov prístrojov bola snímaná hlava anjela z Oltára sv. Jána Nepomuckého z Pečovskej Novej Vsi – dielo sa naskenovalo prístrojmi celé, takže ide o nedeštruktívnu formu výskumu. Nachádzalo sa v procese reštaurovania. Cieľom bolo porovnanie nasnímaného diela z priemyselného tomografu s výstupom z medicínskeho tomografu, kde sa pohybovalo rozlíšenie okolo 0,6 mm. Anjela sme snímali tromi medicínskymi tomografmi – počas výskumu sa pre účinnosť petrifikácie dielo snímalo prístrojom Siemens Somatom Sensation 64-slice v Bratislave (snímky sú vyhotovené s použitím napätia 100 kV). Po vytmelení sme dielo skenovali prístrojom Toshiba Aquilion One (100 kV) v Banskej Bystrici aj medicínskym prístrojom Siemens Somatom Perspective v Bratislave, kde bolo dielo skenované ešte aj po reštaurovaní (110 kV). V priemyselnom tomografe Nikon XT H225 ST sme dosiahli maximálne možné rozlíšenie pri snímaní celého anjela s rozmermi 212 × 149 × 106 mm s hodnotou 0,07 mm (použité napätie 160 kV). Zobrazené výstupy z tomografov sprostredkujú dielo len s jednou originálnou úpravou polychrómie spolu s tmelmi v rámci tejto vrstvy a poškodený drevený nosič z lipového dreva s chodbičkami po drevokaznom hmyze. Keďže dielo je na snímkach už po petrifikácii, mnohé chodbičky sa zobrazili ako vzduchové perforácie, ak však obsahovali prachové častice, nie sú tieto miesta definované prístrojom ako čistý vzduch (napríklad prasklina v anjelovi je čierna = vzduch a chodbičky po drevokaznom hmyze sú tmavosivé). Polychrómia v medicínskom tomografe Somatom Perspective 128 je zobrazená ako jedna súvislá biela vrstva, napriek posunu okienka pre škálu materiálov s vysokým koeficientom útlmu – vo freevari Tomocon okno Window/Level – obr. 11 [in TomoCon manual].

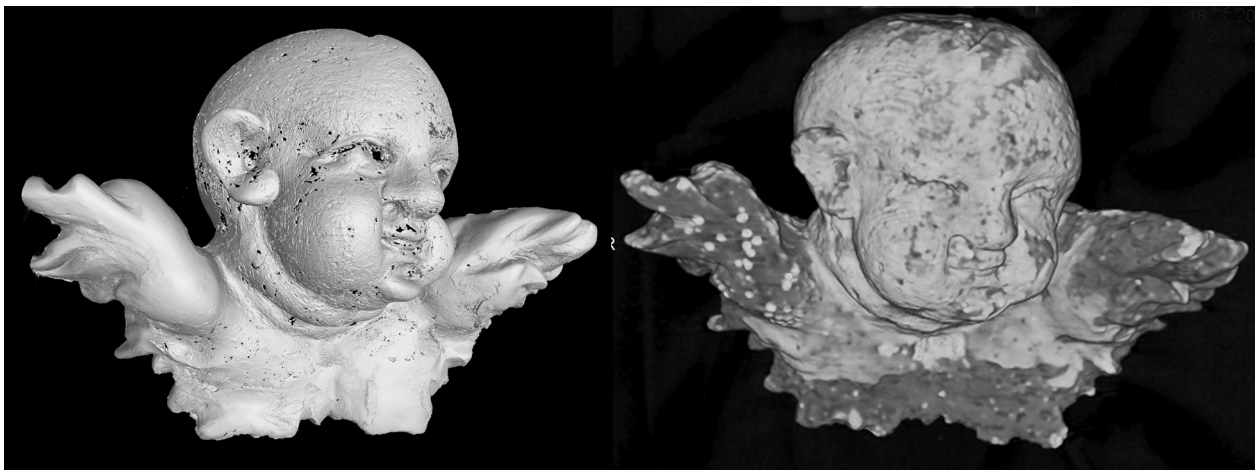
Anjel skenovaný priemyselným tomografom Nikon XT H225 ST, s napätím 160 kV, a vyhotovením 1 440 projekcií v jednej rotácii objektu, s rozlíšením 0,07 mm je na obr. 12., 13 a 14. Ostrejší obraz a lepšie vykreslené detaily sú v priemyselnom tomografe výhodou, ktorú poskytuje citlivejší panelový detektor, ktorý má až 2 300 × 2 300 bodov.



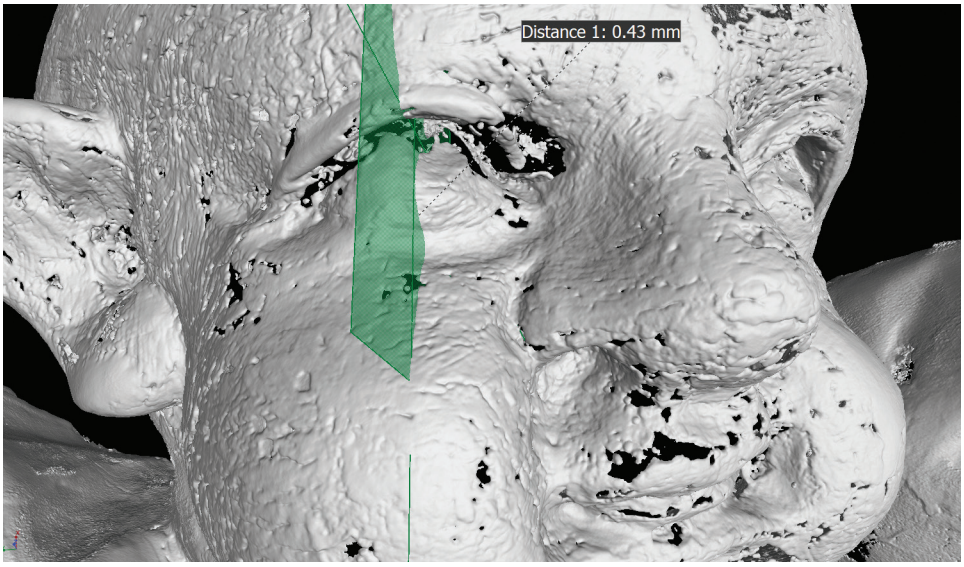
Obr. 11 a, b, c *Vľavo anjel zo sochárskej výzdoby Oltára sv. Jána Nepomuckého z Pečovskej Novej Vsi v stave po vytmelení , v strede na bočnom pohľade cez anjela (výstup z medicínskeho tomografu od Siemensu SOMATOM Perspective 128 – 265 axiálnych rezov cez dielo s parametrami snímok 110kV, 23mA, 13mAs) môžeme pozorovať poškodenia drevokazným hmyzom a aj praskliny – jedna nedostatočne vyplnená tmelom – v jej strede sa nachádza vzduch. Na snímke vpravo je anjel zobrazený s posunom škály histogramu pre materiály s vysokým koeficientom útlmu – postprodukcia v TomoCon freevari / On the left, an angel from the sculptural decoration of the Altar of St. John of Nepomuk from Pečovská Nová Ves after puttying, in the middle is the side view through the angel (output from the Siemens medical CT scanner SOMATOM Perspective 128 – 265 axial sections through the artwork with image parameters of 110kV, 23mA, 13mAs) where we can observe the damage by wood-boring insects and also some cracks – one insufficiently filled with sealant, there is air in its centre. The image on the right shows the angel with the histogram scale shift for materials with high attenuation coefficient – post production in TomoCon freeware*



Obr. 12 a, b *Zatiaľ čo medicínsky tomograf nebol schopný rozlíšiť rôznu denzitu v rámci polychrómie (napríklad drevný tmel v praskline pod bradou anjela), pri priemyselnom tomografe je hranica v šedej škále jasne odlíšená. Škála v priemyselnom tomografe dosahuje až 65 536 odtieňov šedej, ktorá zodpovedá útlmu RTG žiarenia. V detaile vpravo z priemyselného tomografu sú zmerané jednotlivé vrstvy a vidieť aj nedostatočne vyplnenú prasklinu tmelom – v strede sa nachádza vzduch / While the medical CT scanner was unable to distinguish different densities within the polychromy (for example, wood putty in the crack under the angel's chin), the industrial CT scanner clearly distinguished the boundary in grey scale. The scale in an industrial CT scanner reaches up to 65,536 shades of grey, which corresponds to the attenuation of X-ray radiation. In the detail on the right from the industrial CT scanner, the individual layers are measured and you can also see the crack insufficiently filled with sealant – there is air in the centre*



Obr. 13 a, b *Oba 3D výstupy nám môžu slúžiť ako analógie, či záznam stavu diela pred reštaurovaním a po ňom. Na obrázku vpravo na soche anjela po vytmelení v 3D z priemyselného tomografu, je do detailov vidieť štruktúru povrchu polychrómie, oproti miestam s hladko vybrúsenou kriedou. Vľavo je ukážka 3D zobrazenia v medicínskom CT / Both of the 3D outputs can serve as analogies, or as a record of the condition of the artwork before and after restoration. In the image on the right, the angel statuette after puttying, which is a 3D image from an industrial CT scanner, you can see the structure of the surface of polychromy in detail, compared to places with smoothly ground chalk. On the left is an example of a 3D image from a medical CT scanner*



Obr. 14 *Detail 3D zobrazenia priemyselným CT / Detail of 3D image from an industrial CT scanner*

ZÁVER A DISKUSIA

Komparácia medicínskeho a priemyselného CT z hľadiska využitia
Medicínske prístroje sú dostupnejšie – nielen fyzicky (v nemocniciach, poliklinikách, na súkromných rádiologických pracoviskách), ale aj finančne – základný priemyselný tomograf s výkonom 225 W sa pohyboval v roku 2016 v cene od 300 000 eur do 1 000 000 eur, najnovšie medicínske prístroje sa pohybovali v cene od 60 000 do 300 000 eur [Plessis, 2016]. Tiež samotné snímanie medicínskym prístrojom je niekoľkonásobne lacnejšie ako v prípade priemyselného tomografu. Čas skenovania sa veľmi líši pri oboch modalitách, pri medicínskych CT trvá celé snímanie len niekoľko sekúnd, pri priemyselných tomografoch od 30 minút až do niekoľkých hodín. Medicínske CT je limitované veľkosťou otvoru gantry, ktorá sa pohybuje okolo 70 cm. Ak sa dielo len tesne vojde do prístroja, býva z krajov orezané, pretože veľkosť zobrazovacieho poľa je ešte menšia ako samotný otvor. Medicínske prístroje nie sú koncipované na väčšie a husté materiály (kovové) pre limitujúci zdroj do 140 kV, zatiaľ čo priemyselné CT boli na to vyhotovené s možnosťou 180 až 800 kV. Strata informácie (poškodenie obrazu) v podobe artefaktov (chybných informácií) je prítomná pri oboch modalitách. Priemyselné tomografy sa zvyčajne používajú na kvantitatívnu rozmerovú analýzu (po prvotnom kvalitatívnom zhodnotení), zatiaľ čo medicínske tomografy sú optimalizované na kvalitatívne pozorovanie objektu. Tam, kde nie je potrebná vysoká rozmerová presnosť – objekty, pri ktorých stačia pozorovania makroskopických zmien, postačuje medicínske zariadenie, pri objektoch s nutnosťou pozorovania defektov pod 700 µm, sa preferuje priemyselný tomograf, ktorý je na analýzu defektov vhodnejší. Podstatné je určiť si cieľ, ktorý chceme pri výskume dosiahnuť. Pokiaľ nás zaujíma vnútorná výstavba umeleckého diela ako konštrukčné spoje, drevené kolíky, poškodenia drevokazným hmyzom, štruktúra použitej dreviny, sekundárne tmely a doplnky vo vnútri objektu, postačuje k tomu medicínsky tomograf. Minimálne merateľný diameter pri optimálnych podmienkach na snímkach medicínskeho tomografu je okolo 0,5 mm, čo stačí na rozpoznanie prasklín a dutín v dreve, slonovej

kosti, keramike a v kameni aj v prípade, že nie sú viditeľné voľným okom či na RTG snímkach. Drevo je ideálne pre CT prístroj, keďže je to organický materiál, ktorý je čiastočne dehydratovaný, preto má nižšiu denzitu [Ghysels, 2005]. Ročné kruhy denzitu variujú, čím uľahčujú pozorovanie. Čo sa týka prieskumu vrstiev polychrómie, medicínske CT má nedostatočné rozlíšenie. Nejde len o príliš tenkú hrúbku vrstiev polychrómie, ale aj o samotné zloženie materiálov. Naopak v reštaurátorskom výskume sa snímky z priemyselného tomografu hodia napríklad na nedeštruktívnu analýzu aj veľmi malých perforácií, pórovitosti, lokalizáciu dutín, nesúrodosti materiálu a iných poškodení nedostupných z povrchu diela. V mnohých prípadoch môže dôjsť napríklad ku zhodnoteniu charakteristiky previazania – zapustenia dvoch vrstiev nanesených na sebe v rámci polychrómie, virtuálnu separáciu farebných vrstiev a segmentovanie jednotlivých vrstiev – dreva, podkladu, farebnej vrstvy, zmeranie ich hrúbky a porovnanie rozdielnej denzity vrstiev. Je možné aj pozorovanie rozličnej intenzity žiarenia v odtieňoch sivej na jednotlivých vrstvách a identifikovanie komponentov s vysokou hustotou, ako napríklad oxidov železa či kovových fólií. Zaujímavé detaily môžeme identifikovať aj medzi spodnými vrstvami podkladu – horskou vyrovnávacou kriedou a jemnou šampanskou či bolonskou kriedou, ktorá môže dosvedčiť aj prítomnosť zlátenia na vodnej báze (krieda a bolus – bolus je výrazne jemnejší než krieda) [Pyka a kol., 2010]. Efektná môže byť aj 3D vizualizácia farebnej vrstvy polychrómie. Priemyselné tomografy sa používajú aj na identifikáciu druhov drevín, merania absorpcie konsolidantov či zmeny mikroštruktúry chemickou modifikáciou. Veľkosť dátového súboru môže pri bežne dostupných počítačoch spôsobovať problémy, najmä čo sa týka dát z prístroja Nikon XT H225 ST, v ktorom sme skenovali celé diela alebo ich časť. Naše súbory z industriálneho tomografu obsahovali približne 3 GB dát, pričom RAW dáta sa pohybovali na hodnotách až 21 GB (časť rúška Krista). Aj práca s 3D zobrazením bola veľmi zdĺhavá, pretože počítač pracoval s veľkými súbormi, ktoré sa pri každej zmene načítavali pomaly – oproti medicínskemu tomografu, ktorý má menšie rozlíšenie – kvôli čomu pracuje oveľa rýchlejšie, no detaily v diele sa nezobrazia tak kvalitne. Veľkosť dát z medicínskeho tomografu vo formáte DICOM bola skoro 15× menšia než pri priemyselnom tomografe (veľkosť okolo 200 MB). Nevýhodou pri priemyselnom tomografe je veľkosť snímaného diela, kedy k dosiahnutiu detailného rozlíšenia môžeme skenovať v našich podmienkach zatiaľ len malé objekty (v prípade sochárskych diel často pracujeme s rozmernejšími dielami). Alternatívou je snímanie menších mechanicky oddelených častí z veľkorozmernej pamiatky (napríklad ruky, ktorá je odnímateľná). Ak sa dielo alebo jeho časť do prístroja rozmerovo zmestí, CT metrológia je ako jediná schopná nedeštruktívne merať v optimálnych podmienkach ako vnútornú, tak i vonkajšiu geometriu komponentov bez prerezania či inej deštrukcie objektu na mikroúrovni.

POĎAKOVANIE

Výskum by sa nemohol realizovať bez ochoty externých spolupracujúcich pracovísk a nemocníc, vďaka ktorým sme mohli vyskúšať viaceré tomografické prístroje. Poďakovanie patrí všetkým, ktorí sa na ňom podieľali, predovšetkým Ing. Tomášovi Dvorákovi, PhD., Bc. Michalovi Miklušičákovi, doc. Mgr. art. Jane Karpjakovej Balážikovej, prof. Borisovi Kvasnicovi, akad. mal., Mgr. art. Jane Duškovej, ArtD., Mgr. Radomírovi Surmovi, akad. mal. a Branislavovi Ondrekovi.

POZNÁMKY

[1] Vzorky boli vyhodnotené v spolupráci s Fakultou reštaurovania, Univerzita Pardubice v Litomyšli na Katedre chemickej technológie, výskum vykonal Ing. Karol Bayer

LITERATÚRA

- Application of Micro CT, 2016: https://www.microphotonics.com/applications-of-micro-ct/
- Comparative specifications, Purchasing and Suplay Agency, 64 slice CT scanners and 128 to 320 slice CT scanners, 2009. Dostupné z: https://manualzz.com/doc/23659076/cep08028---comparative-specifications--128-to-320-slice-c
- GHYSELS, M. *CT Scans in Art Work Appraisal*, 2005
- GUPTA, R. a kol. *Flat-Panel Volume CT: Fundamental Principles Technology and Applications*, 2008, [on-line], http://pubs.rsna.org/doi/full/10.1148/rg.287085004).
- HRUŠECKÝ, R. *Výskum aplikácie počítačovej tomografie v meraní, dizertačná práca*, Slovenská technická univerzita v Batislave, 2020.
- Informácie k softvérom na stránke [on-line]. Dostupné z: https://www.volumegraphics.com/
- Informácie k softvéru [on-line]. Dostupné z: https://download.tatramed.sk/download/manuals/TomoCon_3.0.17_svk.pdf
- KAŤUCH, P. – ŽIVČÁK, J. *Priemyselná tomografia*, 2010 [on-line]. Nový rozmer v metrológii. Dostupné z: http://web.tuke.sk/smetrologia/podklady/metro2010.pdf
- ONDREKOVÁ, D. *Využitie počítačovej tomografie v oblasti výskumu umeleckých diel pri reštaurovaní*. vyd. Bratislava: VŠVU, 2019. 190 s. ISBN 978-80-8189-033-8.
- PLESSIS, A. a kol. Comparison of medical and industrial X-ray computed tomography for nondestructive testing, in: *Nondestrucive testing and evaluation*, 2016, s. 17 – 25.
- PRÁŠILOVÁ, E. *Význam zobrazovacích metód pri tvorbe výpočetného modelu v biomechanike*, 2010/2011: VUT, Brno, s. 24.
- PYKA, G. a kol. *Micro-CT based local analysis of porous materials: potential for industrial applications*, Departement of Mechanical Engeneering, Belgium, 2010.
- ULMANN, V. *Aplikácia ionizujúceho žiarenia stránke* [on-line]. Dostupné z: http://astronuklfyzika.cz/JadRadMetody.htm#2