

PRO KONZERVÁTORY-RESTAURÁTORY FORUM FOR CONSERVATORS-RESTORERS

2023 / Vol. XIII / No. 2
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 access 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

DATA ZÍSKANÁ METODOU RENTGENOVÉ VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIE A JEJICH ÚPRAVA PRO POTŘEBY PRŮZKUMU A DOKUMENTACE DESKOVÝCH MALEB

Daniel Vavřík¹ • Václava Antušková² • Jan Dudák³
Štěpánka Chlumská² • Ivana Kumpová¹ • Radka Šefců²
Veronika Tymlová³ • Michal Vopálenský¹ • Jan Žemlička³

1 Akademie věd České republiky, Ústav teoretické a aplikované mechaniky

2 Národní galerie v Praze

3 Ústav technické a experimentální fyziky, ČVUT v Praze

Ing. Daniel Vavřík, Ph.D., vystudoval Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze. Je vedoucím Laboratoře 4D tomografie a defektoskopie Ústavu teoretické a aplikované mechaniky. Zabývá se nedestruktivní analýzou různých objektů, včetně předmětů kulturního dědictví. Vyvinul řadu nových experimentálních metod a zařízení, některé jsou patentově chráněny (vavrik@itam.cas.cz).

V minulých desetiletích se výpočetní rentgenová tomografie užívala v restaurátorské a sbírkové praxi většinou na průzkum sochařských děl spíše než pro průzkum maleb. Návazně na technické inovace se však stále více ukazuje, že tato metoda může významně přispět i k poznání vnitřní struktury maleb a jejich podložky. V případě maleb na dřevěné podložce získáváme pomocí výpočetní tomografie také přesná data o dřevní hmotě, konstrukci a technologických detailech podložky. Míra detailu u laboratorních CT umožňuje výsledky tomografických měření využít při dendrochronologickém datování. Zároveň nám při vhodném zpracování naměřená data poskytují mimořádně přesný záznam o stavu díla. Lze například dokumentovat soudržnost spojů, deformity, praskliny či druhotné zásahy v hmotě dřeva, stejně tak jako některé technologické detaily přípravy podložky a samotné malby a užitých výzdobných technik. Další zajímavou aplikací RTG výpočetní tomografie je identifikace druhu dřeviny u vzorků, které jsou díky svým malým rozměrům a tvaru nevhodné pro standardní metodu optické mikroskopie. V takovém případě nám výpočetní tomografie s mikrometrickým rozlišením může poskytnout pohled na 3D strukturu vzorku dřeva a lze tak rozpoznat některé charakteristické znaky jednotlivých dřevin. Některé ze zmíněných informací je přitom jinými metodami obtížné, někdy i nemožné získat. Potenciální přínos výpočetní tomografie pro průzkum uměleckých děl výrazně zvyšuje také práce s daty upravenými pomocí speciálních softwarových nástrojů. **Klíčová slova:** výpočetní tomografie, desková malba, identifikace dřeva, pozdní gotika

DATA OBTAINED BY X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY AND THEIR MODIFICATION FOR RESEARCH AND DOCUMENTATION OF PANEL PAINTINGS

In past decades, computed X-ray tomography was used in restoration and collection practice mostly for the investigation of sculptural works rather than for the investigation of paintings. However, following technical innovations it is becoming more and more evident that this method can also make a significant contribution to the knowledge of the internal structure of paintings and their supports. In the case of paintings on wood, computed tomography also provides precise data on the wood mass, construction and technological details of the support. The level of detail in laboratory CT scans allows the results of tomographic measurements to be used for dendrochronological dating. At the same time, when appropriately processed, the measured data provide us with an extremely accurate record of the condition of the work. For example, it is possible to document the cohesion of joints, deformations, cracks or secondary interventions in the wood mass, as well as some technological details of the preparation of the support and the painting itself as well as the decorative techniques used. Another interesting application of X-ray computed tomography is the identification of the type of wood in samples that are unsuitable for the standard method of optical microscopy due to their small

dimensions and shape. In such a case, computed tomography with micrometric resolution can provide us with a view of the 3D structure of the wood sample, and thus some characteristic features of individual types of wood species can be identified. Some of this information is difficult, sometimes even impossible, to obtain by other methods. The potential contribution of computed tomography to the study of works of art is also greatly enhanced by working with data modified by special software tools. The potential benefit of computed tomography for the investigation of works of art also significantly increases by working with data modified by special software tools.

Keywords: computed tomography, panel painting, wood identification, late gothic

Mezioborová spolupráce zpravidla přináší nové pohledy na práci zúčastněných specializací. Obdobně tomu bylo i u projektu „Mobilní zařízení určené k zobrazování a analýze vrstevnaté malby a polychromie děl starého umění“ podpořeného Ministerstvem kultury v rámci programu Národní a kulturní identity (NAKI) na němž se podíleli specialisté z Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR (ÚTAM), Ústavu technické a experimentální fyziky ČVUT (ÚTEF) a Národní galerie v Praze (NGP). Jednou z podstatných složek prací řešitelského týmu byla tomografická měření vybrané skupiny středověkých deskových maleb a dřevořezeb ze Sbírek Národní galerie v Praze. U deskových maleb byla zkoumána vrstevnatá struktura, dokumentovány technologické postupy v jednotlivých krocích, včetně dat o přípravě dřevěné podložky a užitém materiálu dřeva. Data z výpočetní tomografie byla analyzována v kontextu dalších používaných postupů, které zahrnují standardní zobrazovací a analytické metody užívané ve sbírkové praxi při restaurátorském a přírodovědném průzkumu [Albertin a kol., 2021; Legrand a kol., 2014]. Výsledky provedených analýz jsou popsány v katalogu výstavy *V hloubce a po povrchu*, pořádané v rámci řešení projektu v Národní galerii v Praze (Klášter sv. Anežky České, prosinec 2022 – duben 2023 [Chlumská a kol., 2022]). Příprava obrazových dat z tomografického zkoumání během projektu jasně ukázala potřebu následného počítačového zpracování. Práce s elektronickými daty totiž umožňuje jejich editaci nejen v komerčně dostupných programech. S ohledem na profesní složení řešitelského týmu bylo do práce s daty zahrnuto počítačové zpracování na základě nově vyvinutého softwaru, který data upravil do požadované prostorové hladiny. Impulsem pro takovou úpravu dat byly snímky získané při průzkumu deskových maleb se značnou deformitou podložky. Díky projektu tak byla vyvinuta zcela nová metoda, založená na unikátním zpracování RTG tomografických dat. Následující text na vybraných příkladech stručně shrnuje možné přínosy tohoto nového softwarového nástroje [Vavřík a kol., 2023].

RTG VÝPOČETNÍ TOMOGRAFIE DESKOVÝCH MALEB

Pomocí rentgenové výpočetní tomografie (CT) je možné provést kompletní 3D rekonstrukci analyzovaného objektu, čímž se překoná důležité omezení rentgenografie, tj. překrývání prvků náležejících různým vrstvám objektu ve snímku (viz například parketaž či jiné konstrukční prvky desky). Tato metoda je proto velmi vhodná všude tam, kde je třeba dokumentovat vnitřní strukturu společně s údajem o konkrétní prostorové hladině. Jednotlivé řezy mohou přesně zaznamenat stav předmětu v jednotlivých vrstvách, s možností zobrazení ve třech základních orientacích – frontální (předozadní), příčná (vodorovná neboli transversální) a boční (pravolevá, v medicíně označovaná jako sagitální). U deskové malby tak získáváme sadu dat o podložce a její úpravě, a v omezené míře i o jednotlivých barevných vrstvách – limitujícím faktorem je dosažitelné rozlišení tomografických dat. Data z CT s vysokým rozlišením (mikro-CT) lze využít také k získání podkladů pro datování deskových maleb na základě dendrochronologie [Domínguez-Delmás a kol. 2021; Kyncl, 2022] v případech, že hrana obrazu není bez dodatečných úprav pro dendrochronologii vhodná nebo viditelná (degradace dřevní hmoty, barevné vrstvy, konstrukční prvky atd.). Je třeba mít však na paměti, že její využití je limitováno velikostí a orientací zkoumaného objektu – pro dataci je nutné mít dostatečný počet letokruhů – dílo nesmí být příliš malé.

Hodnotíme-li efektivitu průzkumu na CT pro konkrétní umělecký předmět, hraje zásadní roli kromě konzervátorských hledisek také výkon přístroje a dosažitelné rozlišení. V závislosti na konstrukci CT skeneru (tomografu) a velikosti objektu se rozlišení snímků tomografie deskových maleb může pohybovat od desítek [Domínguez-Delmás a kol., 2021] až do stovek mikrometrů [Montaina a kol., 2021]. Tloušťka podkladů deskových obrazů se obvykle pohybuje od desítek po nižší stovky mikrometrů, barevné vrstvy malby mívají tloušťku v řádu jednotek až desítek mikrometrů. A je třeba vždy posuzovat, zda je využití této specializované metody pro daný objekt přínosné v kontextu dalších metod užívaných v restaurátorské praxi.

Řešitelský tým projektu pracoval s tomografickým skenerem instalovaným v laboratoři výpočetní tomografie v Centru Telč (CET), které je součástí Ústavu teoretické a aplikované mechaniky AV ČR. Tato laboratoř umožňuje zkoumat různé objekty s velkou variabilitou geometrie skenování [Fíla a kol., 2015]. Dosažitelné prostorové rozlišení závisí především na rozměrech zkoumaného objektu – u vzorků o velikosti několika milimetrů jsou to mikrometry, u rozměrných uměleckých děl je k dispozici rozlišení na úrovni 200 mikrometrů (medicínské přístroje mají rozlišení typicky několikanásobně horší). Pro zde zkoumaná díla byl použit detektor o velikosti aktivní plochy 41 × 41 cm, obvykle se osa rotace objektu umísťuje shodně s osou detektoru, v případě rozměrnějších děl se pak tato osa posouvá ke kraji detektoru. Lze tak efektivně pracovat s až 2× širším detektorem, byť s náročnějšími postupy. Podobně pro předměty vyšší než rozměr detektoru se tomografické skenování realizuje postupně, spolu se svislým posuvem detektoru a rentgenky. Pro tomografickou rekonstrukci je třeba zaznamenat tisíce rentgenových snímků (projekcí), které se pořizují během otáčení objektu vůči RTG zobrazovacímu detektoru. Zkoumané objekty byly po celou dobu měření ve speciálních ochranných obalech. Na základě projekcí se vytvoří trojrozměrný virtuální model vnitřní struktury objektu, který se skládá z voxelů (objemových pixelů). Hodnota voxelu představující hustotu objektu v daném místě zahrnuje jak kompaktnost materiálu, tak jeho chemické (prvkové) složení. Oba možné důvody zobrazované hustoty je možné rozlišit pomocí počítačové tomografie na dvou energiích (Dual energy CT – DECT) [Vavřík a kol., 2016].

Tomograficky vytvořený objem se obvykle podrobně analyzuje zobrazením jeho rovinných řezů. Pokud je hustota materiálu v daném místě nižší, bude toto místo v řezu tmavší a naopak. Pokud analyzovaný objekt není rovinný, mohou být zkoumané prvky ve vybraném řezu viditelné jen částečně. V takovém případě je nutné vyhodnotit několik sousedních řezů, abychom získali úplný obraz o zkoumaném prvku. U deskových obrazů jsou ovšem běžné výrazné deformace dřevěné desky. Tomografický model lze ale „narovnat“ pomocí speciálního softwaru, jak bylo zmíněno výše.

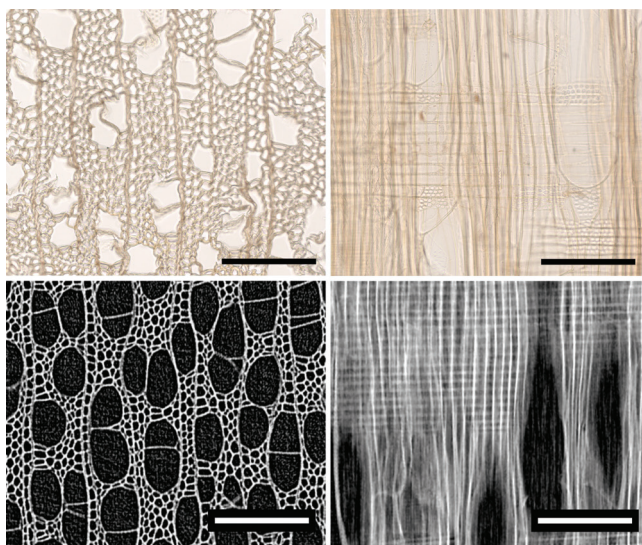
URČOVÁNÍ DRUHU DŘEVA POMOCÍ MIKRO-CT

Výpočetní tomografie může nacházet uplatnění i při dalším úkonu spojeném s průzkumem deskových obrazů, a tím je identifikace dřeva. Dřevo lze určit na základě analýzy charakteristických znaků v jeho struktuře. Ta je obvykle prováděna metodou optické mikroskopie, příp. elektronové mikroskopie [Antušková, 2017]. Mikroskopická analýza vyžaduje odběr hranolu o velikosti ideálně alespoň 4 × 4 × 8 mm. Ze vzorků se následně připravují mikroskopické preparáty – tenké řezy v příčném, tangenciálním a radiálním směru pro pozorování v procházejícím světle. U historických artefaktů je však v mnoha případech problematické vzorek zmíněných rozměrů z díla odebrat.

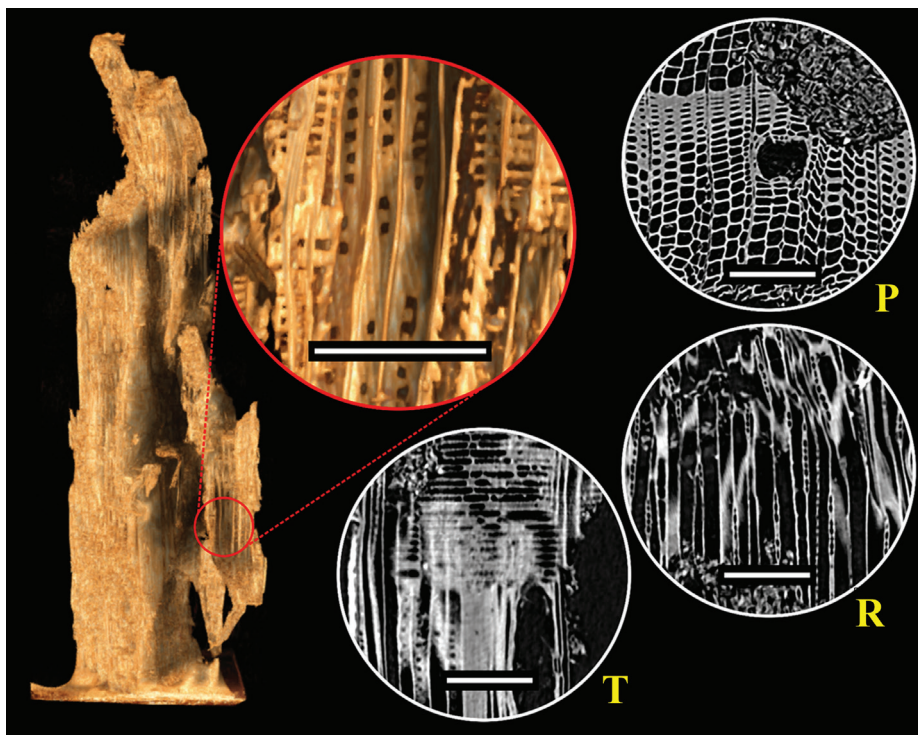
V takových případech se RTG mikrotomografie (mikro-CT) stává neocenitelným nástrojem umožňujícím analýzu mikrostruktury dřeva. Laboratorní tomografické skenery dostupné v mikro-CT laboratoři Ústavu technické a experimentální fyziky ČVUT v Praze umožňují rutinně snímat vzorky zmíněných rozměrů s rozlišením na úrovni jednotek mikrometrů [Dudák a kol., 2022]. Umožňují ale dosáhnout rozlišení pod úrovní jednoho mikrometru v případě vzorků do velikosti cca 2 mm [Dudák a kol., 2017]. Oproti optické mikroskopii nevyžaduje mikro-CT analýza žádnou zvláštní přípravu vzorku, není vázána na konkrétní minimální rozměry a je vůči vzorku zcela nedestruktivní. Roviny konvenčně používané pro identifikaci druhu dřeva jsou nalezeny a zobrazeny virtuálně pomocí získaného 3D voxelového modelu. Získaný 3D model otevírá mnohem širší a flexibilnější možnosti ve zkoumání struktury měřeného vzorku. Po provedení analýzy lze snímaný vzorek použít pro další analýzy, například elektronovou mikroskopii.

Mikro-CT laboratoř ÚTEF vypracovala ve spolupráci s NGP mikrotomografický atlas mapující 3D mikrostrukturu středoevropských dřevin běžně používaných při tvorbě uměleckých děl. Vybrané standardy byly snímány s rozlišením 1,5 μm, což je rozlišení blízké se parametřům optické mikroskopie. Konkrétně byly snímány buk, dub, topol, ořech, javor, olše, lípa, jeřáb břek, hrušeň, smrk, jedle a borovice. Obr. 1 srovnává zobrazení mikrostruktury dřeva pomocí optické mikroskopie (nahore) a mikro-CT (dole) na příkladu topolového dřeva.

Získaná data mohou sloužit jako reference pro vzorky odebrané z děl, kde je druh dřeviny neznámý. Často se mikro-CT měření provádí na fragmentech, jejichž rozměry nepřesahují 4 mm. Limitem metody v takovém případě není dosahované prostorové rozlišení, ale fakt, že na extrémně malých vzorcích nemusí být nalezen dostatek charakteristických znaků nutných k jednoznačné identifikaci dřeva. I tak ale metoda poskytuje cenné informace a doplňuje komplexní obraz znalostí získaný kombinací různých výzkumných postupů.



Obr. 1 Mikrostruktura topolového dřeva v příčném a radiálním řezu zobrazená metodou optické mikroskopie (nahore) a mikro-CT (dole). Měřítka v jednotlivých obrázcích odpovídá 200 μm / *The microstructure of poplar wood in transverse and radial section, imaged by optical microscopy (top) and micro-CT (bottom). The scale bar in each image corresponds to 200 μm*



Obr. 2 Trojrozměrné CT zobrazení (vlevo) a virtuální řezy v příčné (P), radiální (R) a tangenciální (T) rovině (vpravo) fragmentem smrkového dřeva odebraným z deskové malby *Madony roudnického typu* (Monogramista BD, Čechy 1513). Vzorek o rozměrech cca $4,5 \times 2 \times 1$ mm byl nasnímán s rozlišením $1,37 \mu\text{m}$. Měřítka odpovídají $200 \mu\text{m}$ / Three-dimensional CT imaging (left) and virtual sections in the transverse (P), radial (R) and tangential (T) planes (right) of a fragment of spruce wood taken from a panel painting of the *Madonna of the Roudnice type* (Monogramista BD, Bohemia 1513). A sample measuring approximately $4.5 \times 2 \times 1$ mm was imaged with a resolution of $1.37 \mu\text{m}$. Scale bars correspond to $200 \mu\text{m}$

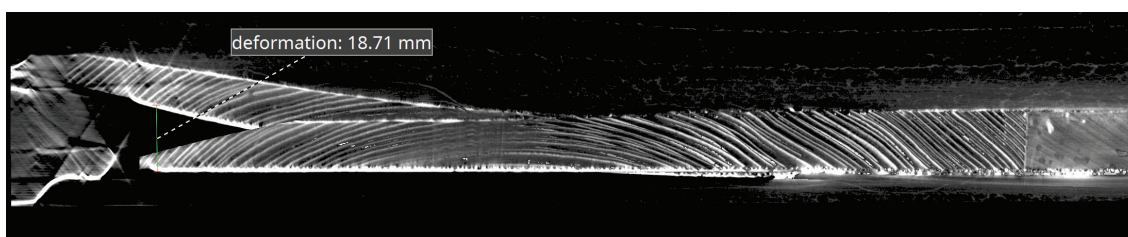
Obr. 2 zobrazuje 3D model a tři virtuální řezy v příčné (kolmo k ose kmene), radiální (prochází osou kmene) a tangenciální rovině (podél osy kmene, tečná k letokruhu), získané mikro-CT měřením fragmentu smrkového dřeva odebraného z deskové malby *Madony roudnického typu* (Monogramista BD, Čechy 1513, NGP, inv. č. O 7101). Rozměry vzorku byly cca $4,5 \times 2 \times 1$ mm a byl nasnímán s rozlišením $1,37 \mu\text{m}$.

SOFTWARE PRO „NAROVNÁNÍ“ A MOŽNOSTI JEHO VYUŽITÍ NA ZÁKLADĚ PŘÍKLADŮ ZKOUMANÉHO FONDU

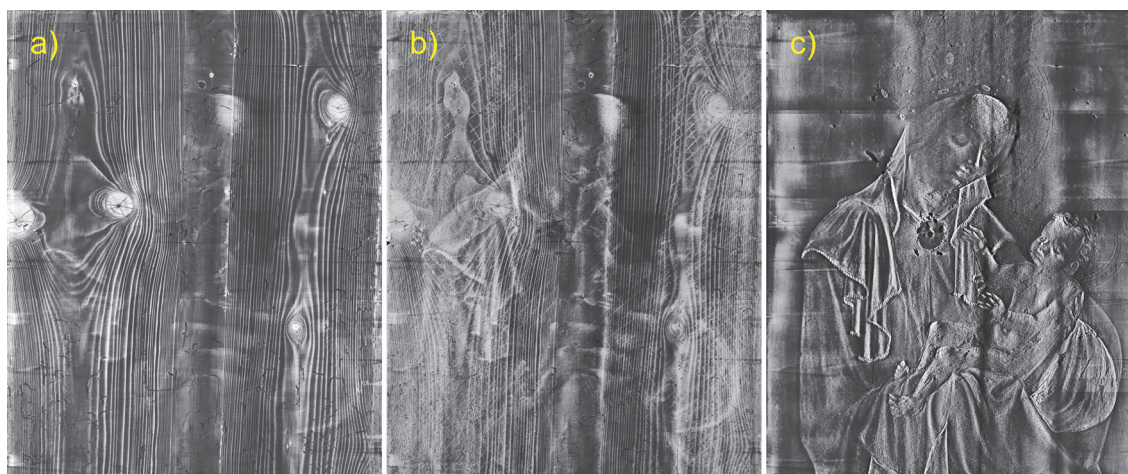
Komplexní ukázkou šíře dat získaných při průzkumu pomocí mikro-CT poskytují výsledky snímání deskového obrazu *Madony roudnického typu* (Monogramista BD, Čechy 1513, olejová tempera, jedlové, smrkové a lipové dřevo, zčásti potaženo plátnem, $93,5 \times 81,5$ cm, NGP) [Chlumská a kol., 2022]. Deska je osazená v původním malovaném rámu, rubovou stranu zdobí jednoduchá malba imitující kamennou desku (mramorování). Deska je složená ze čtyř kusů dřeva spojených lepením. Na lícové straně byla deska opatřena plátnem, na takto zpracovaný povrch byl nanesen klišo-křídový podklad pod malbu o tloušťce až 1 mm. Výsledná malba byla rozvržena v podkresbě.

Zlacené pozadí je zdobeno dekorativními technikami. V minulosti prošly deska i rám řadou zásahů [Hamsík, 1958]. Po celé délce desky je patrný průhyb.

Z hlediska tomografie má obraz o velikosti $93,5 \times 81,5$ cm hraniční rozměry. Osu detektoru bylo nutné posunout až na jeho okraj a ještě rozšířit rekonstruovaný prostor. Výsledkem je kvalitní tomografické zobrazení desky, rám je na svislých okrajích hůře definovaný. Rentgenka byla provozována s urychlovacím napětím 100 kV. Výsledný objem má velikost $4836 \times 742 \times 7709$ voxelů s rozlišením $127 \mu\text{m}$, a je složený ze sedmi částečných rekonstrukcí (CT data byla získána postupně, s posouváním podél výšky obrazu). S ohledem na značnou deformaci desky bylo nutné realizovat virtuální narovnání tomografického objemu, aby bylo možné zobrazit jednotlivé přípravné vrstvy v celé ploše malby. Virtuální narovnání desky je schematicky naznačeno na obr. 3 (podrobný popis metody viz [Vavřík a kol., 2023]), kde je vidět porovnání desky prohnuté o téměř 2 cm vůči narovnané. Je třeba doplnit, že narovnání nemohlo být provedeno zcela dokonale s ohledem na nesteromernou tloušťku malby v ploše desky. Algoritmus nebyl uplatněn na rám, především s ohledem na extrémně velký objem dat (kompletní objem představuje 28 mld. voxelů).



Obr. 3 Snímek z mikro-CT obrazu *Madona roudnického typu* (vodorovný řez) spolu s ukázkou virtuálního narovnání desky / Micro CT image of the *Madonna of Roudnice type painting* (horizontal section) with a demonstration of virtual straightening of the panel



Obr. 4 Frontální rovina z mikro-CT obrazu *Madona roudnického typu*; obr. 4a dokumentuje konstrukci desky složené z dílů, ve středu lipové dřevo s kresbou odlišnou od dřeva jedle a smrku. Na obr. 4b je zřetelně patrné celoplošné zdrsnění desky před nalepením plátna. Obr. 4c mapuje celoplošný plátěný potah desky, rozlišení snímku umožňuje přesnou dokumentaci vazby / *Frontal plane from the micro CT image of the Madonna of the Roudnice type, Fig. 4a documents the construction of the panel painting composed of more parts, in the centre is lime wood with a pattern different from the wood of fir and spruce. In Fig. 4b, the full-surface roughening of the panel is clearly visible before the canvas was glued on. Fig. 4c maps the full covering of the panel with canvas, the resolution of the image allows accurate documentation of the binding*

Po virtuálním narovnání desky lze přehledně dokumentovat její jednotlivé vrstvy. Na obr. 4a je patrné její sestavení ze čtyř prken, zároveň je zřetelná úroveň napadení dřevokazným hmyzem – před narovnáním není část desky v jednom zobrazení vidět. Další praktickou ukázkou využití virtuálního narovnání poskytuje dokumentace vrstvy zachycující úpravu podložky před nalepením plátna a vrstvy s plátěným potahem. Na obr. 4b je ukáзка křížové ryté šrafury, vytvořené kvůli lepší adhezi plátna lepeného na desku. Na obr. 4c je patrné, že viditelnost jednotlivých prvků závisí na konkrétním nastavení jasů a kontrastu i na konkrétní poloze zobrazované tomografické vrstvy. Jako tmavé skvrny se jeví některé dřívější restaurátorské zásahy, při kterých byly použity ve větší míře pigmenty na bázi lehkých prvků místo olovnaté běloby, která je typická pro středověkou malbu. Z podélného řezu (z poloviny zobrazen na obr. 3) můžeme vyčíst konstrukci podložky, včetně detailů užití různých typů dřev a směru jejich letokruhů. Oproti běžné praxi se u této desky projevuje jistá technologická nedůslednost, která se nejspíše spolupodílela na pozdější výrazné deformitě podložky spolu s klimatickými podmínkami a poškozenou adjustací [Hamsík, 1958]. Na snímcích z mikro-CT jsou zřetelně patrná poškození podložky v detailu, přesahující jiné metody. Lze například v jednotlivých hladinách zobrazit i přesně změřit vlasevité trhliny v hmotě dřeva. Stejně tak se zřetelně zobrazují rozdílné morfologické znaky užitých dřevin (obr. 4a). Užití různých druhů dřev bylo potvrzeno i laboratorním průzkumem [Antušková, 2022]). K identifikaci dřeva byla vzhledem k velikosti vzorků využita kombinace CT realizované na pracovišti ÚTEF a skenovací elektronová mikroskopie v laboratoři NGP. Díky kombinaci těchto metod bylo možné jednotlivá prkna určit jako smrk – jedle – lípa – smrk. Zároveň byla provedena analýza CT dat z příčných řezů dendrochronologem, který stanovil u dílů desky z jehličnatých dřev datum skácení po roce 1505 [Kyncl, 2022]. Tato datace je velmi cenným zjištěním, neboť je v souladu s přímým datováním díla letopočtem 1513 na zlačeném pozadí mariánského obrazu.

Jiný příklad využití softwaru pro virtuální narovnání dat poskytuje analýza snímků získaných průzkumem deskové malby z poloviny 15. století – *Assumpty Lannovy* (jižní Čechy, kolem 1450, tempera, borovicové dřevo potažené plátnem, 41,5 × 31,5 cm, NGP, inv. č. O 495). Obraz s malovaným rámem je vyroben z jednoho kusu profilovaného dřeva, zpevněného na zadní straně a při horním okraji vloženými svlaky a lištami [Chlumská a kol., 2022] (obr. 5a, b, c).

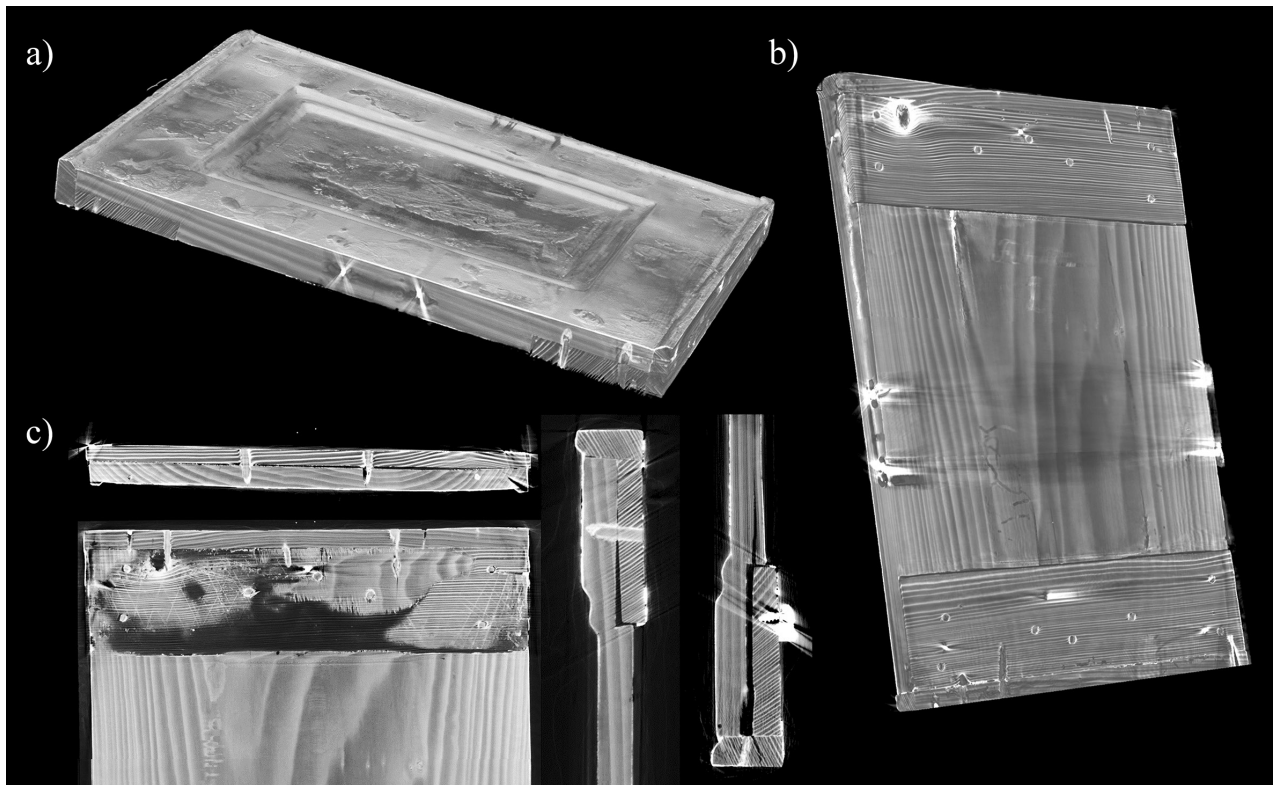
Na mikro-CT snímcích (obr. 5 a 6) jsou jasně patrné spojovací prvky (lepení, dřevěné kolíčky, kovové spojovací prvky), míra deformity i hranice jednotlivých technologických vrstev. Viditelné je například zdrsnění povrchu desky rytou šrafurou před slepením jednotlivých dílů konstrukce

desky nebo zdrsnění plochy před nalepením plátna. Tento technologický detail, se na RTG snímcích nezobrazoval [Chlumská a kol, 2022]. Stejně tak jsou na snímcích mikro-CT dobře patrné prostorové hladiny místné pastózní malby rámových figur. V průběhu staletí došlo ke „zkroutení“ desek a částečné deformitě spojů. Tyto detaily umožňuje CT přesně lokalizovat. U *Assumpty Lannovy* bylo třeba provést pouze dvě tomografie horní a dolní části, které byly posléze spojeny do jednoho tomografického objemu. S ohledem na zlepšení možnosti odlišení různých materiálů byla použita technika DECT, s měřením při dvou různých urychlovacích napětích rentgenky – 80 a 180 kV. Celkově se tak realizovala čtyři tomografická měření. Na obr. 5a je vidět trojrozměrný tomografický model díla, na obr. 5b je patrná konstrukce desky na rubové straně. Na obr. 5c jsou další konstrukční detaily dokumentující spoje svlaků a lišt stejně tak jako poruchy ve spojích.

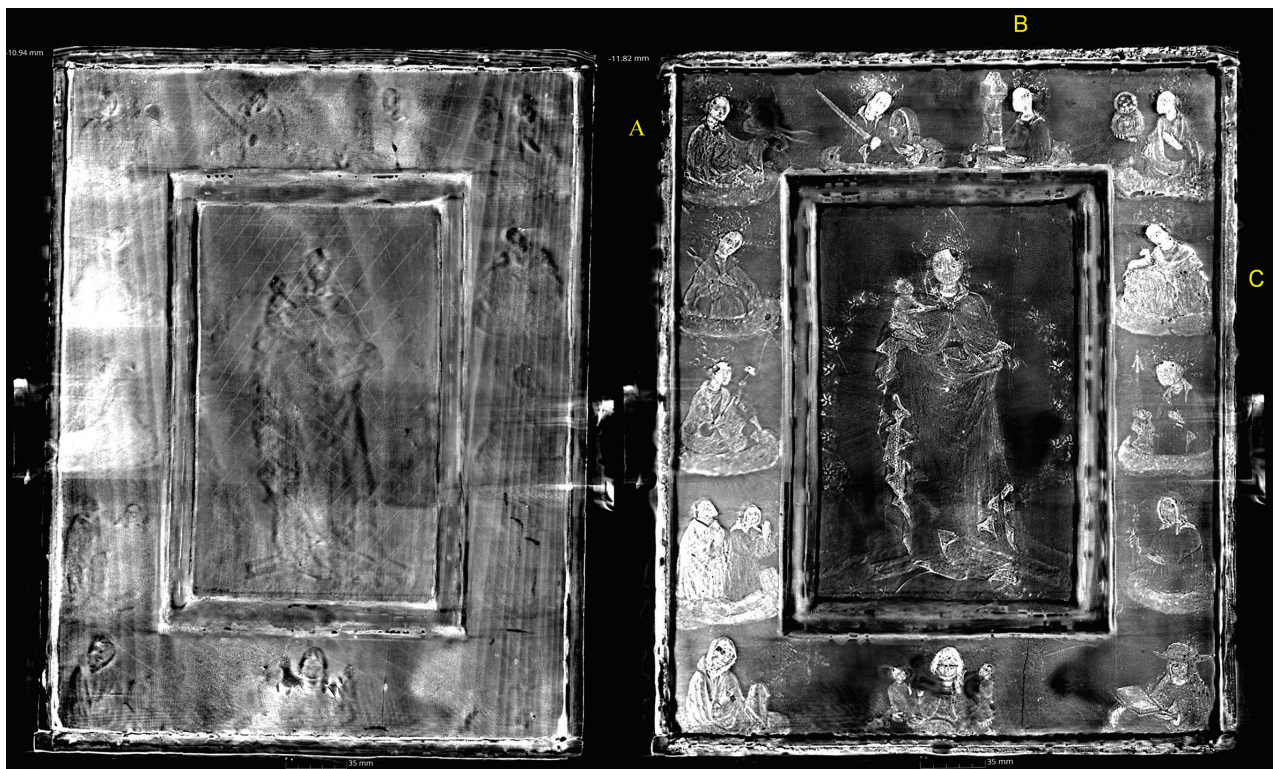
Virtuálně byl narovnan celek včetně rámu. Výsledky jsou patrné na snímcích 6a, b. Na obr. 6a se zřetelně zobrazuje zdrsnění povrchu užitě v celé ploše před nalepením plátna, na obr. 6b pak vlastní malba. V tomto případě byla použita technika DECT pro zdůraznění těžších prvků. Písmenky A, B, C jsou označeny tři polopostavy světic, jejichž pláště se v tomografii jeví v různých odstínech šedé, i když ve viditelném světle nelze téměř žádný rozdíl v odstínu postřehnout. Toto zjištění bylo ověřováno v NGP pomocí mobilní Ramanovy a XRF spektroskopie která prokázala odchylky v materiálovém složení těchto částí malby [Chlumská a kol., 2022, Vavřík a kol., 2023]. Deska je vyrobena z borovicového dřeva, CT data byla poskytnuta pro dendrochronologické datování. Dataci pomocí dendrochronologie však, i přes vysokou kvalitu dat, neumožňuje nízký počet (23) letokruhů užitého kusu dřeva [Kyncl, 2022]. V případě obdobně konstrukčně řešených deskových maleb nelze ovšem data pro dendrochronologickou analýzu získat jinými zobrazovacími metodami.

ZÁVĚR

V předložené práci byla ukázána nezastupitelnost mezioborové spolupráce při průzkumu deskových maleb. Tomografické snímky poskytly podrobné údaje o konstrukci desky, použitých dřevinách, poruchách, o stavu lepených spojů a o přípravných vrstvách. Zároveň upozornily na rozdíly v použitých pigmentech, které nejsou z optických snímků přímo patrné. Tyto rozdíly byly následně analyzovány metodami Ramanovy a XRF spektroskopie, které odchylky v materiálovém složení potvrdily a kvantifikovaly. Tomografická data zároveň poskytla kvalitní podklady pro dendrochronologickou dataci, nebylo tak pro tento účel nutné odstraňovat povrchové vrstvy, které jinak standardní optické snímkování znemožňují.



Obr. 5 Snímek mikro CT obrazu Assumpta Lannova, konstrukční detaily desky viditelné na snímcích příčných, podélných a svislých řezů / Micro CT image of the panel painting Assumpta Lannova, structural details of the panel are visible in the images of the transverse, longitudinal and vertical sections



Obr. 6 Frontální rovina z mikro-CT obrazu Assumpta Lannova – data po úpravě v softwaru pro virtuální „narovnání“. Obr. 6a dokumentuje zdrsnění desky před nalepením plátna křížovou šrafurou. Obr. 6b díky virtuálnímu „narovnání“ přehledně mapuje všechny části obrazu, polopostavy na rámu i obraz Assumpty v centrální části. / Frontal plane from the micro CT image of the Virgin and child on the crescent moon from the collection of Lanna – data after modification in the software for virtual "flattening". Fig. 6a documents roughening of the panel by engraved cross-hatching before the canvas was glued on. Fig. 6b thanks to virtual "flattening" clearly reveals all parts of the painting, half-figures on the frame and the image of the Virgin in the central part.

LITERATURA

- ANTUŠKOVÁ, V. Využití mikroskopických technik při identifikaci dřeva. In CHLUMSKÁ, Š. – ŠEFCŮ, R. (eds.) *Umění a přírodní vědy*. 2017, s. 49–60. ISBN 978-80-7035-668-5.
- ANTUŠKOVÁ, V. Nепublikovaná laboratorní zpráva č. 13/66, 2022, archiv Chemicko-technologické laboratoře, Národní galerie v Praze.
- ALBERTIN, F. – RUBERTO, C. – CUCCI, C. a kol., „Ecce Homo“ by Antonello da Messina, from non-invasive investigations to data fusion and dissemination. *Scientific Reports*. 2021, vol. 11, 15868.
- DOMÍNGUEZ-DELMÁS, M. – BOSSEMA, F. G. – DORSCHIED, J. – COBAN, S. B. – HALL-AQUITANIA, M. – BATENBURG, K. J. – HERMENS, E. X-ray computed tomography for non-invasive dendrochronology reveals a concealed double panelling on a painting from Rubens' studio. *PLoS ONE*. 2021, 16 (8), e0255792.
- DUDÁK, J. – ŽEMLIČKA, J. – MRZILKOVÁ, J. – ZACH, P. – HOLCOVÁ, K. Applicability of Large-Area Single-Photon Counting Detectors Timepix for High-Resolution and High-Contrast X-Ray Imaging of Biological Samples, *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2022, vol. 69 (4), s. 753–760.
- DUDÁK, J. – KARCH, J. – HOLCOVÁ, K. – ŽEMLIČKA, J. X-ray imaging with sub-micron resolution using large-area photon counting detectors Timepix. *Journal of Instrumentation*. 2017, vol. 12 (12), s. C12024–C12024.
- HAMSÍK, M. Nепublikovaný restaurátorský protokol č. 109, 1958, archiv Restaurátorského oddělení, Národní galerie v Praze.
- CHLUMSKÁ, Š. – ŠEFCŮ, R. – ANTUŠKOVÁ, V. (eds.) *Vhloubce a po povrchu / In Depth and on the Surface*. Národní galerie v Praze, Praha, 2022. ISBN 978-80-7035-810-8.
- FÍLA, T. – KUMPOVÁ, I. – JANDEJSEK, I. – KLOIBER, M. – TUREČEK, D. – VAVŘÍK, D. Utilization of dual-source X-ray tomography for reduction of scanning time of wooden samples. *Journal of Instrumentation*. 2015, 10 (5), C05008–C05008.
- KYNCL, T. Možnosti dendrochronologického datování a počítačová tomografie. In: CHLUMSKÁ, Š. – ŠEFCŮ, R. – ANTUŠKOVÁ, V. (eds), *Vhloubce a po povrchu / In Depth and on the Surface*. Národní galerie v Praze, Praha, 2022, s. 68–73. ISBN 978-80-7035-810-8.
- LEGRAND, S. – VANMEERT, F. – VAN DER SNICKT, G. – ALFELD, M. – DE NOLF, W. – DIK, J. – JANSSENS, K. Examination of historical paintings by state-of-the-art hyperspectral imaging methods: from scanning infra-red spectroscopy to computed X-ray laminography. *Heritage Science*. 2014, vol. 2, 13.
- MONTAINA, L. – LONGO, S. – GALOTTA, I. G. – TRANQUILLI, G. – SACCUMAN R. – CAPUANI, S. Assessment of the Panel Support of a Seventeenth-Century Dutch Painting by Clinical Multislice Computed Tomography. *Studies in Conservation*. 2021, 66 (3), s. 174–181.
- VAVŘÍK, D. – JAKOUBEK, J. – KUMPOVÁ, I. – PICHOTKA, M. Dual energy CT inspection of a carbon fibre reinforced plastic composite combined with metal components. *Nondestructive Testing and Evaluation*. 2016, 6, s. 47–55.
- VAVŘÍK, D. – ANTUŠKOVÁ, V. – CHLUMSKÁ, Š. – KUMPOVÁ, I. – ŠEFCŮ, R. – VOPÁLENSKÝ, M. Non-destructive exploration of Late Gothic panel painting using X-ray tomography and flattening of the reconstructed data. *The European Physical Journal Plus*. 2023, DOI: 10.1140/epjp/s13360-023-04212-w.