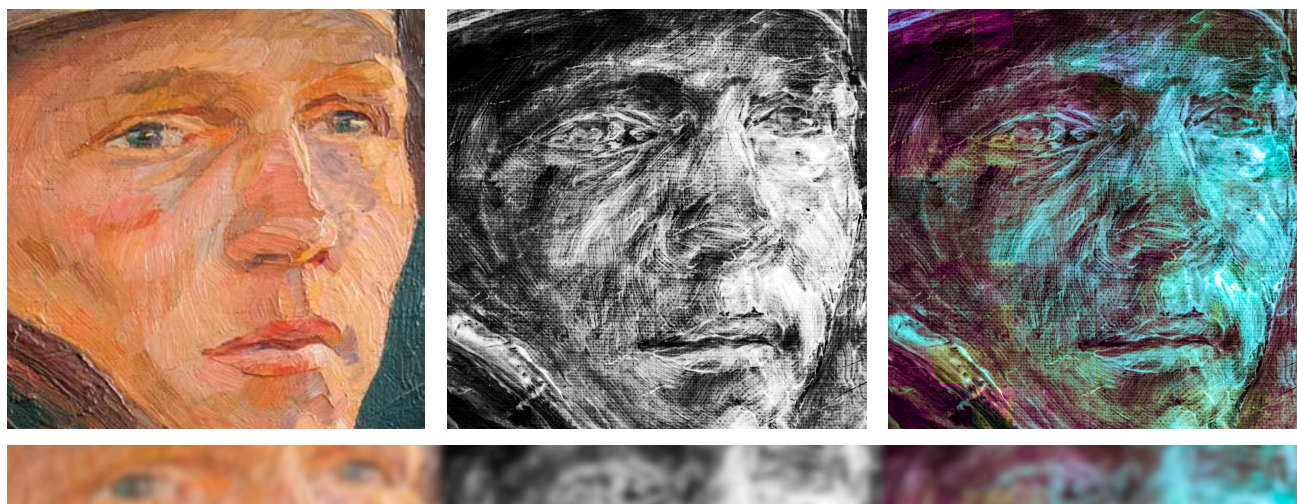


ATELIÉR RESTAUROVÁNÍ VÝTVARNÝCH DĚL MALÍŘSKÝCH
A POLYCHROMOVANÉ PLASTIKY



APLIKACE NOVÝCH NEINVAZIVNÍCH PRŮZKUMNÝCH METOD V
RESTAURÁTORSKÉM KOMPARATIVNÍM PRŮZKUMU A EFEKTIVNÍ VYUŽITÍ
VÝSLEDKŮ PRO RESTAUROVÁNÍ UMĚLECKÝCH DĚL

RENTGENOVÁ TRANSMISNÍ MIKORADIOGRAFIE S POUŽITÍM PÍXELOVÝCH DETEKTORŮ WIDEPÍX



DISERTAČNÍ PRÁCE

MgA. Jiří Lauterkranc

Vedoucí práce:
doc. MgA. Adam Pokorný, Ph.D.

ŠKOLA: Akademie výtvarných umění v Praze

OBOR: Restaurování výtvarných děl

STUDENT: MgA. Jiří Lauterkranc

VEDOUCÍ PRÁCE: doc. MgA. Adam Pokorný, Ph.D.

ODBORNÝ KONZULTANT: Ing. Josef Uher, Ph.D.

OPONENT DIS. PRÁCE: 1 doc. Ing. Carlos Granja, Ph.D.

OPONENT DIS. PRÁCE: 2 Ing. Dušan Perlík

OPONENT DIS. PRÁCE: 3 ak. mal. Zora Grohmanová

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem *Aplikace nových neinvazivních průzkumných metod v restaurátorském komparativním průzkumu a efektivní využití výsledků pro restaurování uměleckých děl malířských* vypracoval samostatně a uvedl jsem úplný výčet použitých pramenů a citací, které jsou uvedeny v příloženém seznamu.

V Praze dne 20.2.2019

MgA. Jiří Lauterkranc



OBSAH

ABSTRAKT	5
1 ÚVOD	6
2 NEINVAZIVNÍ PRŮZKUM UMĚLECKÝCH DĚL	7
2.1 Historie a metodika forenzního průzkumu uměleckých děl	7
2.2 Princip využití specifických oblastí elektromagnetického spektra	8
2.3 Přístup k různým metodám průzkumu uměleckých děl	17
3 ÚVOD DO TECHNOLOGIE	19
3.1 Princip vzniku rentgenového obrazu	19
3.2 Možnosti aplikace zobrazovacích detektorů	20
4 PÍXELOVÉ DETEKTORY	24
4.1 Pixelové detektory a vývoj aparatury pro průzkum uměleckých děl	24
4.2 Historie pixelových detektorů MediPix	24
4.3 Technické parametry detektorů MediPix	25
4.4 Velkoformátové zobrazovací detektory WidePix	26
5 POTENCIÁL PRO PRŮZKUM UMĚLECKÝCH DĚL MALÍŘSKÝCH	27
5.1 Rentgenová mikroradiografie s vysokým rozlišením (HRXR)	29
5.2 Energeticky citlivá rentgenová mikroradiografie (MRXR)	31
5.3 Energeticky citlivá rentgenová laminografie (MRXL)	34
5.4 Rentgenové kukátko (X-ray Spyglass)	34
5.5 Fingerprinting	35
5.6 Big Data a neuronové sítě	35
6 VÝVOJ APARATURY PRO RADIOGRAFICKÉ ZOBRAZOVÁNÍ POMOCÍ DETEKTORŮ WIDEPIX	37
6.1 Technické požadavky a schématická řešení	38
6.2 RToo 2D	39
6.3 RToo 3D	40
6.4 RToo 3D Multimodal	43
7 TESTOVÁNÍ VZORKŮ PRO KALIBRACI MRXR	45
7.1 Výsledná zpráva z měření kalibračních vzorků	47
7.2 Další měření kalibračních vzorků	50
8 HRXR A MRXR- PŘÍKLAD ANALÝZY OBRAZU NA PLÁTĚNÉ PODLOŽCE	52
8.1 Horký letní večer v lese	52
9 PÍXELOVÉ DETEKTORY V RESTAURÁTORSKÉ PRAXI	57
9.1 Komparativní restaurátorský průzkum obrazu La Crau s pohledem na Montmajour	57

9.2 Ukázka mikroradiografie s vysokým rozlišením - malba na papírové podložce -----	64
9.3 Využití výsledků HRXR pro restaurování deskového obrazu Madona s Ježíškem -----	66
 10 VYHODNOCENÍ MOŽNOSTÍ RENTGENOVÉ MIKROKADIOGRAFIE A MATERIÁLOVĚ CITLIVÉ RADIOGRAFIE S POUŽITÍM PÍXELOVÝCH DETEKTORŮ WIDEPÍX PRO RESTAURÁTORSKÝ KOMPARATIVNÍ PRŮZKUM UMĚLECKÝCH DĚL -----	69
 11 OBRAZOVÁ DOKUMENTACE -----	72
11.1 Radiografické snímky použité pro potřeby této práce - využití technologie HRXR a MRXR -----	72
11.1.1 Portrét muže v klobouku -----	72
11.1.2 Na mostě -----	75
11.1.3 La Crau s pohledem na Montmajour -----	79
11.1.4 Horký letní večer v lese -----	83
11.1.5 Portrét muže v klobouku (2) -----	85
11.1.6 Madona s Ježíškem -----	87
 12 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY, INTERNETOVÝCH ZDROJŮ A POZNÁMEK POD ČAROU -----	88
 13 SEZNAM POUŽITÝCH OBRAZOVÝCH PŘÍLOH -----	90

ABSTRAKT

Základním motivačním faktorem pro analytické zkoumání výtvarných uměleckých děl může být buďto potřeba objasnění neznámých skutečností, které následně využíváme pro další praktické činnosti, jako je například restaurování a péče o kulturní dědictví, nebo můžeme výsledky aplikovat v rámci dalšího teoretického bádání se zaměřením na provenienční a technologickou příslušnost díla. Samotná potřeba poznávání může být samozřejmě motivována pouze procesem konstruktivního logického uvažování, co se však umění týče, tak jeho teoretická či praktická analýza bývá zahájena v momentě potřeby sledování dalších cílů. Umění jako takové totiž může být v některých svých rovinách považováno za samostatný prostředek k popisu analyzovaného okolního světa podobně jako třeba matematika. Potřeba jeho zkoumání tedy přichází buď v momentě potřeby rekonstrukce procesu jeho vzniku, nebo v případě objasňování jeho významu.

„Máme si za cíl svého usilování, cíl na nikom a ničem nezávislý, zvolit poznávání pravdy, nebo řečeno skromněji, chápání poznatelného světa konstruktivním logickým uvažováním? Anebo se má takováto snaha o rozumné poznání podříditi nějakým jiným cílům, třeba praktickým? Pouhé uvažování nevládne prostředkem, jak rozřešit tuto otázku. Jestliže ji ovšem vyřešíme, nemálo to ovlivní naše myšlení a naše hodnocení světa, za předpokladu, že bude mít povahu neochvějného přesvědčení. Dovolte mi tedy, abych se vyznal, že pro mne usilovat o poznání je jedním z takových na nikom a na ničem nezávislých cílů, které myslící člověk prostě musí mít, jinak mu připadá nemožné vědomě přitakávat životu“¹

Těchto pár vět vyňatých z textu Alberta Einsteina s příznačným názvem *O ponižování vědeckého člověka*, stručně definuje principiální proces myšlení, který je do značné míry sebe popisný, bez obdobného analyzačního postupu by totiž ani nemohl být sepsán. Einstein zde tedy popisuje potřebu svobodného ničím neovlivňovaného způsobu poznávání na základech logického uvažování. Samozřejmě pokud se jedná o přírodní vědy, fyziku a zákony fungování vesmíru, dají se z dnešního pohledu takové definice považovat za zcela přirozené, a to právě z důvodu, že se jedná o zkoumání zákonitostí, které mají na svědomí síly neovlivněné ničím takovým jako je svobodné konstruktivní myšlení. Zkráceně řečeno, nezdá se, že by ve fyzikálním vesmíru existovala nějaká síla, která by měla za cíl vědomě klamat svého pozorovatele, i když některé jevy v rámci kvantové fyziky mohou působit opačným dojmem. Forenzní průzkum výtvarných uměleckých děl samozřejmě spadá do kategorie poznávání v rámci logických analyzačních procesů, nicméně právě z důvodu vlivu ať už vědomých, či nevědomých manipulací zkoumaných skutečností se zde jedná spíše o detektivní činnost, s jejíž pomocí se snažíme rekonstruovat uplynulé události na základě fyzikálního, chemického, historického a mnohdy i psychologického a filozofického poznávacího procesu, přičemž veličina úmyslného klamu či nevědomé dezinterpretace musí být vždy započítána.

¹ EINSTEIN, Albert. *O ponižování vědeckého člověka*. Jak vidím svět. Přeložil Hanuš KARLACH. Praha: NLN, Nakladatelství Lidové noviny, 1993. ISBN 807106078x. s. 143

ÚVOD

Způsoby a parametry posuzování kvality uměleckého díla se zdají být v různých obdobích lidské civilizace proměnlivé, ale dá se říci, že minimálně dva faktory jsou zde shodné vždy. Jedním z nich je samozřejmě poptávka (ať už vyvolaná kvalitami daného díla, nebo marketingem) a druhým je pak recenze autorit daného oboru. Právě autority pak také posuzují výtvarné dílo v rámci procesu autentifikace na základě takzvaného znalectví. Rozeznat pravé umělecké dílo od podvrhu není snadný úkol a dnes můžeme využít celou řadu různých analytických nástrojů, s jejichž pomocí jsou naše rozlišovací schopnosti významně zoslabeny. Nicméně vědecký přístup do tohoto oboru významně zasáhl až v první polovině 20. století, do té doby byla veškerá analýza prováděna na základě individuálních znalostí a zkušeností odborníků na danou problematiku.

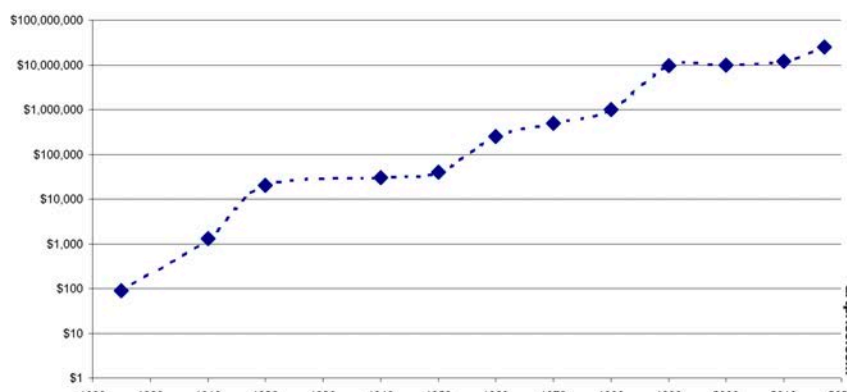
Vědomé kopírování či přímo padělání je pravděpodobně staré jako samotné výtvarné umění, liší se akorát způsoby takového jednání a společenský přístup k nim. Například v renesanci, kdy bylo ve velké oblibě resuscitovat veškeré umělecké artefakty antických kultur, vznikalo také významné množství jejich kopií, napodobenin a pravděpodobně i vědomých podvrhů. Avšak skutečně masivní rozvoj padělatelství (různé odhady se dnes pohybují okolo 40%-60% padělků na současném trhu s uměním) a tedy i potřebu padělky rozeznávat, přinesla až průmyslová revoluce a s ní spojený rapidní nárůst celkového bohatství společnosti. Koncem

19. a začátkem 20. století ve světě narostla obrovská kupní síla v podobě bohatých průmyslníků a obchodníků, kteří ve velkém zakládali umělecké sbírky jak na starém kontinentu, tak v Americe. Právě Amerika se stala obrovským odbytištěm pro Evropské umění i nejrozličnější orientální umělecké předměty a archeologické nálezy. Ruku v ruce s enormní poptávkou po starém i soudobém umění však přichází exponenciální nárůst jeho nominální hodnoty. Jako názorný příklad lze uvést historický vývoj ceny obrazu *Tě Fare* (Obr.1) od Paula Gauguina.



• Obr. 1 - Paul Gauguin, *Te Fare*, 1892. Zdroj: <https://www.wikiart.org>

Cena tohoto díla se kolem roku 1900 pohybovala na úrovni 100 dolarů, v roce 1910 již cena narostla na 1000 dolarů a v roce 1920 překročila hranici 10 000 dolarů, hranice 100 tis. dolarů byla pokořena po roce 1950 a s rokem 1990 dosahuje dílo hodnoty astronomických 10 milionů dolarů (Obr.2). Současná nominální hodnota tohoto díla se



• Obr.2 - Historický vývoj nárůstu ceny obrazu *Te Fare* od Paula Gauguina. Zdroj: artprice.com

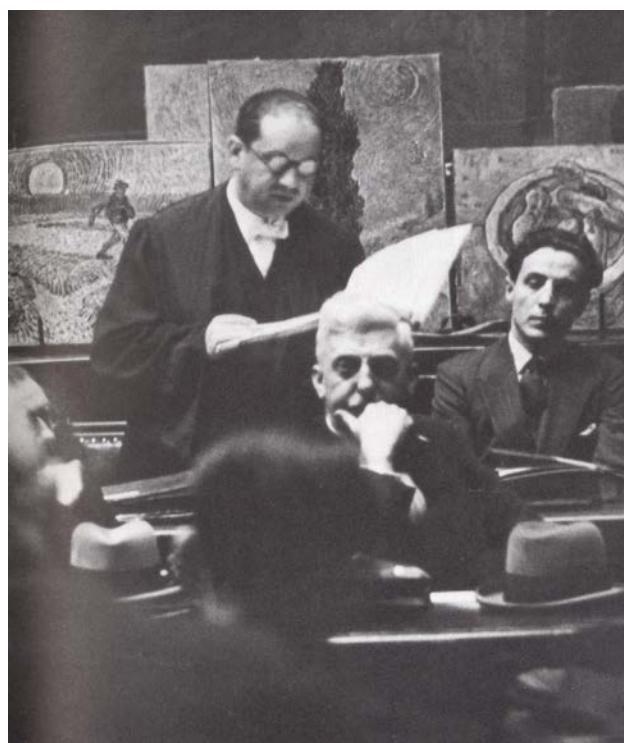
však již blíží magické částce 100 milionů dolarů.²

Právě nepřetržitě narůstající hodnota žádaných uměleckých děl, byla jedním z hlavních iniciátorů nevídaného nárůstu padělatelství a falzifikátorství, se kterým jde ruku v ruce potřeba odhalování takového jednání. V tomto bodě se do celého procesu zapojují přírodní vědy, které od první poloviny 20. století pomocí nejrozumnějších aplikací a metod významně napomáhají k určování pravosti uměleckých děl, ale i k všeobecnému povědomí o jejich technologické struktuře a historii.

Jednotlivé metody průzkumu uměleckých děl jsou tedy důležitým nástrojem nejen restaurátorů a konzervátorů, ale také technologů, historiků umění a forenzních vyšetřovatelů zabývajících se odhalováním padělků na trhu s uměním. Důvodem pro takové zkoumání není pouze potřeba znalosti technologické výstavby uměleckého díla, ale také přesná definice jednotlivých uměleckých postupů v historickém kontextu. Pro potřeby restaurátorů jsou samozřejmě velmi cenné informace o celkové technologické struktuře díla, o materiálovém složení a v neposlední řadě o jeho fyzickém stavu. Z těchto informací je pak možné vyvodit ideální postupy pro restaurování samotné s důrazem na zachování výrazové autenticity a materiálové kontinuity díla. Informace získané z neinvazivního či invazivního laboratorního průzkumu (zpravidla obou dohromady) lze pak také aplikovat k upřesnění datace či provenience zkoumaného díla, což jsou dva základní pilíře v boji proti falzifikátorství. Tyto principy se nadále uplatňují při ověřování autenticity díla neznámého, nebo chybně připsaného. Právě na základech potřeby ověřování autorství se zrodil celý obor forenzního vyšetřování uměleckých děl. Vědecké metody posouzení pravosti uměleckého díla se uplatňují teprve v posledním století našeho tisíciletí, do té doby se aplikoval všeobecně přijímaný princip znaleství, který se opíral o čistě subjektivní studium a

zkušenosti daného experta. Expertní posouzení díla na základě důkladného studia daného tématu je samozřejmě potřeba i dnes a pravděpodobně vždy bude důležitým faktorem v tomto oboru, ale v mnohých případech je nutné podpořit teorii pomocí pečlivého forenzního šetření.

Za počátek vědeckého přístupu ke zkoumání uměleckých děl můžeme považovat soudní proces s Otto Wackerem (1898-1970), který se uskutečnil v roce 1932 (Obr.3). V tomto soudním sporu o pravosti zhruba třiceti obrazů připisovaných Vincentu van Goghovi a prodaných Wackerem různým sběratelům, se



• Obr. 3 - Otto Wacker (zcela vpravo) před soudem, 1932.

poprvé uplatnily vědecké metody průzkumu jako důkazní materiál.³

Od té doby urazily vědecké metody zkoumání fyzikální podstaty díla dlouhou cestu a dnes využíváme celou škálu více či méně

2 Články. artprice.com. *Price evolution of a Polynesian painting by Paul Gauguin, since 1895*. [online]. ©2017. Dostupné z: <https://www.artprice.com/artmarketinsight/price-evolution-of-a-polynesian-painting-by-paul-gauguin-since-1895>

3 CHARNEY, Noah. *Umění falzifikace: myšlení, motivy a metody padělatelských mistrů*. Přeložil Filip HANZLÍK. Zlín: Kniha Zlín, [2015]. ISBN 978-80-7473-305-5.s. 26

sofistikovaných nástrojů k efektivnímu rozšíření a upřesnění našich poznatků. Nicméně ruku v ruce s vývojem technologie přicházejí i falzifikátoři se sofistikovanějšími metodami svých pracovních postupů, což však není příliš překvapivé vzhledem k tomu, že se nemalá část falzifikátorů rekrutuje právě z řad restaurátorů a technologů, kteří mají dokonalý přehled o metodice forenzního průzkumu. Z těchto důvodů je potřebná nepřetržitá aktualizace našich poznatků a aplikovaných výzkumných nástrojů, která kontinuálně koresponduje se současným technologickým vývojem. Jednou z dynamicky se rozvíjejících metod neinvazivního průzkumu uměleckých děl je v současnosti právě rentgenová transmisní radiografie s použitím pixelových detektorů (PCC).

NEINVAZIVNÍ PRŮZKUM UMĚLECKÝCH DĚL

2.1 HISTORIE A METODIKA FORENZNÍHO PRŮZKUMU UMĚLECKÝCH DĚL



• Obr. 4 - Soudní proces s Han van Meegerenem roku 1947.

Jak již bylo popsáno v úvodu, za počátek vědeckého přístupu v oboru posuzování uměleckých děl můžeme považovat soudní proces s Otto Wackerem z roku 1932.⁴ Od té doby se metodika těchto postupů začala pozvolna prosazovat a rozvíjet do složitějších aplikací ruku v ruce s technologickým vývojem. Nedlouho po Wackerově aféře se svět umění dočkal neméně významného případu padělání obrazů, kde hlavní úlohu sehrály forenzní průzkumné metody. V listopadu roku 1947, byl k jednoročnímu trestu vězení odsouzen nizozemský malíř a falzifikátor Han van Meegeren, který se specializoval na padělání obrazů Jana Vermeera (Obr.4). Celý tento slavný

případ byl zajímavý hlavně tím, že odborníci z řad akademiků, kteří byli přizváni k procesu, Meegerenovi nevěřili, že namaloval díla, která považovali za mistrovské originály. Nakonec byl sám padělatel nucen před porotou prokazovat, že je autorem těchto obrazů. Klíčovým bodem v tomto dokazování pak byla kresba, kterou

Meegeren před odborníky vytvořil s tím, že se nachází pod vrstvou malby jednoho z prošetřovaných děl (Obr. 5). Pomocí RTG radiografie bylo záhy jeho tvrzení prokázáno. V dalším desetiletí po Meegerenově smrti (1947), bylo pomocí chemických analýz potvrzeno mnoho jeho dalších podvrhů a celý případ se tak stal celosvětovým milníkem v oboru forenzních analýz uměleckých děl.⁵

V průběhu 20. století se průzkumné metody nadále rozvíjely, jak směrem invazivním / laboratorním, tak neinvazivním /



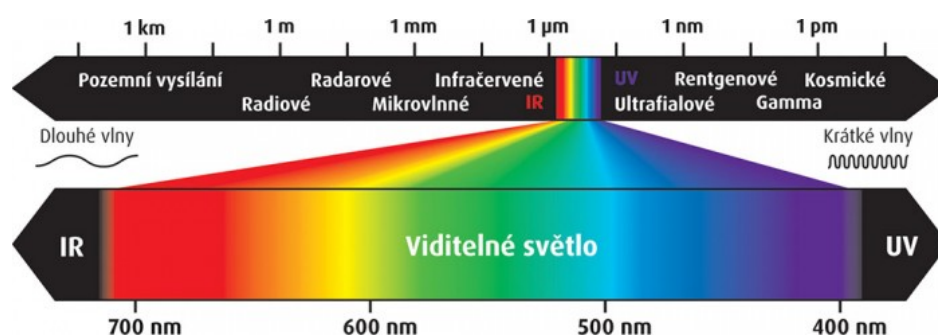
• Obr. 5 - Han van Meegeren při práci na obraze *Christ in the Temple*.

⁴ Ibid.

⁵ LYU, Siwei a ROCKMORE, Daniel a FARID, Hany. *A digital technique for art authentication*. PNAS December 7, 2004 101 (49) 17006-17010. Dostupné z: <https://doi.org/10.1073/pnas.0406398101>

nedestruktivním. Pomocí laboratorních analýz odebraných vzorků lze tak dnes s poměrně vysokou přesností určit materiálovou skladbu díla ve všech vrstvách jeho výstavby. Pro potřeby laboratorního průzkumu je však vždy nutné odebrat určitý počet vzorků materiálu, na kterých má být analýza provedena. Žádoucí je samozřejmě minimální počet takových destruktivních zásahů, nicméně v mnoha případech se bez nich průzkumník neobejde. V laboratořích se dnes kombinují analytické metody chemické, optické a fyzikální a souhrn jejich výsledků má pro výzkumníka významnou vypovídající hodnotu. Nicméně destruktivní testování má jednu zásadní nevýhodu, a tou je výhradně bodový záběr zkoumaného objektu, pokud bychom chtěli získat informace o komplexním rozvržení jednotlivých materiálů v ploše obrazu a o jeho technologické výstavbě, museli bychom dílo podrobit výraznému destruktivnímu zásahu. Tuto nevýhodu laboratorního průzkumu však dobře kompenzují různé metody nedestruktivního zkoumání v oblasti specifického elektromagnetického spektra. V součinnosti těchto dvou základních analyzačních přístupů lze získat komplexní škálu informací o materiálové výstavbě díla, provenienci i jeho autorství. Důležitým faktorem pro správné vyhodnocení veškerých fyzikálních a chemických analýz je samozřejmě důkladná orientace na poli zkoumaného tématu v oblasti technologických postupů a historických souvislostí.

2.2 PRINCIPY VYUŽITÍ SPECIFICKÝCH OBLASTÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO SPEKTRA



• Obr. 6 - Elektromagnetické spektrum zobrazující frekvence záření s barvami viditelného světla. Zdroj: labguide.cz/fluorochromy/

Veškeré neinvazivní metody průzkumu uměleckých děl využívají specifické oblasti elektromagnetického spektra a některé jich kombinují i více dohromady, tyto metody pak nazýváme multispektrální analýza. V dnešní době zažívají rozkvět také analýzy založené na výpočetních algoritmech pracující s neuronovými sítěmi a umělou inteligencí, avšak ani tyto procesy se neobejdou bez kvalitních vstupních dat naměřených právě pomocí specifických oblastí elektromagnetického spektra. Každá vlnová délka tedy nabízí jiné možnosti inspekce v závislosti na způsobu interakce s materiálem zkoumaného vzorku. Veškeré tyto metody lze podle způsobu jejich aplikace dělit na transmisní (prozařovací) a emisní (vyzařovací). Principem transmisní metody je tedy vyhodnocení stavu svazku ionizujícího záření po průchodu zkoumaného vzorku a zaznamenání jeho hodnot. Kvalita výsledné analýzy obrazu pak závisí na použitém typu vyzařovací aparatury a na detekčním médiu. U metody emisní se detekují charakteristické sekundární částice, které jsou emitovány s

expozici plochy vzorku určeným specifickým zářením.⁶

Využitelnost jednotlivých metod detekce vždy závisí na konkrétních požadavcích výzkumu a na technologické a materiálové struktuře zkoumaného objektu. Vzhledem k tomu, že se na historických dílech vyskytuje velmi široká škála technologických postupů zpracování, nelze očekávat shodné výsledky aplikované metody měření na všech malířských dílech. Například na deskové malbě z 16. století (Obr.7) a na obraze namalovaném na plátěné podložce počátkem 20. století (Obr.8) hrají roli odlišnosti v užitých materiálech a způsobu jejich aplikace. U historických maleb do počátku 19. století se však dají očekávat určité shody, které jsou dané náležitostmi k danému období, malířské škole a proveniencí díla. Z těchto důvodů je důležité vědět, na jakou problematiku zkoumaného díla se zaměřit a jakými metodami docílit nejefektivnějšího výsledku.



• Obr. 7 - RTG snímek- Desková malba ze 16. století.
Zdroj: InsightArt



• Obr. 8 - RTG snímek obrazu Pabla Picassa *Modrý pokoj* z roku 1901. Zdroj: The Blue Room, Pablo Picasso - Estate of Pablo Picasso/The Phillips Collection

400 nm - 700 nm

Základním kamenem neinvazivního průzkumu je zkoumání díla v oblasti spektra viditelného světla. Vlnová délka v rozsahu 400-700 nm (přesněji 360-790 nm) je oblast elektromagnetického spektra viditelného pouhým okem. V elektromagnetickém spektru se viditelné světlo nachází mezi ultrafialovým světlem v rozmezí krátkých vln a infračerveným s delšími vlnovými délkami. Viditelné světlo, které představují jednotlivé barvy tvoří tzv. světelné spektrum. Vlnové délky světla jsou zde reprezentovány barvou a energií daného záření. Vlnová délka viditelného světla klesá v závislosti na narůstající energii stejně tak jako v celém elektromagnetickém spektru.⁷

Do oblasti průzkumu na bázi viditelného spektra světla spadá několik základních, avšak významných metod, které využívají jak restaurátoři a technologové, tak i historici a další teoretici. Nejvíce využívanou metodou je samozřejmě fotografie v rozptýleném světle, která se používá hlavně v dokumentační činnosti. Pro pořízení kvalitní dokumentační fotografie v rozptýleném světle je však potřeba

6 ŽEMLIČKA, Jan., JAKŮBEK, Jan., KROUPA, Martin., HRADIL, David., HRADILOV8, Janka., MISLEROVÁ, Hana. *Energeticky citlivá rentgenová radiografie pro účely nedestruktivního průzkumu historických maleb*. Acta Artis Academica: sborník mezioborové konference ALMA. Praha: Akademie výtvarných umění v Praze, 2010-. ISBN 978-80-87108-14-7. s. 340

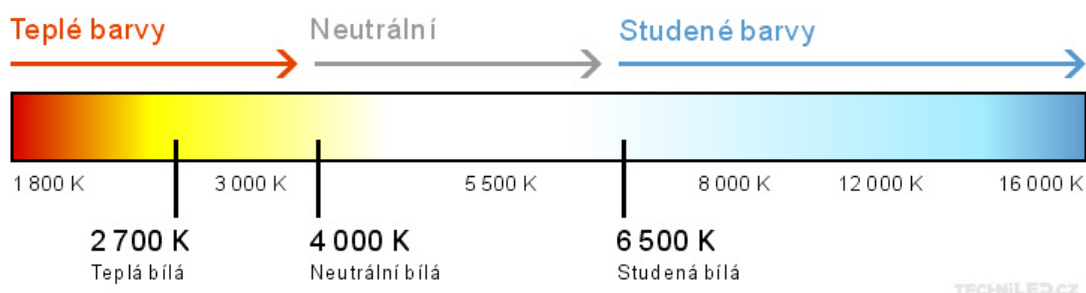
7 Články. Labguide.cz: Fluorochromy [online]. ©2014. Dostupné z: <http://labguide.cz/fluorochromy/>

využít správnou techniku nasvícení díla s použitím difuzérů lamp, či zábleskových světél. Také je třeba dbát na teplotu světelného zdroje, teplota přirozeného denního světla se pohybuje mezi 5200 K - 5700 K. Zachycení reálné teploty barev na snímaném obraze je velmi důležité pro další využití snímků v komparačním průzkumu, nebo pro případ digitální kombinace snímků z dalších měření v oblasti elektromagnetického spektra.

Jsou standardní metody průzkumu v rozmezí viditelného světla, které zprostředkovávají detailní informace z povrchových částí zkoumaného objektu.

Optická mikroskopie:

Metody zkoumání díla pomocí lup, či mikroskopů se uplatňují při běžném posouzení jednotlivých částí díla, ale také slouží



• Obr. 9 - Rozsah oblastí viditelného světla. Zdroj: techniled.cz

Rozptýlené denní světlo:

Fotografie v rozptýleném denním osvětlení se používá pro přesnou dokumentaci stavu díla před, v průběhu a po restaurátorském zásahu.

Razantní boční osvětlení:

Průzkum razantním tangenciálním osvětlením zprostředkovává restaurátorovi pomocí nenáročné techniky významné informace o stavu degradace malby, podložky a druhotných opravách.

Odražené světlo:

Obraz je v tomto případě osvětlen přímým razantním světlem, po jehož odrazu je možné zaznamenat celou řadu defektů spojených se strukturálními změnami povrchu.

Mikro a makro fotografie:

restaurátorům při kontrole prováděných mechanických úkonů v průběhu restaurování.

Transmisní osvětlení:

Neboli metoda průsvitu díla razantním zdrojem osvětlení. Tato technika se opět uplatňuje při získávání informací o technickém stavu díla. Na snímcích získaných pomocí transmisního osvětlení lze dobře pozorovat rozvržení a typ krakeláže malby (v případě obrazů na plátěných podložkách) a u obrazů na dřevěných deskách různé poruchy spojů jednotlivých prken či parketáže.⁸

Mezi průzkumné metody na bázi viditelného světla se dále také řadí digitální spektroskopie (VIS) *High-resolution digital Visibe Light Spectrophotometry*.⁹ Tato metoda se uplatňuje při zkoumání a přesném určení barevného spektra jednotlivých pigmentů. V restaurátorské praxi je pak zvláště přínosná v rámci kontroly změny tonality barev v důsledku nežádoucích chemických či fyzikálních vlivů.

⁸ KOUŘILOVÁ, Lucie. Diplomová práce: *Metody průzkumu výtvarných děl*. AVU Praha, 2016

⁹ DEN LEEUW, Milko. *Day Light Photography. Authentication in Art. Authentication in Art Foundation*. 2018. ISBN 978-90-9031032-9



- Obr. 10,11,12 - Portrét muže v klobouku, kolem roku 1870, soukromá sbírka. Nahoře fotografie v rozptýleném denním světle, uprostřed tangenciální osvětlení pravé a dole tangenciální osvětlení levé. Zdroj: Jiří Lauterkranc

400 nm - 10 nm

Ultrafialové záření je pouhým okem nerozpoznatelné elektromagnetické záření a ve spektru je situováno mezi viditelným světlem a rentgenovým zářením. Jeho přirozeným zdrojem je sluneční záření, ale emise UV paprsků může být produkováána i pomocí uměle vyrobených zářičů. Toto záření je složeno ze tří složek: UVA (320-365 nm), UVB (280-320 nm), UVC (pod 280 nm).¹⁰ Ultrafialové záření se vyznačuje rostoucí energií a kratší vlnovou délkou, protože se pohybuje směrem od viditelného světelného spektrálního pásma.

Jako první si existence Ultrafialového záření povšiml německý chemik a fyzik Johann Wilhelm Ritter v roce 1801. Ritter svůj objev učinil pomocí rozkladu světla na optickém hranolu a měřením jeho rozkladu s využitím papíru napuštěným roztokem chloridu stříbrného. Podle úrovně ztmavnutí papíru za fialovým koncem spektra Ritter odvodil existenci doposud neznámého záření. Pro *dezoxidační* světlo, jak ho sám Ritter nazval, se v průběhu 19. století vžil název ultrafialové záření. Zhruba od roku 1920 je toto záření používáno k průzkumu uměleckých děl.

Ultrafialová fluorescence

Pro potřeby restaurátorského neinvazivního průzkumu se využívá technika ultrafialové fluorescence, kterou řadíme do metod emisních (vyzařovacích). Fluorescence vzniká emisí záření z excitovaného elektronového stavu a pozorovatelná je prakticky pouze v průběhu buzení a po jeho přerušení ihned mizí (doba dohasínání je obvykle řádově 10⁻⁸ s).¹¹ Fluorescenční intenzita je pak přímo závislá na energetické mocnosti zdroje ultrafialového záření. V praxi restaurátor využívá zdroje UVA záření k excitaci plochy zkoumaného obrazu. Paprsky UV záření, které dopadnou na povrch malby pak reagují s jednotlivými materiály a zpět odrážejí světelné paprsky nižších energií

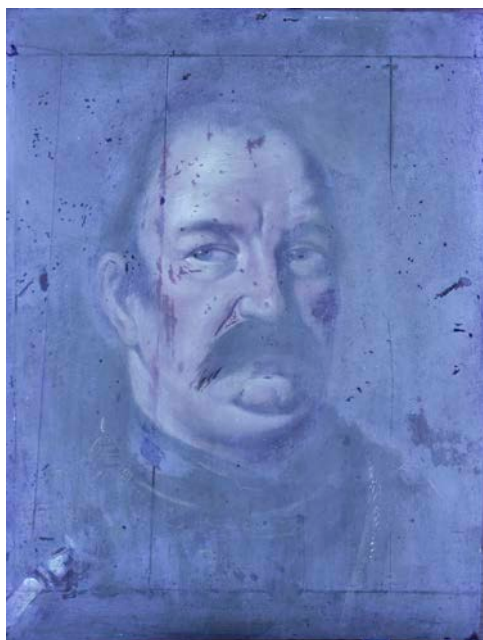
¹⁰ ROSINA, Josef. *Biofyzika pro zdravotnické a biomedicínské obory*. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4237-3

¹¹ FIŠAR, Zdeňek. *Principy fluorescenční spektroskopie. Fluorescenční spektroskopie v neurovědách*. [online]. Červenec 2009. Dostupné z: <http://psych.lf1.cuni.cz/fluorescence/Default.htm>

(fluorescence).¹² Tato metoda průzkumu zprostředkovává restaurátorům velmi cenné informace například o stavu lakových vrstev, druhotných opravách a retuších a při použití fluorescence z rubové strany díla pak můžeme například získat informace o rozložení penetrace olejů z malby do plátěné podložky.

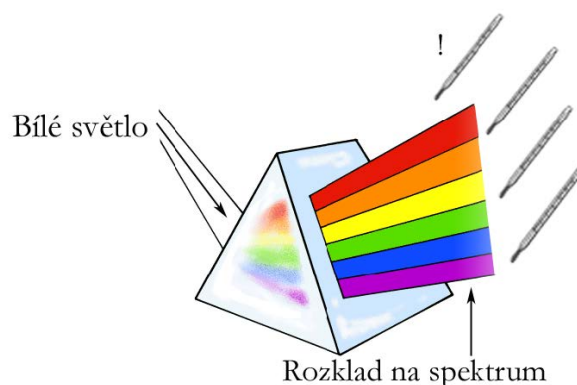


- Obr. 13,14 - Josef Navrátil, Portrét generála Trčky, malba na dřevěné desce / nahoře fotografie v rozptýleném světle, dole UV fluorescence. Zdroj: Jiří Lauterkranc



780 nm - 1 mm

Infračervené záření se nachází těsně nad červeným spektrem viditelného spektra a má kratší vlnovou délku než mikrovlny. Britský astronom William Herschel objevil infračervené světlo již v roce 1800 (Obr.15). Při pokusu o změření teplotního rozdílu mezi barvami ve viditelném spektru umístil teploměr do dráhy světla v každé barvě viditelného spektra. Pozorováním rozdílu zvýšení teploty z modré na červenou objevil za červeným koncem



- Obr. 15 - Herrschelova metoda měření teploty rozložených paprsků viditelného spektra pomocí skleněného hranolu. Zdroj: labguide.cz/fluorochromy/

viditelného spektra infračervené záření.¹³ Paprsky infračerveného záření ve spektru zaujímají oblast v rozmezí od 780 nm do 1 mm a mají rostoucí vlnovou délku. Infračervenou oblast lze dělit do jednotlivých pásem spektra: blízko infračervená oblast NIR zaujímá rozmezí 780 nm-3000 nm, střední IR 3000-6000 nm, vzdálené IR 6000-15000 nm a extrémně vzdálené IR 15000 nm-1 mm.¹⁴ Pro průzkum uměleckých děl malířských se nejčastěji využívá rozhraní blízké - NIR.

Infračervená reflektografie

Infračervená reflektografie technicky spadá do průzkumných metod v rozsahu neviditelného

¹² op.pozn. "7"

¹³ LUCAS, Jim. What is Infrared, *Planet Earth*. [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.livescience.com/50260-infrared-radiation.html>

¹⁴ op.pozn."8", str. 28

elektromagnetického spektra. Infračervené záření proniká vrstvou malby v závislosti na její mocnosti a materiálovém složení, míra penetrace je také závislá na aplikované vlnové délce použitého záření. Delší vlnové délky mohou proniknout hlouběji do vrstev malby, avšak mohou být také absorbovány materiály bohatými na uhlík.¹⁵ Vzhledem k těmto specifickým vlastnostem je tato metoda ideálním nástrojem pro zviditelnění přípravných kreseb obrazů, přemaleb nebo autorských změn v kompozici - pentimenty.



- Obr. 16,17 - Hubert a Jan Van Eyck, detail z Ghentského oltáře, vlevo fotografie v rozptýleném světle, vpravo infračervený reflektogram. Zdroj: Closer to Van Eyck: Rediscovering the Ghent Altarpiece. Top of page: The Adoration of the Mystic Lamb (The Ghent Altarpiece), Hubert and Jan van Eyck. Image courtesy Cathedral of Saint Bavo © Lukas - Art in Flanders

Tepelná kvazi-reflektografie

Využívá světlo odražené od střední infračervené vlnové délky (3000 - 6000 nm) s použitím halogenové žárovky jako zdrojem záření.¹⁶

0,01 nm - 10 nm

Rentgenové záření jsou elektromagnetické vlny specifické velmi krátkými vlnovými délkami. Záření bylo objeveno koncem 19. století německým fyzikem Wilhelmem Conradem

Röntgenem, po němž také nese své označení. V podstatě se jedná o elektromagnetické ionizující záření fotonového proudu o energii řádově desítek až stovek keV - typické rozmezí vlnových délek je 0,01-10 nm. Charakteristické rentgenové záření je generováno kolizí letícího elektronu a elektronu z elektronového pláště atomu. Původní elektron je z atomu vyražen pomaleji. Prázdné místo po vyraženém atomu je potom zaplněno elektronem z jedné z vrstev vzdálenější od jádra atomu. Během tohoto střídání částic se uvolní značné množství energie ve formě rentgenového záření. Energie rentgenového záření se rovná energetickému rozdílu mezi elektronovými hladinami, mezi kterými došlo k přemístění elektronu. Pronikavost vzniklého RTG paprsku je pak vázána na rychlost elektronů v momentě jejich kolize. Elektronové zrychlení je vytvářeno ve vysokonapěťovém elektrickém poli, čím vyšší je elektrické napětí, tím vyšší je pak také rychlost elektronů. Intenzita rentgenového záření je přímo závislá na počtu elektronů, které dopadají na anodu a úměrně se zvyšuje s narůstající hustotou elektronového proudu. Zeslabení rentgenového záření při průchodu hmotou je způsobeno jednak absorbcí, jednak rozptylem. Šíří se od zdroje přímočaře a energie záření se snižuje se čtvercem vzdálenosti od zdroje.¹⁷

Objev rentgenového záření

První rentgenový snímek (transmisní radiogram) vytvořil koncem 19. století Wilhelm C. Röntgen, který v roce 1895 pořídil RTG radiogram ruky své manželky (Obr.18). Pro zachycení specifického záření tehdy použil fotografickou emulzi. Takto pořízený radiogram má dobré prostorové rozlišení a jeho pořizovací náklady jsou nízké, proto se tato metoda hojně používá dodnes. Tento objev vzbudil velkou pozornost prakticky ihned po svém zveřejnění. Rentgenové paprsky byly objeveny 8. listopadu

¹⁵ DEN LEEUW, Milko. Infrared Reflectography. *Authentication in Art*. Authentication in Art Foundation. 2018. ISBN 978-90-9031032-9

¹⁶ op.pozn. "8"

¹⁷ KUSALA, Jaroslav. Rentgenové záření. *Rentgenové záření*[online]. 2004. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/rtg/fyzika.htm>

1895. Zprávu o svém velkém objevu podal Röntgen 28. prosince téhož roku, tato informace nadchla odbornou i laickou veřejnost a vzápětí obletěla celý svět. Röntgen nazval nově objevené záření “paprsky X”, ale později bylo přejmenováno po svém objeviteli. V současné době jsou tyto paprsky v Evropě označovány jako “rentgenové záření”, v anglosaských zemích se používá původní název “X-ray”.¹⁸

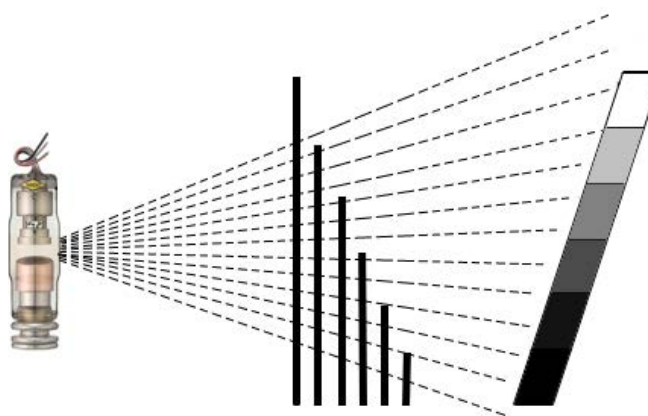
Röntgenův objev umožnil dynamický rozvoj mnoha vědních oborů a jejich praktických odvětví. Významné uplatnění nachází především v lékařství, biologii a defektoskopii. Rentgenové paprsky nám však umožnily také nahlédnout do nejjemnější struktury látek a krystalů, významné uplatnění našly v průmyslu a řadě dalších oborů. Spolu s objevem radioaktivity otevřelo rentgenové záření cestu ke vzniku moderní fyziky.¹⁹



• Obr. 18 - První zachycený rentgenový snímek zobrazuje ruku s prstenem Anny Röntgen.

Rentgenová transmisní radiografie

Radiační zobrazování nachází využití v různých oblastech, například v jaderné fyzice, materiálovém výzkumu, archeologii, biologii, medicíně a v neposlední řadě v restaurátorském průzkumu. Při průzkumu uměleckých děl je RTG radiografie velice významnou metodou na poli nedestruktivního zkoumání, vzhledem k množství a kvalitě zprostředkovaných informací, které badatelům poskytuje. K zobrazování lze použít různé typy záření - elektromagnetické, elektronové, protonové, neutronové nebo svazky těžkých nabitých částic. Průchodem záření hmotou zkoumaného objektu dojde ke změně jeho vlastností. V transmisní radiografii může být sledována změna libovolné vlastnosti svazku ionizujícího záření - intenzity, energie, polarizace, směru šíření atd. V rentgenové transmisní radiografii dochází k zeslabení intenzity rentgenového záření při průchodu hmotou. Úroveň oslabení intenzity záření je přímo závislá na energii použitého záření a na vlastnostech materiálu zkoumaného vzorku (Obr.19).



• Obr. 19 - Obrázek představuje schéma se zdrojem rentgenového záření (rentgenka), měřeným vzorkem (uprostřed), který záření absorbuje a detekční plochou. Toto schéma vysvětluje způsob vzniku radiografického obrazu v závislosti na mocnosti a hustotě zkoumaného obrazu. Zdroj: InsightArt

¹⁸ WATERS, Hanah. The First X-ray, 1895. *The discovery of a new and mysterious form of radiation in the late 19th century led to a revolution in medical imaging*. [online]. 2011. Dostupné z: <https://www.the-scientist.com/foundations/the-first-x-ray-1895-42279>

¹⁹ Ibid.

Úroveň změny intenzity svazku je následně zaznamenána zobrazovacím detektorem. Dle použité detekční aparatury dále odvozujeme strukturu a složení zkoumaného předmětu pomocí výsledného radiogramu. Na základě zaznamenaných změn ve vlastnostech svazku se zpětně odvozuje struktura či složení vzorku. Získaný obraz se nazývá radiogram. Kvalita a výpovědní hodnota radiogramu se mění v závislosti na kvalitě aplikovaného svazku záření a typu použitého detektoru. Jako zdroj rentgenového záření se nejčastěji používají anodové rentgenky, synchrotrony nebo rentgenové lasery.²⁰

Různé metody radiografického zobrazování jsou nedocenitelným pomocníkem restaurátorů a technologů v oblasti neinvazivních průzkumných metod. Ze snímků z RTG radiografie lze získat cenné informace o vnitřní struktuře díla, dobře detekovatelné jsou například podmalby, změny v kompozici, nebo rozvržení barevných vrstev v ploše obrazu. Dle vizuálního posouzení výsledného radiogramu se dají také odvozovat materiály použité v jednotlivých částech díla, což je dáno specifickým složením použitých pigmentů a jejich hustotou, na které závisí průchodnost rentgenového záření.

Zvláštní význam má tato metoda pro průzkum třídímenzionálních uměleckých objektů, jako jsou malby na dřevěných deskách a dřevěné polychromované plastiky. V těchto případech lze získat důležité informace o technickém stavu a vnitřní architektuře zkoumaného díla.

2.3 PŘÍSTUP K RŮZNÝM METODÁM PRŮZKUMU UMĚLECKÝCH DĚL

Základní průzkumné metody na bázi využitelného záření elektromagnetického spektra se samozřejmě nadále rozvíjejí a kombinují jak v oblasti nedestruktivních, tak i destruktivních analýz. V restaurátorském průzkumu uměleckých děl se v dnešní době využívá celá řada těchto metod, které se



• Obr. 20 - Rentgenový snímek dřevěné polychromované plastiky z 18. století.

v různých modifikacích navzájem doplňují a v mnohých případech se i jejich výpovědní a využitelná hodnota navzájem překrývá. Nicméně právě díky prakticky nekonečným možnostem uměleckých přístupů jak na poli výtvarného projevu, tak v oblasti technologické výstavby díla, se i v oblasti výzkumné a analyzáční nachází otevřený prostor pro kombinace a vylepšování metod fyzikálních a chemických přístupů zkoumání. Je to však právě různorodost výtvarného a technického zpracování zkoumaných uměleckých děl, která udržuje v tomto oboru potřebu takzvaného lidského faktoru, který zde slouží nejen jako hlavní motivátor k takovému zkoumání, ale především jako tvůrce správně nastavené metodiky průzkumu s ohledem na konkrétní problematiku zkoumaného předmětu. Velmi důležitá je pak také schopnost vyhodnocení aplikovaných průzkumných metod s pokud možno efektivní výpovědní hodnotou. Nežádka se v této oblasti výzkumu aplikují metody, které

20 JAKŮBEK, Jan., DAMMER, Jiří., HOLÝ, Tomáš., PLATKEVIČ, Michal., UHER, Josef., VYKYDAL, Zdeněk.: Digitální transmisní radiografie s pixelovými detektory Medipix. Československý časopis pro fyziku: Czechoslovak Journal of Physics. Praha: Ústřední ústav fyzikální, 1951-. ISSN doi:0009-0700

pouze splňují všeobecně přijímaný konsenzus potřeby dané analýzy, avšak jejich výpovědní hodnota v daném kontextu je prakticky nulová. Velkým nešvarem je také kulminování v šero všech průzkumných metod s předpokladem objasnění závažných informací, které fyzikální ani chemická struktura zkoumaného díla z jeho podstaty neobsahuje, nebo není možné se aplikovanou metodou dobrat relevantního výsledku díky technologickým limitům dané metody průzkumu. Jako příklad lze uvést aplikaci radiokarbonového datování (invazivní metoda s nutností odběru vzorku) plátěné podložky obrazu z konce 16. století, u kterého existuje podezření, že se jedná o kopii z počátku 18. století. Vzhledem k přesnosti datace radiokarbonové metody, která se pohybuje v

rozmezí 200 let, je její aplikace v takovém případě zcela neopodstatněná a její výsledky mohou být velice zavádějící. Tato metoda se pak spíše uplatní při rozhodování, zda je nějaký archeologický předmět z roku 500 či 200 př.n.l.²¹ Z výše popsaných důvodů je důležité, aby se výzkumník orientoval v současných technologických možnostech a jednotlivých výzkumných přístupech tak, aby byl schopen efektivně nastavit proces průzkumu uměleckého díla a dosáhnout efektivních výsledků.

Tabulka aplikovaných průzkumných metod užívaných k analýze uměleckých děl²²

Standardní aplikace	Pokročilé aplikace
Fotografie v denním světle	Energeticky citlivá RTG radiografie (K-edge imaging)
Optická mikroskopie	RTG mikroradiografie s vysokým rozlišením
Optická spektroskopie	RTG laminografie
Ultrafialová fluorescence	RTG elektronová spektroskopie
Infračervená fotografie	Konfokální rentgen-fluorescence
Infračervená reflektografie	Atomová mikroskopie
IR reflektografie-falešné barvy	Neutronová radiografie
Rentgenová radiografie	Synchrotronová rentgen-fluorescence (K-edge imaging)
Rentgen-fluorescence (bodová)	Terahertzová spektroskopie
Makro rentgen-fluorescence	Multimodální spektroskopie
Počítačová tomografie (CT)	Multimodální reflektografie
Optická spektroskopie	Softwareová analýza- Big data a umělá inteligence (AI)
Termografie	Multispektrální analýzy
IR termografie	K-edge imaging
	Spektrální počítačová tomografie

- Obr. 21 - Tabulka aplikovaných průzkumných metod užívaných k analýze uměleckých děl.

21 CHARNEY, Noah. *Umění falzifikace: myšlení, motivy a metody padělatelských mistrů. Slovníček vědeckých metod autentizace*. Přeložil Filip HANZLÍK. Zlín: Kniha Zlín, [2015]. ISBN 978-80-7473-305-5

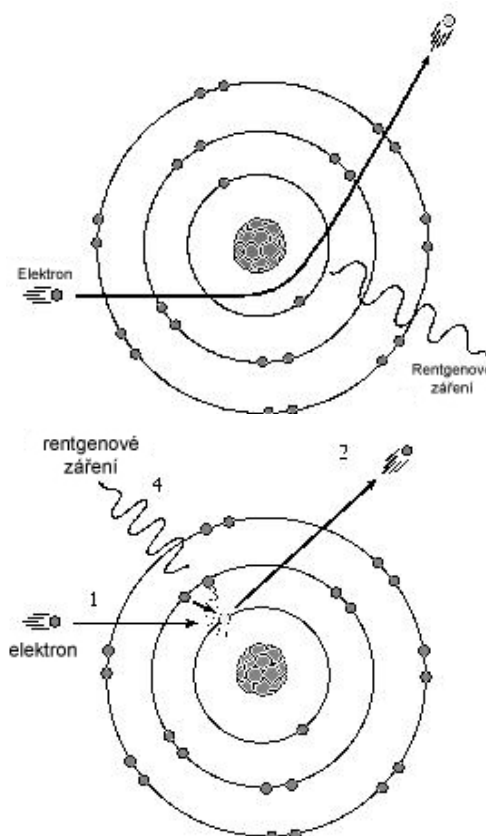
22 DE JONG, Indeborg. DEN LEEUW, Milko. MASS, Jennifer. PINNA, Daniela. SHINDELL, Lawrence. SPAPENS, Oliver. *Authentication in Art*. Authentication in Art Foundation. 2018. ISBN 978-90-9031032-9

ÚVOD DO TECHNOLOGIE

3.1 PRINCIP VZNIKU RENTGENOVÉHO OBRAZU

Rentgenové záření (X) proniká i materiály, které jsou neprůhledné pro viditelné spektrum světla, zaznamenání kvality a kvantity tohoto záření je základem transmisních radiografických technik. Pronikavé X záření vznikající v elektronce má energii fotonů cca 20-150 keV, část záření je absorbována v závislosti na tloušťce a hustotě materiálu kterým prochází a zbylá část může být zaznamenána na různé druhy detektorů.²³ Základním a nejdéle používaným detekčním médiem je fotografická folie, dále se pak používají zobrazovače integrující náboj a pixelové detektory registrující jednotlivé částice. Každý detektor však při expozici zaznamená rentgenový obraz zkoumaného vzorku. Také se dá říci, že rentgenový obraz vzniká na filmu či v detektoru projekcí X-záření z ohniska anody, skrze hmotu zkoumaného obrazu s různými absorpčními koeficienty a různými tloušťkami. Průchodem tohoto záření sledovaným vzorkem dochází ke změně jeho vlastností. V transmisní radiografii se pak zaznamenává změna vlastností svazku ionizujícího záření- intenzita, polarizace a směr. Z těchto zaznamenaných změn vlastností svazku se pak dají odvodit informace o struktuře a složení vzorku / díla. O kvalitě a množství zaznamenaných informací rozhodují především vlastnosti použité detekční techniky, ale také kvalita vyzářeného svazku. Zdroj rentgenového záření je tedy důležitým faktorem, který hraje podstatnou roli v procesu transmisní radiografie. Anodové rentgenky s polychromatickým zářením jsou standardně používaným zdrojem uměle vytvářených rentgenových paprsků. Dále se pak používají synchrotrony nebo rentgenové lasery, které vyzařují takzvané monochromatické svazky. Zobrazovací detektory a jejich vlastnosti však ve

finále určují, jaké kvantum informací měřením získáme.²⁴



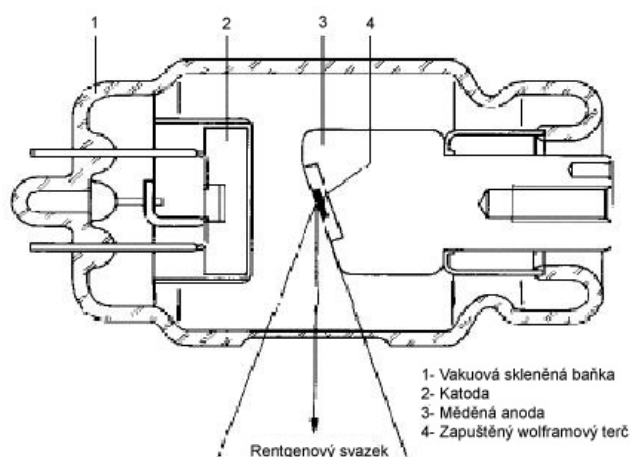
- Obr. 22,23 - Charakteristické RTG záření vzniká při srážce letícího elektronu a elektronu z elektronového obalu atomu. Původní elektron je vyražen ven z atomu s nižší rychlostí. Vznikne "díra", která je ale následně zaplněna elektronem z jedné z hladin vzdálenějších od jádra. Při tomto přeskoku se uvolní značné množství energie ve formě fotonu RTG záření. Energie záření je rovna energetické- mu rozdílu mezi elektronovými hladinami, mezi kterými došlo k přeskoku elektronu. Zdroj: <http://www.rtg.fbmi.cvut.cz/>

Jako zdroj záření se v radiografii používá vakuová elektronka, běžně označovaná jako rentgenka. V podstatě se jedná o diodu s vysokým napětím cca 20-200 keV. Nažhavená katoda emituje elektrony, které jsou přitahovány k anodě s vysokým kladným napětím a zároveň jsou urychlovány silným elektrickým polem. Než dopadne elektron na anodu, dosahuje již značně vysoké rychlosti. Například pro napětí

²³ ULMANN, Vojtěch. *Vznik a vlastnosti rentgenového obrazu*, AstroNuklFyzika. [online]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>

²⁴ JAKŮBEK, Jan., DAMMER, Jiří., HOLÝ, Tomáš., PLATKEVIČ, Michal., UHER, Josef., VYKYDAL, Zdeněk.: *Digitální transmisní radiografie s pixelovými detektory Medipix*. Československý časopis pro fyziku: Czechoslovak Journal of Physics. Praha: Ústřední ústav fyzikální, 1951-. ISSN doi:0009-0700

$U=60\text{kV}$ budou mít elektrony kinetickou energii 60keV a dopadovou rychlost přibližně 150000km/s , což je poloviční rychlost světla. Po dopadu na anodu dochází ke zbrždění, čímž se část jejich kinetické energie přemění na rentgenové záření. Pro dosažení ostrého obrazu při průzkumu uměleckých děl s použitím anodové rentgenky je důležité, aby byl rentgenový svazek vyzařován z co nejmenšího bodového zdroje, čímž se dosáhne fokusace elektronů. Urychlené elektrony s vysokým napětím pak dopadají do poměrně ostře definovaného místa anody, které se nazývá dopadové ohnisko. Toto ohnisko má obdélníkový tvar, který mu propůjčuje tvar žhaveného vlákna.²⁵



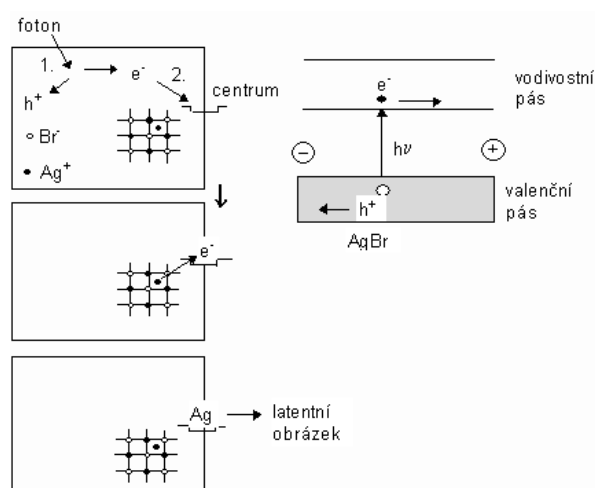
Obr. 24 - Schéma rentgenové trubice s pevnou anodou.
Zdroj: <http://www.rtg.fbmi.cvut.cz/>

3.2 MOŽNOSTI APLIKACE ZOBRAZOVACÍCH DETEKTORŮ

Zobrazovací detektory pro využití v rentgenové transmisní radiografii ionizujícího záření se rozdělují do tří základních skupin: klasické fotografické emulze, analogové zobrazovače integrující náboj a pixelové detektory PCC (photon counting pixel detectors). Každá skupina zmíněných detektorů má své určené vlastnosti, od kterých se také odvíjí možnosti jejich využití při průzkumu uměleckých děl, specificky uměleckých děl malířských. Možnosti jednotlivých detektorů se odvíjí od jejich

fyzikálních vlastností, konstrukce architektury, časového depozitu záznamu atd. Podstatným faktorem pro využití v restaurátorském průzkumu, je také cenová dostupnost a technická náročnost jejich použití. Také požadavky na kvalitu a kvantitu výsledných informací se mohou lišit v závislosti na zkoumané problematice daného uměleckého díla a proto je nutné, aby aplikovaná průzkumná technologie odpovídala definovaným standardům.

Metoda záznamu na fotografickou fólii se využívá od doby objevu rentgenového záření dodnes, její nespornou výhodou je cenová dostupnost, vysoké rozlišení a malý šum. Pro průzkum obrazů na plátně a dřevěných deskách je tedy tato metoda velice vhodná. Právě vysoké rozlišení a nízká míra šumu je v tomto oboru velmi žádoucí. Nevýhodou však zůstává potřeba vyvolávání snímků na fotografických fóliích a s tím spojená náležitá technická vybavenost a časová náročnost. Další zápory spočívají v limitovaném dynamickém rozsahu a v nelineární odezvě. Náročné je v tomto případě také kvalitní převádění pořízených snímků do digitální podoby pro jejich další postprodukční zpracování. Některá radiografická pracoviště proto využívají systémy nepřímé digitalizace z fotografických fólií. Pro některá pracoviště však může být naopak přínosná možnost



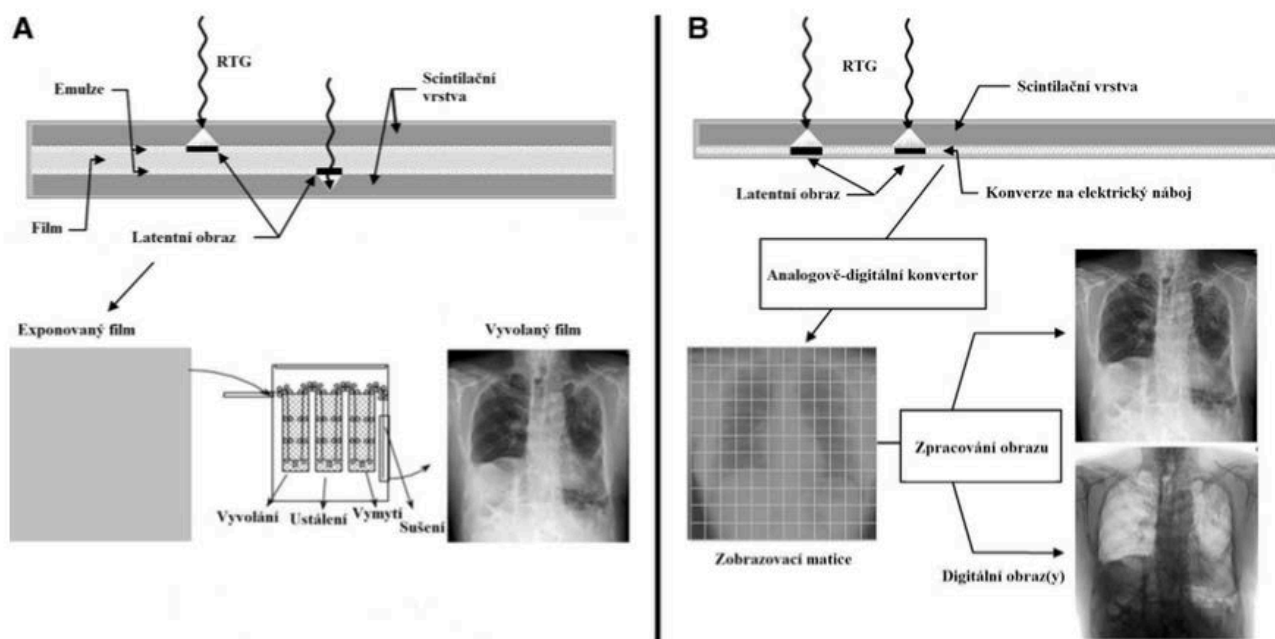
• Obr. 25 - Princip fotochemické reakce AgBr emulze.
Zdroj: <http://canov.jergym.cz/barva/a/f.html>

25 op. pozn. "23"

fyzické archivace pořízených negativů radiografických snímků.

Fotochemická reakce je způsobena absorpcí fotonu, jehož energie uvolní elektron z vázaného atomu bromu: $\text{Br} + f \rightarrow \text{Br} + e$. Takto uvolněný elektron může být absorbován libovolnými ionty stříbra, které jsou na bromid navázány: $\text{Ag}^+ + e^- \rightarrow \text{Ag}$ (Obr.25). Jedná se o primární fotochemickou reakci, ve které musí být fotonová energie vyšší než vazebná energie molekuly, která se rozpadá během fotolýzy. V důsledku těchto procesů se bromid stříbrný rozpadá (fotolýza). Následkem této reakce je uvolňování atomů stříbra z vazby AgBr, čímž dochází ke vzniku latentního obrazu. Po expozici fotografického materiálu ionizujícím zářením dochází k jeho zčernání, úroveň zčernání je odvozena od intenzity expozice tímto zářením v daném místě.²⁶ Díky chemickému základu detekce radiografického snímku zde teoreticky neexistuje rozměrový limit pro aplikované fotocitlivé folie, rozměrová limitace však samozřejmě vzniká možnostmi vybavení konkrétního pracoviště a expozičními limity zdroje rentgenového záření.

Další skupinou detektorů jsou zobrazovače integrující náboj označované jako DR (Direct Radiography), tedy využívající principu přímé digitalizace. Do této skupiny spadají detektory typu CCD (Charge Coupled Device), CMOS (Complementary Metal Oxid Semiconductor) a FPD (Flat Panel Detector). Jejich princip je postaven na použití speciálního čipu, který je tvořen maticí světlo-citlivých polovodičových elementů / pixelů. Kvalita tohoto snímáče se odvozuje od počtu a velikosti těchto elementů, čímž je dána rozlišovací schopnost snímáče. Polovodičové detektory se nadále dělí podle toho, zda je jejich konverze rentgenového záření přímá či nepřímá. Detektory pracující na bázi nepřímé konverze jsou založené na platformě amorfního křemíku (a-Si) a k převodu rentgenového záření na viditelné využívají scintilační vrstvu. Viditelné světlo se pak zaznamená prostřednictvím matice fotodiod nebo fototranzistorů. Detektory pracující na bázi přímé konverze, jsou založené na platformě amorfního selenu (a-Se) a náboj v nich vzniká zářením bez pomocného scintilátoru na platformě foto-vodivé selenové vrstvy. Polovodičové detektory jsou označovány DR



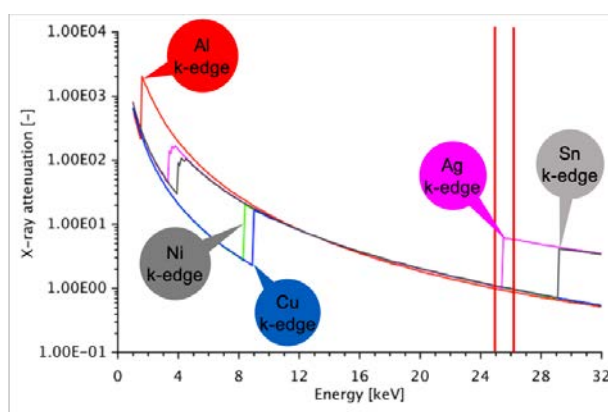
• Obr. 26 - Rozdíl mezi záznamem rentgenového záření na klasický fotocitlivý materiál (A) a detektorem integrujícím náboj (B). Zdroj: http://www.symma.cz/jarni16/sbornik/prezentace/02_bouskova.pdf

(Direct Radiography), běžně se používá i označení *Flat Panel* - plochý detekční panel. Počet a velikost těchto pixelů jsou pak určující pro celkové rozlišení obrazového detektoru. Pixely jsou v těchto detektorech zastoupeny v řádech několika milionů a proto se pro redukci počtu jejich přívodů k fototranzistorům využívá uspořádání do matice buzené po sloupcích s čtením pomocí přenosu náboje v řádcích.²⁷ Nevýhodou těchto detektorů je, že kromě užitečného signálu integrují i výraznou dávku šumu tzv. temného proudu, který je způsoben prosakováním náboje uloženého v paměťovém kondenzátoru. Tyto detektory mají také limitovaný dynamický rozsah. Výhodné jsou naopak díky vysokému prostorovému rozlišení a poměrně nízké pořizovací ceně, díky čemuž je jejich uplatnění v mnoha odvětvích v současnosti preferováno. V současné době jsou tyto detektory velice rozšířené ve všech možných oblastech, kde je potřeba rychlé a cenově dostupné detekce pomocí RTG. Nejvýznamnější zastoupení asi nalezneme ve zdravotnictví, ale užívají se například i v přístrojích na detekci zavazadel na letištích, či při defektoskopii.

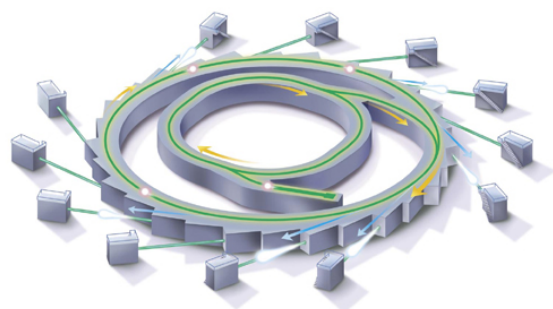
Poslední skupinou detektorů využívaných pro rentgenovou radiografii jsou poměrně mladé pixelové detektory s přímou konverzí PCC (Photon Counting Pixel Detectors), které dokáží zaznamenat a interpretovat energii každého jednotlivého fotonu. Díky této unikátní vlastnosti je možné PCC detektory využívat také pro K-edge Imaging (Obr.27) využívající k zobrazování vazebnou energii elektronu atomu- K-hrany, který doposud umožňovali pouze příliš rozměrné synchrotrony (Obr.28).²⁸

Tento typ detektorů byl vyvinut na základě mezinárodní spolupráce *Medipix* ve Švýcarském

CERNu v roce 1997. Od té doby se tato technologie stále rozvíjí a v současnosti je již na světě čtvrtá generace těchto detektorů. PCC detektory nacházejí své využití v široké škále vědních i komerčních oborů a jejich vývoj byl iniciován právě na základě rozsáhlých možností vědních a průmyslových aplikací. Jejich primární využití pro detekční potřeby v CERN, se díky jejich vlastnostem rozrostlo na mnoho dalších úrovní a dnes je využívá například americká NASA na mezinárodní vesmírné stanici ISS.²⁹



• Obr. 27 - K-edge reprezentuje náhlý nárůst absorpce rentgenového záření pro charakteristické energie jednotlivých prvků. Zdroj: Josef Uher, InsightArt, 2018



• Obr. 28 - Schématické zobrazení synchrotronu. Zdroj: <http://archive.synchrotron.org.au/synchrotron-science/what-is-a-synchrotron>

27 MARTÍNEK, J. *Digitalizace rentgenového obrazu*. Použití v medicíně a defektoskopii. 3., doplněné a upravené vydání, 2004

28 K-edge imaging je neinvazivní metoda průzkumu založená na radiačním záření produkovaném synchrotrony. S pomocí využití K-hran elektronů lze zobrazit specifické vlnové délky polychromatického radiačního záření, které představují jednotlivé energie materiálů zkoumaného vzorku. Konkrétně v případě průzkumu obrazů na plátně či dřevěných deskách je možné vizualizovat distribuci jednotlivých pigmentů v celé ploše malby. Díky specifickým vlastnostem nových PCC detektorů je v současnosti možné používat K-edge imaging i v běžných studiových či laboratorních podmínkách.

29 IWANCZYK, Jan S. a Krzysztof INIEWSKI. *Radiation detectors for medical imaging*. Medipix detectors. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, [2016]. Devices, circuits, and systems. ISBN 9781498704359

Pro účely rentgenové radiografie mají PCC detektory vynikající vlastnosti, které do značné míry předčí doposud běžně užívané metody detekce rentgenového záření. Hlavními klady těchto detektorů jsou výborné prostorové rozlišení, vysoká snímací odezva, nulová míra šumu, a prakticky neomezený dynamický rozsah. Nevýhodou je však zatím příliš vysoká pořizovací cena, která souvisí s náročnou výrobní technologií. Pro potřeby restaurátorského průzkumu byly donedávna navíc nevýhodou jejich malé rozměry s čímž byla spojena potřeba delší doby expozice díla při celoplošné analýze s využitím statického zdroje rentgenového záření. Avšak vývoj a optimalizace konstrukčního řešení na úrovni sofistikované skenovací aparatury tento hendikep PCC detektorů v současnosti již zcela eliminoval. Pro potřeby restaurátorského průzkumu uměleckých děl pomocí RTG radiografie jsou detektory PCC velmi slibnou budoucností na poli multispektrálního radiografického zobrazování.

PIXELOVÉ DETEKTORY

4.1 PIXELOVÉ DETEKTORY A VÝVOJ APARATURY PRO PRŮZKUM UMĚLECKÝCH DĚL

Tento typ detektorů je znám přibližně dvacet let a poměrně dlouhou dobu byl využíván pouze pro vědecké účely, pro které byl ostatně také primárně vyvinut. V současné době má tato technologie i komerční zázemí a pomalu se dostává do povědomí firem mimo sféru aplikovaného výzkumu, které vyvíjejí přístroje pro koncové uživatele. Na trhu již tak figurují kompaktní zařízení s plně integrovanými pixelovými detektory, pro široké spektrum průmyslového a vědeckého využití.

Na vývoji koncových přístrojů a aparatur v současnosti pracuje ve světě několik vědeckých či komerčních subjektů, které se snaží o využití skvělých vlastností této technologie v různých odvětvích komerčního využití. Z historie známe principy zavádění nových technologií do běžné praxe, kdy se tyto technologie aplikují nejprve v oborech, které mají dostatečný komerční potenciál, nebo jsou pro ně primárně vyvíjeny. U detekčních přístrojů se jedná především o zdravotnictví, defektoskopii, letectví a kosmonautiku, popřípadě vojenský a automobilový průmysl. V oboru průzkumu uměleckých děl, kde pro vývoj koncových přístrojů pro něj specificky určených není dostatečný komerční potenciál, proto bývá zvykem spíše aplikace přístrojů, které byly primárně vyvinuty pro jiná odvětví. Nicméně se současnou strukturou grantové politiky evropských zemí je možné financovat i vývoj technologií v odvětvích, která nemají jednoznačný a přímý komerční potenciál a jedním z nich je právě péče o kulturní dědictví.

Na tomto základě vznikají projekty, které se snaží držet krok s dobou a pomocí nejrozličnějších grantových prostředků vyvinout přístroje, které budou primárně specializované pro průzkumy uměleckých děl. Tato politika však často naráží na úskalí následného

přenášení výsledků vývoje financovaných z grantů do běžné praxe. Některé projekty zůstávají po vyčerpání dotací takzvaně napůl cesty, jiné zase těžko hledají komerční uplatnění, protože nemají dostatečnou marketingovou podporu. V České republice, která se prostřednictvím ČVUT a ÚTEF (Ústav technické a experimentální fyziky) také podílela na vývoji PCC detektorů na platformě čipů Medipix a Timepix, figuruje firma Advacam30, která na základě mezinárodní licence vyrábí a vylepšuje koncové kamery. Dceřinou společností Advacamu je pak firma InsightArt31, jejímž hlavním zaměřením je vývoj aparatury pro radiografické skenování s implementací pixelových detektorů Widepix přímo pro potřeby průzkumu uměleckých děl. Firma InsightArt v současné době disponuje již druhým plně funkčním prototypem skenovací aparatury s průmyslovým označením RToo. InsightArt aktivně spolupracuje s odborníky a institucemi po celém světě na testování a vylepšování této technologie pro potřeby restaurátorů, konzervátorů a technologů.

4.2 HISTORIE PIXELOVÝCH DETEKTORŮ MEDIPIX

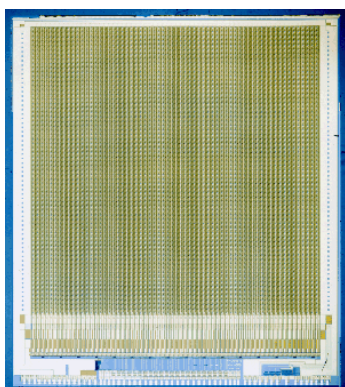
Úplně první čipy Medipix byly vytvořeny v průběhu 90 let, kdy se za rok zrodu prvního detektoru Medipix1 považuje rok 1997. Vývoj této technologie byl postaven na základě mezinárodní spolupráce čtyř institutů s označením Medipix1 Collaboration. Do spolupráce pod hlavní záštitou CERNu byly zapojeny Univerzity ve Freiburgu, Glasgow a v Neapoli. Medipix1 se tak v roce 1997 stal světově prvním velkoformátovým PCC CMOS zobrazovacím čipem. Potenciál těchto detektorů nadále přerůstal pole působnosti aplikované fyziky vysokých energií a v rámci dalšího vývoje se v roce 1999 zrodila nová mezinárodní spolupráce nesoucí označení Medipix2 Collaboration. Následný vývoj sebou přinesl další projekty s označením Medipix3 Collaboration v roce 2005 a konečně Medipix4 Collaboration v roce 2016. V rámci těchto

30 Advacam: <http://advacam.com>

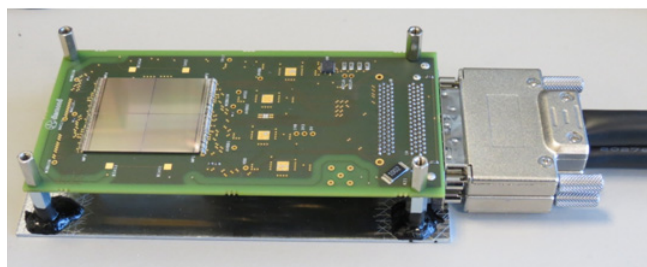
31 InsightArt: <https://insightart.eu>

projektů byly vyvinuty již tři vylepšené generace čipů Medipix a Timepix. V celkovém součtu se na vývoji v rámci Medipix Collaboration podílelo 18 institucí a univerzit včetně českého ČVUT v rámci Ústavu technické a experimentální fyziky (ÚTEF).³²

PCC detektor Medipix1 (Obr.29) byl vyvinut v roce 1997 a od té doby se stále rozvíjel do dalších verzí s konstrukčním vylepšením, či se specializací pro různé oblasti měření. Na tento detektor navazuje další vývojový článek Medipix2 (Obr.30) ve verzi MXR s vylepšením některých konstrukčních chyb, čímž se výrazně zvýšila jeho efektivita oproti první verzi. Na základech PCC Medipix2 je následně postaven Timepix, který má k dispozici tři základní režimy: Medipix, Timepix a T-O-T (time over threshold). T-O-T umožňuje přímou konverzi energie detekovaných částic v každém pixelu, což je významná vlastnost, na které je postavena technika multispektrální rentgenové energeticky (materiálově) citlivé RTG mikroradiografie pro potřeby restaurátorského průzkum. Nejnovější detektor z této skupiny je pak Medipix3 s výrazně vylepšenou architekturou a rozmanitými možnostmi detekce. Od roku 2016 probíhá vývoj další vylepšené řady detektorů v rámci projektu Medipix4 Collaboration, na kterém se opět podílí fakulta ČVUT prostřednictvím ÚTEF.³³



• Obr. 29 - Detektor Medipix1. Zdroj: <https://medipix.web.cern.ch/medipix/index.php>



• Obr. 30 - Detektor Medipix2. Zdroj: <https://medipix.web.cern.ch/medipix/index.php>

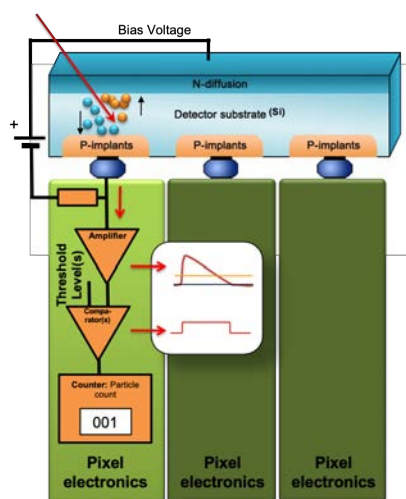
4.3 TECHNICKÉ PARAMETRY DETEKTORŮ MEDIPIX

Medipix je polovodičový křemíkový detektor, který využívá přímou konverzi RTG záření na elektrický signál, přičemž je schopen počítat jednotlivé fotony po dopadu záření. Velikost jednotlivých pixelů ve variantě Medipix2 je 55 μm x 55 μm , celkový počet pixelů je pak 256 x 256 shodně s variantou Medipix3. Při průchodu rentgenového fotonu senzorem dochází v polovodiči k ionizaci. Tento ionizační náboj, jehož velikost je úměrná energii fotonu je sejmut odpovídající buňkou vyčítacího čipu. Pokud je velikost náboje v nastaveném rozmezí, zvýší se hodnota příslušného čítače o jedničku. Každý pixel tedy zaznamenává počet fotonů (ionizujících částic) jejichž energie leží ve vybraném intervalu. Data je možno ze zařízení Medipix číst buď prostřednictvím sériového nebo 32 bitového paralelního rozhraní.³⁴ Oproti RTG zobrazování na fotocitlivý materiál a CCD mají tyto detektory prakticky neomezený dynamický rozsah (DR)- zobrazení stupnice šedi, což je v radiografickém průzkumu uměleckých děl velmi žádoucí faktor, který umožňuje výraznější rozlišovací schopnost jednotlivých detekovaných materiálů.

³² The Medipix Collaborations. Our story. Dostupné z: <https://medipix.web.cern.ch/about-medipix-collaborations>

³³ JAKŮBEK, Jan. *Pixel Device TimePix*. Dostupné z: <http://aladdin.utef.cvut.cz/ofat/others/Timepix/index.htm>

³⁴ DAMMER, Jiří. Diplomová práce: *Možnosti použití obrazových detektorů Medipix2 v RTG mamografii. Medipix2. 1.* LF UK, Praha. 2005. s. 30



• Obr. 31 - Schématické řešení pixelového detektoru. Zdroj: <https://medipix.web.cern.ch/medipix/index.php>

4.4 VELKOFORMÁTOVÉ ZOBRAZOVACÍ DETEKTORY WIDEPPIX

Částečnou nevýhodou použití detektorů Medipix a Timepix pro radiografické zobrazování uměleckých děl jsou jejich malé rozměry a tudíž zvýšená potřeba expozice RTG zářením při použití statických rentgenek pro celoplošné zobrazování. Tuto nevýhodu do značné míry eliminuje použití velkoformátových detektorů Widepix, jejichž architektura je postavena na propojení jednotlivých detektorů Medipix či Timepix do jednoho celku ve spojení s modulární posuvnou aparaturou. V sestavě s kompaktním zdrojem RTG záření instalovaným taktéž do modulární posuvné aparatury je pak expozice zkoumaného předmětu do značné míry eliminována na minimální potřebné hodnoty. Detektory Widepix jsou vyráběny společností ADVACAM v několika základních modifikacích, které se od sebe odlišují vnitřní architekturou implementovaných čipů Timepix.

Velkoformátový pixelový detektor Widepix 10 x 10 (Obr.32) je v současné době nainstalován v laboratoři radiografických technik v Centru Excelence v Telči a jedná se o největší dostupný zobrazovací detektor na světě. Jeho senzitivní

plocha činí 143mm x 143mm, s počtem pixelů 2560 x 2560 a rozlišením 55 μm .³⁵ Na tomto detektoru byla také provedena některá měření, která jsou součástí této práce. Pro praktické využití v restaurátorských atelierech, galeriích a v muzeích je však tato kamera spíše nedostupná z hlediska její astronomické ceny. Pro budoucnost a rozvoj těchto technologií jsou proto praktičtější menší moduly Widepix v kombinaci s propracovaným systémem modulárního posuvného řešení. Pro tyto účely je v současné době ideální využití detektoru Widepix 1x5 (Obr.33) s rozlišením 1280x256 obrazových bodů, popřípadě novější verze Widepix 2(1)x5 s jednotlivými hybridními Timepix detektory s rozlišením 256x256 pixelů (1280x 256 v celém setu).³⁶ Tyto verze byly také použity pro jednotlivá zkušební měření v rámci této práce.



• Obr. 32 - Velkoformátový detektor Widepix 10x10. Zdroj: <http://www.widepix.cz>, <http://www.advacam.com/en/>



• Obr. 33 - Detektor Widepix 1x5. Zdroj: <http://www.widepix.cz>, <http://www.advacam.com/en/>

³⁵WidePix 10x10. Custom Large Area Camera. Dostupné z: <http://advacam.com/camera/widepix-10x10>

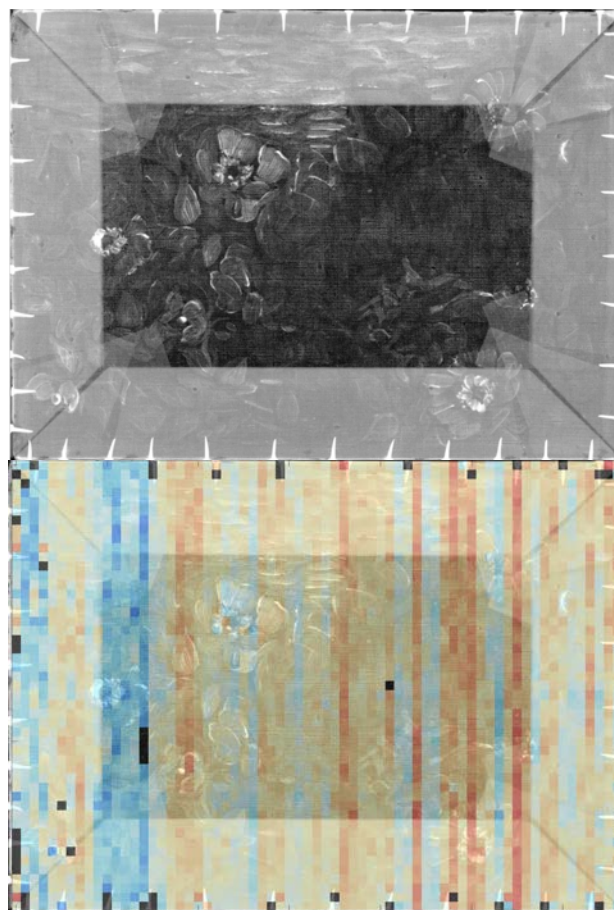
³⁶ WidePix 2(1)x5. Industrial Scanning Camera. Dostupné z: <http://advacam.com/widepix>

POTENCIÁL PRO PRŮZKUM UMĚLECKÝCH DĚL MALÍŘSKÝCH

Jedním z hlavních cílů této práce je zmapování potenciálu využití pixelových detektorů v rámci neinvazivního průzkumu uměleckých děl malířských. Z výše popsaných technických parametrů vyplývá, že ideálními PCC detektory pro toto odvětví jsou modulované kamery Widepix s architekturou detektorů Timepix. Jejich velký potenciál je dán především vysokým rozlišením, takřka nulovou úrovní šumu a prakticky neomezeným dynamickým rozsahem. Tyto vlastnosti testovaných kamer nenabízejí pouze kvalitativní zlepšení pořízených radiogramů, ale především další možnosti, které vycházejí z vysoké kvality naměřených dat a z jejich přímé konverze na digitální signál. S ohledem na vysokou kvalitu pořízených radiogramů lze tuto technologii využít například jako primární vstupní zdroj pro počítačové určování plátěné podložky obrazů (Canvas Wave Thread Counting)(Obr. 34,35), jejímž průkopníky jsou bratři Don Johnson a Richard Johnson.³⁷ Obdobné technologie, které aplikují bratři Johansonovi na výpočet příslušnosti plátěné podložky, se v poslední době začínají uplatňovat také v programech využívajících pokročilé výpočetní algoritmy pro určení autorství díla podle porovnání vnitřních i vnějších struktur samotné malby. I pro tyto aplikace jsou velmi důležitá nanejvýš kvalitní vstupní data, která může poskytnout radiografická analýza s využitím moderních PPC detektorů.

Největším přínosem aplikace PCC detektorů s architekturou čipů Timepix je však bezesporu využití K-edge imaging technologie pro celoplošné mapování distribuce jednotlivých materiálů/pigmentů v rentgenové transmisní radiografii. V podstatě se jedná o multispektrální transmisní radiografickou analýzu uměleckého díla ve vysokém rozlišení. Obdobné výsledky lze samozřejmě získat také s použitím synchrotronové rentgen

fluorescence, ale to pouze za předpokladu transportu díla na dané synchrotronové pracoviště. Právě díky vysoké míře technické náročnosti a limitovanému počtu synchrotronových laboratoří je využití této technologie pro potřeby analýzy umění značně limitováno. Velmi dobré výsledky pro tento druh analýzy přináší i použití celoplošného rentgen fluorescenčního makro-skenování (MA-XRF)³⁸ pomocí aparatury vyvíjené například společností Bruker. Rentgen fluorescenční analýza však nedokáže dostatečně suplovat výsledky klasické rentgenové transmisní radiografie a zde se právě nachází velký prostor pro uplatnění multispektrální transmisní radiografie s vysokým rozlišením, která také dokáže analyzovat distribuci pigmentů v celé ploše díla, avšak s přidanou



• Obr. 34,35 - Ukázka počítačové analýzy plátěné podložky malby s využitím RTG snímku. Zdroj: <https://www.ece.rice.edu/~dhj/Workshop/>

37 RAGAI, Jehane. *The scientist and the forger: probing a turbulent art world*. Second edition. New Jersey: World Scientific, [2018]. ISBN 9781786344205. s. 156

38 Analytical chemistry for cultural heritage. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 9783319528021. s. 67-68

hodnotou kvalitního radiografického snímku ve vysokém rozlišení.

Hlavní využití potenciálu PCC detektorů tedy spočívá v možnosti detekce energie jednotlivých fotonů, ze které můžeme zpětně odvodit materiál, který zapříčinil změnu parametrů výstupního svazku ionizujícího záření. Jedná se tedy o energeticky (materiálově) citlivou radiografickou analýzu (Obr.36). Možnost základního detekování rozvržení materiálové skladby malby v celé její ploše i ve vnitřní struktuře na úrovni radiografického snímku s vysokým rozlišením je z hlediska výpovědní hodnoty skutečným přínosem a razantním krokem kupředu vzhledem k běžně využívaným standartním metodám rentgenování uměleckých děl. Z hlediska konstrukčního je tato metoda již dnes dostupná a mnohá pokusná měření přinesla velmi zajímavé výsledky. Jednotlivé pigmenty lze skutečně v naměřených radiogramech rozeznávat a to samozřejmě v závislosti na jejich chemickém složení, které determinuje jejich vizibilitu či úroveň propustnosti RTG záření při průchodu vrstvou malby. V následném postprodukčním procesu se pak jednotlivým naměřeným energiím přiřadí falešné barvy, aby je bylo možné vizuálně odlišit a zobrazit tak jejich distribuci v ploše zkoumaného obrazu. Je samozřejmě také možné vizualizovat veškeré naměřené energie, nebo pouze selektivní skupinu energií, které v tomto případě můžeme označit jako spektra. Tímto způsobem zpracování naměřených dat tedy vzniká multispektrální radiografický snímek zkoumaného předmětu.

Výzvou do budoucna ovšem zůstává přesná definice jednotlivých naměřených energií takovým způsobem, aby z nich bylo možné zpětně odvodit příslušnost daného materiálu jak je tomu například při použití XRF. Pro tyto účely se nabízí využití pokročilých algoritmů na bázi umělé inteligence a *Big Data*.³⁹ Provedená testování ve společnosti InsightArt ukazují, že lze docílit přesné definice jednotlivých materiálů/pigmentů s využitím pokročilých algoritmů a jejich implementace do

vyhodnocovacího systému je do budoucna velmi pravděpodobná. V kombinaci s vytvořením dostatečně reprezentativní databáze jednotlivých stylů malby různých autorů lze tímto způsobem interpretovat naměřená radiografická data také s odkazem na autorství, provenienci, nebo dataci zkoumaných uměleckých děl.



• Obr. 36 - Energetické zobrazení distribuce pigmentů v malbě. Zdroj: InsightArt

Významný potenciál skýtá také využití takzvané materiálově citlivé rentgenové laminografie-MRXL (Material resolving X-ray laminography). Tato metoda kombinuje měření pomocí energeticky citlivé radiografie s vysokým rozlišením s technikou laminografie. Laminografie je v podstatě způsob 3D zobrazování, kdy zkoumaný plochý obraz měříme v daném úhlu k detekčnímu zařízení, čímž vzniká 3D projekce zkoumaného objektu. Ve spojení s MRXR by výsledná projekce navíc měla rozlišení, které by bylo vypovídající i v limitovaných rozměrech jednotlivých vrstev obrazů na plátěných a dřevěných podložkách. Další přidanou hodnotou je samozřejmě detekce distribuce jednotlivých materiálů v rámci výsledné projekce. Výsledek takového měření by se dal popsat jako *energeticky definující makro 3D stratigrafická projekce vnitřní struktury obrazu*. Vývoj této technologie je závislý na sofistikovaném konstrukčním řešení skenovací aparatury s využitím moderních detektorů Widepix.

39 IAFRATE, Fernando. *Artificial intelligence and big data*. Hoboken, NJ: ISTE Ltd/John Wiley and Sons, 2017. ISBN 9781786300836

5.1 RENTGENOVÁ MIKORADIOGRAFIE S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM (HRXR- HIGH RESOLUTION X-RAY RADIOGRAPHY)

Přínos této metody pro restaurátorskou praxi spočívá především ve vysokém rozlišení a kvalitě výsledného radiografického obrazu zkoumaného díla. Z doposud provedených měření je patrné, že získaná data přináší detailnější vhled do struktury a způsobu výstavby obrazu, ale také je možné velmi přesně detekovat úroveň degradace jednotlivých vrstev obrazu, rozvržení a úroveň krakeláže, různé mechanické stopy a autorské i druhotné opravy a přemalby (Obr.37). Nejen vysoké rozlišení pořizovaných radiogramů, ale také prakticky nulová úroveň šumu a velký dynamický rozsah jsou pro správnou interpretaci technického stavu a provenienční příslušnosti díla velmi důležitými faktory. Tak jako například ve zdravotnictví, kde je nutné co nejpřesněji identifikovat rozsah a druh onemocnění, aby mohla být stanovena adekvátní léčba, tak i v restaurování a autentifikaci uměleckých děl můžeme aplikovat přesné a správné procesy, pouze pokud je vstupní prošetření důsledné. Přirovnání k lékařskému prostředí je příhodné, jelikož oba obory využívají velmi podobné metody vyšetření – jak fyzikální, tak chemické. Nejvyšší shoda ovšem panuje v jasné tendenci eliminace invazivních zákroků aplikované analýzy a v potřebě zlepšování a upřesňování dosažitelných výsledků aplikovaných metod detekce. Jinými slovy, výsledky zkoumání fyzikální struktury hmoty jsou tak dobré a přesné, jak dobrá a přesná je aparatura, kterou ji zkoumáme. Čím přesnější a detailnější je naše poznání, tím lépe můžeme určit původ nebo stáří zkoumaného objektu, ale také úroveň jeho poškození a míru nepůvodních zásahů do jeho struktury. Využití spektrálních rentgenových pixelových detektorů v oboru lékařském i umělecko-historickém je z tohoto pohledu velkým krokem kupředu.⁴⁰ Jak velmi trefně píše profesor Karel Stretti v úvodu knihy Radomila

Klouzy- Pohled do obrazu: „Pochopit komplexně výtvarný záměr autora i malířský postup, kterým bylo dílo vytvořeno, je základní podmínkou pro zachování úplnosti umělecké výpovědi a kvality díla v procesu restaurování, stejně jako při kopírování i při studiu dějin umění. Proto je nepostradatelné detailně porozumět malířské výstavbě obrazu i jeho hmotné struktuře, materiálnímu složení a funkci postupně kladených vrstev malby a vlivu jejich součtu na výsledný umělecký výraz“.⁴¹ Profesor Stretti zde velmi jasně a stručně odhaluje důvody a potřeby důkladného a přesného zkoumání podstaty uměleckého díla pro práci restaurátorů a historiků. Vylepšování našich možností vhledu do obrazu je tak v podstatě odůvodnění aplikace nových technologií na bázi RTG radiografie, které nám přinášejí přesnější a kvalitnější informace o struktuře díla.



• Obr. 37 - Zobrazení degradace vrstvy obrazu, rozvržení a úroveň krakeláže, různé mechanické stopy a autorské i druhotné opravy a přemalby. Zdroj: InsightArt

Nicméně určité množství těchto informací se dá získat i s použitím konvenčně používaných metod rentgenování uměleckých děl a to

40 LAUTERKRANC, Jiří., UHER, Josef. *Nové možnosti průzkumu uměleckých děl pomocí rentgenové transmisní radiografie s využitím nejnovější generace pixelových detektorů*. Fórum pro konzervátory-restaurátory: konference konzervátorů-restaurátorů ... Brno: Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace, 2011-. ISBN 978-80-87896-58-7. ISSN 1805-0050. 2018. s. 104

41 KLOUZA, Radomil. *Pohled do obrazu: technologická kopie obrazu jako tvůrčí studijní proces*. Předmluva. Prof. Karel Stretti, ak. Mal., RŠM AVU. Boskovice: Albert, 2014. ISBN 9788073262457. s. 6

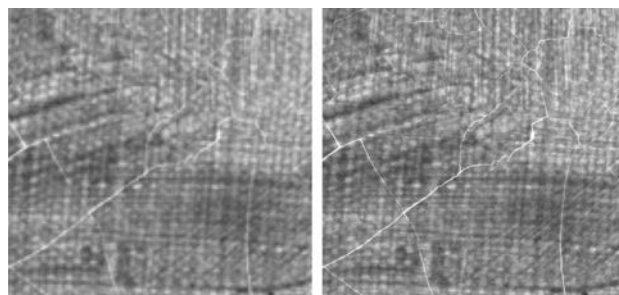
v některých případech s nižší časovou a technologickou náročností (Obr.38), avšak s limitací konvenčních aparatur, jako je nízké rozlišení (Obr.39), malý dynamický rozsah (Obr.40) a vysoká úroveň šumu (obr.41).



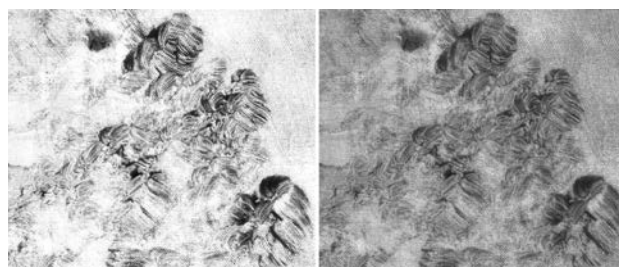
• Obr. 38 - Porovnání radiografických snímků, nahoře RTG snímek naměřený s pomocí nepřímé digitalizace na fotografickou fólii, dole mikroradiografie ve vysokém rozlišení s využitím detektoru Wipepix. Zdroj: InsightArt a ÚTEF

Využitelnost HRXR s pomocí detektorů Wipepix je tedy přímo závislá na uživatelské

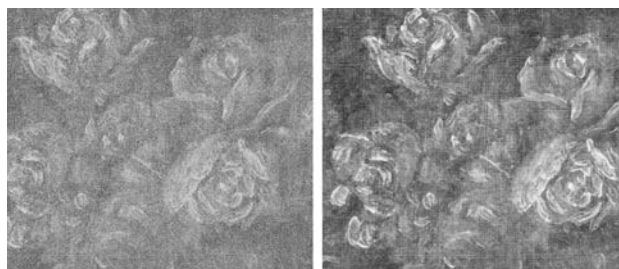
přívětivosti celého skenovacího systému a jeho softwarového řešení, které by mělo být optimalizované pro využití v běžných restaurátorských ateliérech a průzkumných laboratořích.



• Obr. 39 - Rozlišení 150µm vs. 50µm. Zdroj: InsightArt



• Obr. 40 - Malý vs. velký dynamický rozsah. Zdroj: InsightArt



• Obr. 41 - Vysoký šum vs. nízký šum. Zdroj: InsightArt

Využitelnost metody v restaurátorské praxi :

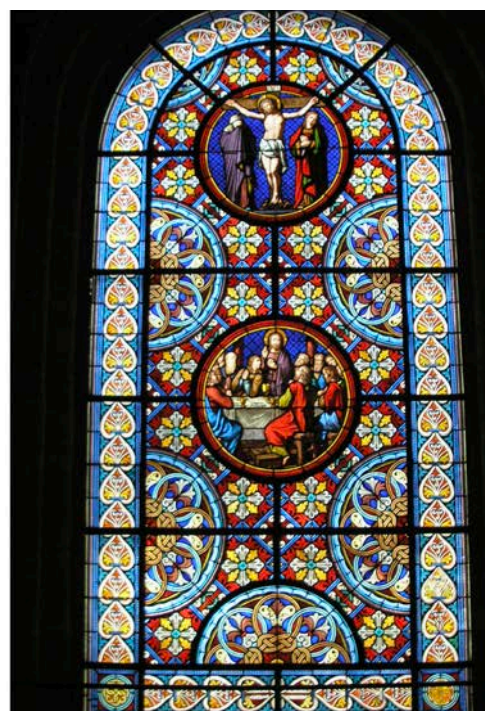
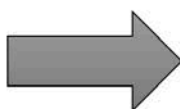
- Autentifikace uměleckých děl- detekce kopií a padělků (porovnání celkové technologické výstavby zkoumaného díla v jeho vnitřní struktuře).
- Detekce přemalůb a druhotných zásahů.
- Přesné mapování rozsahu poškození a krakeláže.
- Vysoká efektivita při použití na dřevěných polychromovaných plastikách.
- Přesná detekce technického řešení architektury obrazů na dřevěných deskách.

- Vysoké rozlišení snímku z HRXR může být v průzkumu některých uměleckých děl základním požadavkem.
- Vstupní data pro některé další průzkumné metody využívající pokročilé počítačové algoritmy.

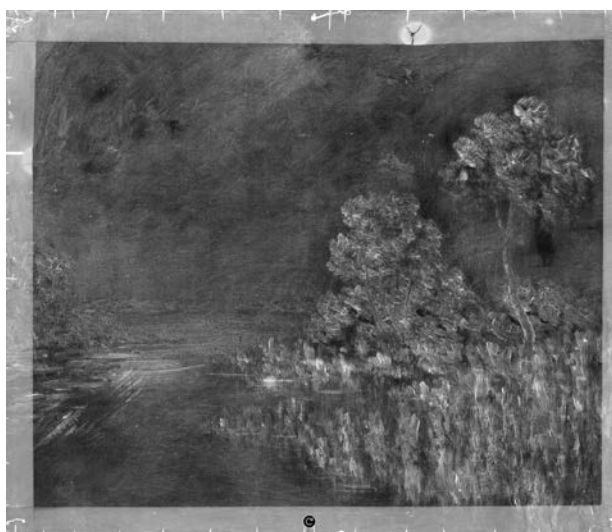
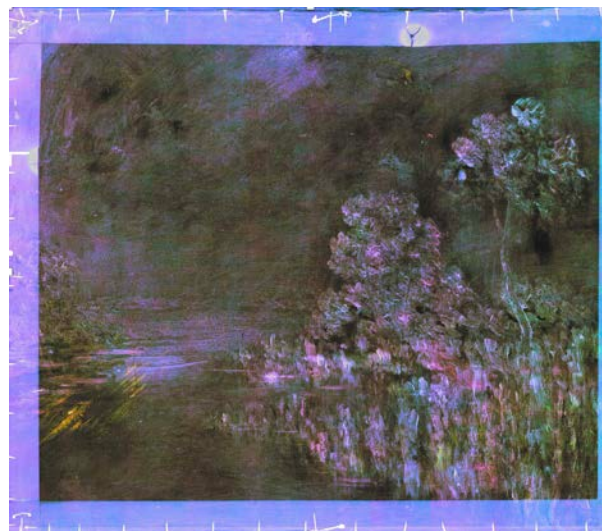
5.2 ENERGETICKY CITLIVÁ RENTGENOVÁ MIKORADIOGRAFIE (MRXR- MATERIAL RESOLVING X-RAY RADIOGRAPHY)

Pro neinvazivní průzkum uměleckých děl malířských je tato metoda velmi významným přínosem z hlediska širokého záběru využitelných informací. Tuto technologii lze bez nadsázky přirovnat k přechodu z černobílé fotografie na barevnou, i v tomto případě barevná radiografie přináší zcela nové možnosti vnímání zobrazovaných informací. Například z černobílé fotografie lze jen těžko vyčíst informace o materiálu zobrazeného předmětu, ale pokud na barevné fotografii vidíme například zelenou střechu, můžeme vydedukovat, že je vyrobena z mědi. Obdobným způsobem rozšiřuje naše vnímání a rozlišovací schopnosti také materiálově / barevně citlivá radiografie (Obr.42).

Celoplošné materiálové radiografické mapování díla bez nutnosti invazivního zásahu do jeho struktury je proto nejvýznamnějším přínosem spektrálních pixelových detektorů Widepix. Tato metoda celoplošného materiálového mapování přináší do oboru průzkumu uměleckých děl zcela nové možnosti. V první řadě je to dokonalá orientace výzkumníka ve vnitřní struktuře díla díky vysokému rozlišení naměřeného radiografického obrazu (Obr. 43,44,45). Dále je to znalost rozložení jednotlivých materiálů v celé ploše obrazu a ve všech jeho vrstvách, a to opět ve vysokém rozlišení, které umožňuje dílo zkoumat v mikroskopických rozměrech. Opravdu velký potenciál této metody se také skrývá v možnosti multispektrálního zobrazování, kde každá naměřená spektrální informace může být použita pro identifikaci a zobrazení jednotlivých materiálů. Následným přidáním barev specifickým energetickým spektrům můžeme pak ve výsledném radiogramu tyto materiály vizualizovat, nebo filtrovat dle potřeby. Tímto způsobem si na zkoumaném díle můžeme zobrazit například pouze výskyt olovnatých pigmentů v celé ploše obrazu nebo použít kombinaci zobrazení pigmentů na bázi železa, titanu, mědi atd.



- Obr. 42 - Z porovnání černobílé a barevné fotografie skleněné vitráže je velmi dobře patrné, jak významný objem informací zprostředkovává lidskému vnímání zobrazení na úrovni spektra RGB. Podobným způsobem se rozšiřují naše rozeznávací schopnosti s využitím barevně / energeticky citlivé RTG radiografie. Zdroj: Josef Uher- InsightArt



- Obr. 43,44,45 - Fotografie kopie obrazu Edvarda Muncha *Na mostě* (vlevo nahoře), černobílý RTG snímek odhaluje malbu krajiny ukrytou pod svrchním obrazem (vlevo dole) a na barevném RTG snímku (vpravo nahoře) můžeme vidět distribuci jednotlivých pigmentů v odhalené malbě. Zdroj: InsightArt

snímku může také sloužit pro odhalení různých autorských změn a úprav v kompozici obrazu.⁴² U mnohých umělců je také běžné přemalovávání vlastních obrazů jinými motivy, v takových případech je pak možné od sebe jednotlivé vrstvy vizuálně „oddělit“ a rekonstruovat právě pomocí jednotlivých naměřených spekter.⁴³

Díky těmto specifikacím můžeme metodu MRXR hodnotit jako multispektrální, nebo hyperspektrální. Využitím multispektrální materiálově citlivé rentgenové radiografie se otevírají zcela nové možnosti nejen pro přesné nastavování restaurátorských a konzervačních procesů, ale především pro autentifikaci uměleckých děl a pro odhalování falzifikátů.

Výběr určitých energetických kanálů (materiálů) ve výsledném radiografickém

Využitelnost metody v praxi :

- Autentifikace uměleckých děl- detekce kopií a padělků (porovnání distribuce použitých materiálů/pigmentů v celé ploše zkoumaného díla).
- Komplexní informace o celoplošné materiálové skladbě díla.
- Detekce přemalůb a druhotných zásahů
- Přesné mapování rozsahu poškození a krakeláže.

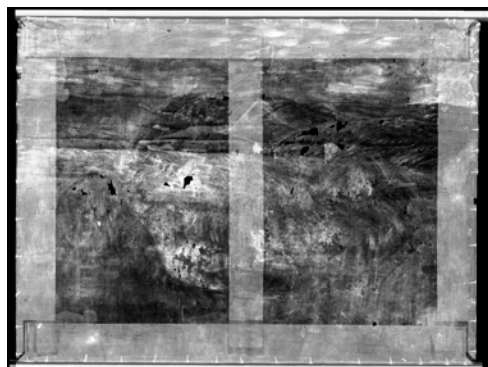
⁴² Součástí praktické části této práce je také průzkum díla La Crau s pohledem na Montmajour signovaného Vincent. S využitím materiálově citlivé radiografie byla pod vrstvou malby objevena malba nahé ženské postavy, kterou se díky filtraci jednotlivých energetických kanálů podařilo v plné míře vizualizovat jak je vidět na obrázcích č. 46, 47, 48 a 49. Obrázky 50, 51 a 51a pak představují možnosti vizualizace jednotlivých energetických kanálů na stejném obraze.

⁴³ LAUTERKRANC, Jiří., UHER, Josef. *Nové možnosti průzkumu uměleckých děl pomocí rentgenové transmisní radiografie s využitím nejnovější generace pixelových detektorů*. Fórum pro konzervátory-restaurátory: konference konzervátorů-restaurátorů .. Brno: Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace, 2011-. ISBN 978-80-87896-58-7. ISSN 1805-0050. 2018. s. 105

- Přesná detekce technického řešení architektury obrazů na dřevěných deskách a materiálové určení spojovacího technického materiálu.
- Vysoké rozlišení snímku a detekce distribuce materiálů z MRXR může být v průzkumu některých uměleckých děl základním požadavkem.
- Vysoká efektivita při použití na dřevěných polychromovaných plastikách.
- Vstupní data pro některé další průzkumné metody využívající pokročilé počítačové algoritmy.



- Obr. 46 - La Crau s pohledem na Montmajour- fotografie v rozptýleném světle. Zdroj: Jiří Lauterkranc



- Obr. 47 - La Crau s pohledem na Montmajour- HRXR. Zdroj: InsightArt



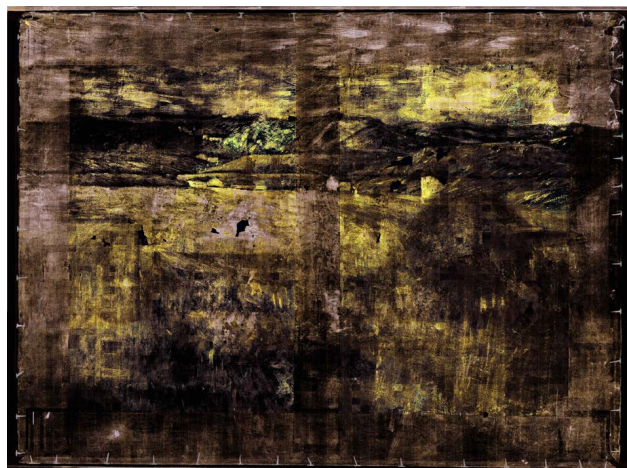
- Obr. 48 - La Crau s pohledem na Montmajour- MRXR. Zdroj: InsightArt



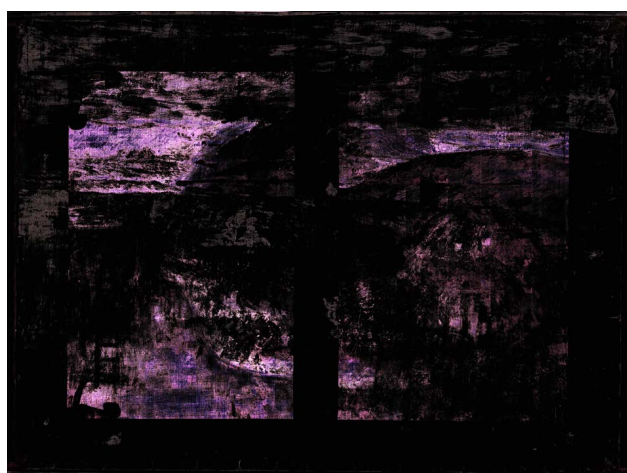
- Obr. 49 - La Crau s pohledem na Montmajour- zobrazení původní malby pomocí nástroje multispektrálního zobrazování v MRXR. Zdroj: InsightArt



- Obr. 50 - La Crau s pohledem na Montmajour- využití spektrálního zobrazování pro vizualizaci původní malby. Zdroj: InsightArt



• Obr. 51 - La Crau s pohledem na Montmajour- MRXR- vizualizace pigmentů s dominancí zinku, chromu a kadmia. Zdroj: InsightArt



• Obr. 51a - La Crau s pohledem na Montmajour- MRXR- vizualizace pigmentů s dominancí olova. Zdroj: InsightArt

5.3 ENERGETICKY CITLIVÁ RENTGENOVÁ LAMINOGRRAFIE (MRXL- MATERIAL RESOLVING X-RAY LAMINOGRAPHY)

I laminografie (MRXL) s využitím integrovaných detektorů Widepix by se mohla stát velice užitečným nástrojem pro restaurátory, historiky i technology zabývající se průzkumem uměleckých děl. Jedním z nejdůležitějších aspektů prováděných průzkumů je znalost stratigrafie vrstev díla a v současné době k této informaci vede pouze invazivní

zásah do jeho struktury v podobě odebrání vzorků pro laboratorní průzkum- nábrus vzorku a mikroskopie (obrazy na plátně či dřevěných deskách), nebo stratigrafická sonda (polychromovaná plastika, nástěnná malba). Energeticky citlivá laminografie ve vysokém rozlišení umožňuje nejen znalost přesného stratigrafického složení díla, ale i komplexní informace o jeho materiálovém složení v jednotlivých vrstvách. Tato metoda by se pak mohla stát doslova revolučním standardem v ne-invazivním průzkumu uměleckých děl.⁴⁴

Využitelnost metody v praxi:

- Náhrada nebo doplnění současné metody průzkumu stratigrafie vrstev díla.
- Identifikace materiálů v jednotlivých vrstvách malby.
- Znalost stratigrafické kompozice jednotlivých vrstev v celé ploše díla.
- Autentifikace uměleckých děl- detekce kopií a padělků (porovnání distribuce použitých materiálů/pigmentů v celé ploše zkoumaného díla).
- Zmapování rozsahu poškození ve vnitřní struktuře.
- Zmapování úrovně účinnosti adheze jednotlivých vrstev malby.
- Vstupní data pro některé další průzkumné metody využívající pokročilé počítačové algoritmy.

5.4 RENTGENOVÉ KUKÁTKO (X-RAY SPYGLASS)

X-ray Spyglass- přístroj který dokáže poskytnout restaurátorovi rychlou radiografickou informaci kdekoliv v terénu a vejde se pohodlně do cestovního kufříku. To je idea takzvaného rentgenového kukátka, které je v současné době také ve vývoji společnosti InsightArt.⁴⁵ Celá myšlenka je založena na použití velmi kompaktního PCC detektoru Minipix od společnosti Advacam. Kamera

⁴⁴ Insightart.eu. Technology. Development. 2018. Dostupné z: <https://insightart.eu/technology/developemnt/>

⁴⁵ Insightart.eu. Technology. Development. X-ray Spyglass 2018. Dostupné z: <https://insightart.eu/technology/developemnt/>

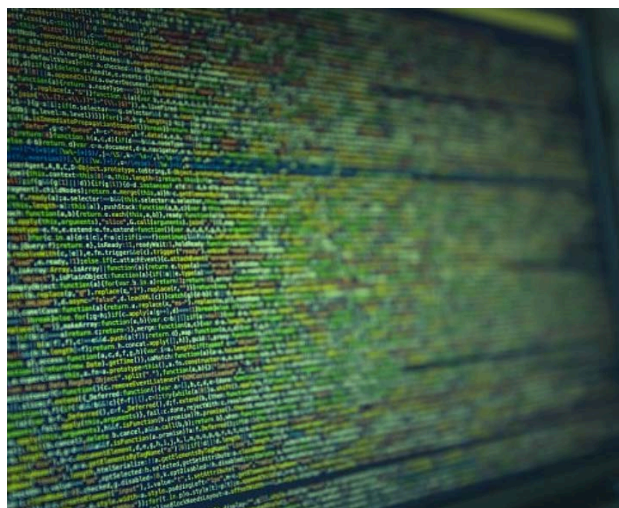
Minipix je postavena na platformě jediného silikonového detektoru Timepix a pro připojení využívá rozhraní USB 2.0. Senzitivní oblast této kamery činí 14 mm x 14 mm s počtem pixelů 256 x 256 a rozlišením 55 μm .⁴⁶ Ve spojení s dostatečně kompaktním zdrojem rentgenového záření, který nevyžaduje náročnější radiační ochranu se kamera Minipix dá využít k rychlému RTG náhledu do struktury zkoumaného díla a to opět s možností energeticky/materiálově citlivé radiografie. Samozřejmostí pak bude připojení RTG kukátka k mobilnímu telefonu, notebooku nebo tabletu pro živý náhled a ukládání pořízených snímků. Využitelnost takové kompaktní aparatury pro radiografický restaurátorský průzkum je jistě neoddiskutovatelná, dále se ale nabízí přístroj použit například pro kontrolu stavu díla v průběhu náročných transportů, nebo pro zaznamenání unikátního RTG otisku/podpisu obrazu (fingerprinting), který znemožní jakékoli budoucí falšování podepsaného díla.

5.5 FINGERPRINTING

Fingerprinting je založen na jednoduché detekci přesně stanovené části díla v jeho makroskopické vnitřní struktuře. Umožňuje snadným a rychlým způsobem zaznamenat jedinečný a neopakovatelný klíč k rozpoznání jakéhokoli malířského díla a je tedy ideálním způsobem pro zabezpečení a evidenci celých uměleckých sbírek. Tento koncept radiografické kontroly je založen na použití technologie rentgenového kukátka (X-ray Spyglass), kterým lze velmi rychle zaznamenat radiografický snímek díla o velikosti 14 mm x 14 mm v přesně definované oblasti. Toto měření pak lze kdykoli v budoucnu opakovat a pomocí programu využívajícího pokročilé matematické algoritmy ověřit totožnost díla v zabezpečené databázi. Potenciál této metody může být také využit k evidenci a elektronické katalogizaci uměleckých děl současných umělců, čímž se do budoucna prakticky znemožní jejich padělání.

Umělecké dílo s takovým digitálním podpisovým kódem je pak v průběhu celé své existence velmi snadno ověřitelné při případném restaurování, nebo v procesu pojistných a obchodních transakcí.

5.6 BIG DATA A NEURONOVÉ SÍTĚ

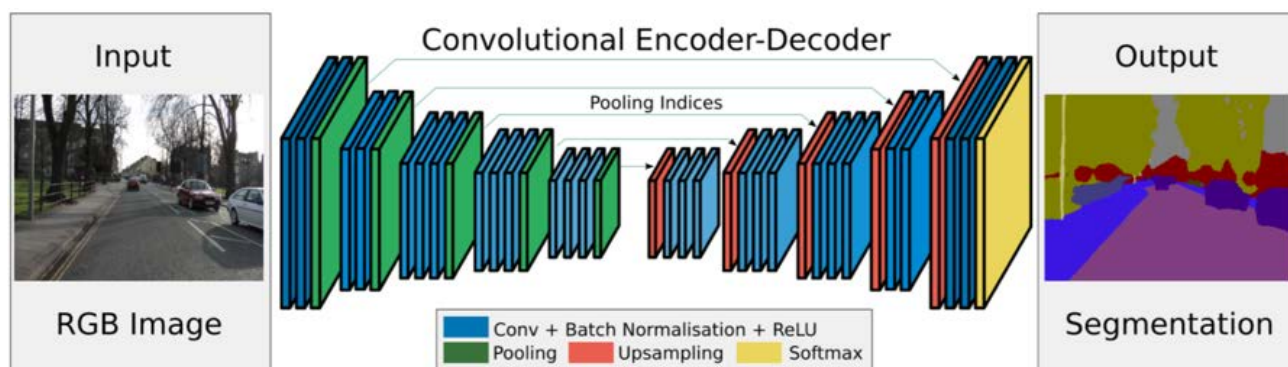


• Obr. 52 - Ilustrační foto - Big Data. Zdroj: Insane Lab

Speciální kapitolu v oblasti neinvazivního průzkumu uměleckých děl malířských představují takzvaná Big Data (BD) využívající strukturu neuronových sítí v oblasti AI (Artificial intelligence). Tato technologie již byla pro tyto účely několikrát úspěšně testována a v dnešní době existují společnosti, které se snaží vybudovat globálně uznávaný systém pro autentifikaci uměleckých děl pomocí neuronových sítí (Obr.53) v kombinaci s BD. Neuronové sítě jsou vlastně pokročilý matematický algoritmus inspirovaný právě strukturou neuronových sítí v buňkách lidského těla, tento algoritmus dokáže na základě své struktury vyhodnocovat vstupní data, která se následně dále rozvíjí /učí. Kvalita výsledných dat je zpočátku samozřejmě závislá na implementovaných vstupních informacích, se kterými takový systém pracuje.⁴⁷ Tento systém se již dnes označuje za AI, i když dle známého Turingova testu se v pravém slova smyslu o umělou inteligenci nejedná: obecně Turingovo

⁴⁶ Minipix. *Portable Small USB Camera*. Dostupné z: <http://advacam.com/camera/minipix>

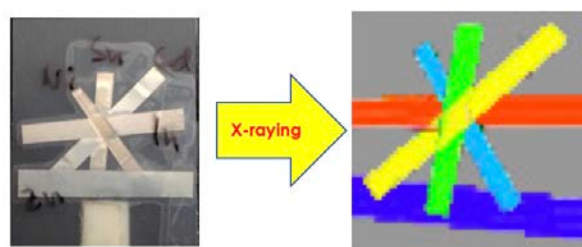
⁴⁷ SUH, Sang C. *Big data and visual analytics*. New York, NY: Springer Science+Business Media, 2017. ISBN 978-3-319-63915-4



• Obr. 53 - Systém učení Neuronových sítí k rozpoznávání materiálů. Zdroj: Josef Uher- InsightArt

pravidlo zní, že za inteligentní můžeme stroj prohlásit pouze v případě, že nerozeznáme jeho lingvistický výstup od lingvistického výstupu člověka.

Termín Big Data je dnes všeobecně užíván pro praktické zpracovávání ohromného množství dat, k předem určenému výstupu. Názornými příklady v efektivním využívání BD jsou například nadnárodní společnosti Google a Facebook. V této souvislosti jsou BD využívány pro vylepšování vyhledávacích nástrojů, ke zefektivňování celkové uživatelské funkčnosti a k optimalizaci komerčních sdělení v rámci vyhledávačů a sociálních sítí takovým způsobem, aby se uživatel zobrazovali pokud možno nejrelevantnější výsledky podle zaznamenané stopy jeho chování na internetu. Bez těchto technologií by se také neobešly osobní asistenční programy, jako jsou například SIRI od společnosti Apple, ALEXA od Amazonu, nebo Google Assistant a Google Home. Obdobný systém je dnes také testován k rozpoznávání rukopisu jednotlivých malířů a malířských stylů.⁴⁸ Vždy se však zatím jedná pouze o data získaná z 2D povrchové struktury zkoumaného díla, která jsou samozřejmě ovlivněna jak technickým stavem samotného díla, tak nestandardizovaným způsobem jejich získání. To znamená, že pro přesné porovnání malířského stylu několika maleb je zapotřebí pořídit vstupní snímky s naprosto přesnými parametry, jako jsou úroveň a teplota světelného zdroje nebo typ a kvalita snímacího čipu použitého fotoaparátu či skeneru.



• Obr. 54 - Soubor různých metalických plíšků naskenovaných pomocí MRXR a definovaných pomocí neuronových sítí. Zdroj: Josef Uher- InsightArt

Hypotetické propojení současných AI a BD algoritmů s detekční aparaturou materiálově citlivé radiografie ve vysokém rozlišení (MRXR) by mělo za následek přesnou standardizaci naměřených vstupních dat a veškeré výpočty by tak probíhaly na úrovni vnitřní struktury zkoumaného obrazu, kde by navíc mohla být započítána i materiálová/energetická kompozice zkoumané malby (Obr.54). Tímto způsobem by se enormně zvýšila efektivita a výpovědní hodnota analýzy uměleckých děl na úrovni algoritmů neuronových sítí a umělé inteligence.

⁴⁸ COSTA, Vincent., DELLUNDE, Pilar., FALOMIR, Zoe. *Artificial intelligence research and development: current challenges, new trends and applications*. Washington, DC: IOS Press, 2018. ISBN 9781614999171. s. 37-46

VÝVOJ APARATURY PRO RADIOGRAFICKÉ ZOBRAZOVÁNÍ POMOCÍ DETEKTORŮ WIDEPHX

Jedním z hlavních cílů této práce je zmapování možností rentgenové radiografie uměleckých děl s využitím detektorů Medipix a také zároveň definovat parametry funkční aparatury pro restaurátorský a laboratorní provoz. V rámci svého výzkumu se od roku 2016 podílím ve firmě InsightArt na vývoji aparatury pro rentgenování uměleckých děl s pomocí nejnovějších detekčních kamer Widepix s integrovanými silikonovými detektory Medipix. Vzhledem k velmi rozmanitým požadavkům tohoto odvětví, není však zcela jednoduché definovat přesné parametry vyvíjené technologie. Pokud aplikujeme takový výzkum a vývoj například ve zdravotnictví s jasným požadavkem, že chceme detekovat měkké tkáně v lidském těle, je zde zároveň stanoveno několik základních parametrů. V první řadě musí být použita detekční aparatura natolik senzitivní, aby dokázala měkké tkáně zobrazit, a zadruhé musí být konstrukční řešení celé aparatury definováno rozměry lidské postavy. Pokud budeme vyvíjet přístroj pro letištní kontrolu zavazadel nebo pro kontrolu kvality v automobilovém průmyslu, mohou být požadavky a parametry přístroje také definovány poměrně zřetelně. V oblasti průzkumu uměleckých děl je situace poněkud složitější, hlavním požadavkem je zde totiž převážně objasnění skutečností, které byly doposud neobjasnitelné, bohužel ale přesně nevíme o jaké skutečnosti se jedná, natož jestli vůbec existují. To ve zkratce znamená, že nevíme přesně, co hledáme, ale spíše testujeme co vše můžeme najít. Základní parametry použitých detektorů jsou samozřejmě dané i s rozsahem jejich detekčních schopností, problém tedy spočívá spíše v rozsahu a variabilitě předmětu zkoumání, kterým jsou umělecká díla. S použitím základních RTG technik získáváme ucelený rámec informací, který se většinou výrazně neodchyluje od našeho očekávání, to znamená, že na obraze na plátěné podložce můžeme v radiografickém snímku vidět původní malbu, pokud byl obraz přemalován, skryté defekty malby, nebo rozmístění hřebíků v napínacím rámu, u obrazů

na dřevěných deskách pak třeba architekturu spoju jednotlivých dřevěných desek. Pokud ale aplikujeme zcela neprobádanou detekční techniku na tak variabilní předmět, jako je vrstvená malba, musíme otestovat nejen nespočet variací nastavení celé aparatury, ale i širokou škálu nejrozličnějších druhů a typů maleb. S ohledem na rozsáhlé schopnosti testovaných detektorů a na obrovskou variabilitu způsobů zpracování malby v průběhu staletí se jedná o nelehký úkol. V souhrnu lze definovat technická řešení na několika základních úrovních, která jsou predikována danými parametry aplikované technologie a předmětu zkoumání. Z podstaty testované RTG technologie vyplývají základní požadavky na radiační bezpečnost a zajištění stability systému. Dále jsou zde parametry vycházející z architektury použitého detektoru a zdroje rentgenového záření. Zde se jedná především o malé rozměry použitého detektoru a s tím spojená potřeba modulárního skenovacího systému. Nutnost použití skenovací aparatury následně přináší další úroveň technických řešení, jako jsou například dimenzionální rozsah aparatury, synchronizace detektoru a zdroje rentgenového záření, bezpečné vedení kabeláže, chlazení detektoru v průběhu jeho pohybu a další. Co se konstrukční stránky týče, je zde potřeba praktického uzpůsobení architektury přístroje pro bezpečné ukotvení obrazů tak, aby bylo eliminováno jejich potenciální poškození v průběhu souvislých posunů detektoru a rentgenky či při manipulaci s dílem v průběhu jeho upevňování do aparatury. Další úrovní vývoje celého systému je zpracování a interpretace naměřených dat pomocí vhodného softwarového řešení v rámci postprodukčního procesu.

Posledním úkolem vývojového procesu je uzpůsobení výsledné aparatury potřebám odvětví, pro které byla vytvořena s ohledem na praktičnost a uživatelskou přívětivost v každodenním provozu. Designová stránka vyvíjené aparatury nebyla v této fázi projektu primárně řešena a tím pádem výsledný vzhled přístroje vychází čistě z funkčních požadavků v kombinaci designu jednotlivých použitých komponentů.

6.1 TECHNICKÉ POŽADAVKY A SCHÉMATICKÁ ŘEŠENÍ

Jak již bylo řečeno, technické požadavky vyvíjené aparatury jsou do značné míry definovány technickými parametry aplikované detekční technologie, bezpečností provozu v rámci radiační ochrany, potřebami specifického předmětu zkoumání a konfigurací uživatelského prostředí pro provoz v daném odvětví. Dalším důležitým požadavkem je také mobilita modulární aparatury, pro její případný transport mezi jednotlivými pracovišti. Vzhledem ke komplikovaným transportním podmínkám uměleckých děl v rámci jednotlivých zemí, nebo i mnohdy v rámci jednoho státu, je mobilita výsledné aparatury velmi důležitým aspektem. Problematika mobility nespočívá ani tak v konstrukčním řešení skenovací aparatury a v náročnosti její instalace a de-instalace, jako spíše v míře požadavků na radiační ochranu a její rozličné specifikace v různých provozech jednotlivých zemí. Z hlediska maximální využitelnosti je tedy nutné přizpůsobit technická řešení i potřebám ateliérů a laboratoří, které nedisponují certifikovaným radiografickým pracovištěm.

V průběhu roku 2016 byl zahájen vývoj prvního prototypu modulárního skeneru s implementovaným detektorem Widepix 2(1)x5. Vývoj této verze probíhal již v rámci nově vzniklé společnosti InsightArt ve spolupráci s Akademií výtvarných umění v Praze, která poskytla potřebné zázemí v podobě radiografického pracoviště v budovách Moderní galerie (Obr.55). Tento první model byl postaven na schématu modulární hliníkové konstrukce o rozměrech 120 cm x 70 cm x 128 cm s lineárními posuvy pro detektor Widepix a stabilním zdrojem rentgenového záření v podobě rentgenky ERESKO MF1 s rozsahem napětí 20-200 kV. Pro zpracování a export naměřených dat byl použit operační systém Pixelman,⁴⁹ vyvinutý v ÚTEF při ČVÚT pro použití s detektory MediPix.

Technické parametry prvního prototypu:

- Rentgenka: ERESKO MF1 200kV
- Kamera: WidePix 2(1)x5
- Chladič detektoru: 1-Cube- Colortube
- Řídící elektronika
- Mechanická posuvná aparatura: Microcon 700 mm
- Modulární konstrukce pro ukotvení obrazu
- Operační systém: PIXELMAN
- Odstíněné prostředí splňující normy radiologického pracoviště



• Obr. 55 - První prototyp modulární skenovací aparatury instalovaný v RTG místnosti na AVU. Zdroj: InsightArt, 2016

Na základech tohoto funkčního prototypu byla následně postavena první mobilní verze 2D skeneru s integrovanou pohyblivou rentgenkou kompaktních rozměrů. Tato vylepšená varianta nese označení RToo 2D a právě díky integrovanému zdroji rentgenového záření ji můžeme považovat za první skutečně mobilní verzi.

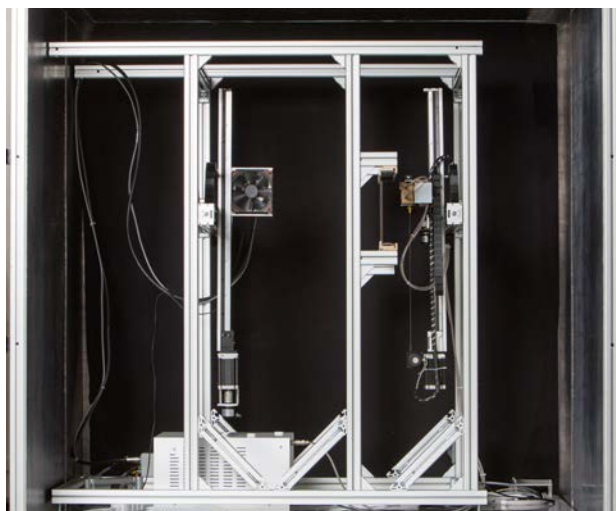
⁴⁹ TUREČEK, Daniel., Holý, T., JAKŮBEK, Jan., POSPÍŠIL, Stanislav., VYKYDAL, Zdeněk. (2011). *Pixelman a multi-platform data acquisition and processing software package for Medipix2, Timepix and Medipix3 detectors*. Journal of Instrumentation. 6. C01046. 10.1088/1748-0221/6/01/C01046

6.2 RToo 2D

Aparatura s označením RToo 2D byla vyvíjena v průběhu roku 2017 a dočkala se několika zásadních konstrukčních vylepšení. Za nejdůležitější vývojový mezník by se dala považovat implementace kompaktního zdroje rentgenového záření do duálního posuvného skenovacího systému. Tímto krokem se totiž výrazně eliminovala úroveň expozice celé plochy analyzovaného obrazu rentgenovým zářením a zároveň se standardizovala míra fokusace exponované plochy. Ve variantě aparatury se statickým zdrojem RTG záření bylo značně problematické udržet stabilní výkon rentgenky po celou dobu měření v důsledku kolísání napětí při delším provozu, což mělo za následek nerovnoměrnou míru expozice detektoru v různých fázích skenování obrazu. V novém modelu se tedy zdroj RTG záření pohybuje po lineárním posuvu instalovaném zrcadlově proti posuvu pohybujícímu detektorem. Díky jejich přesně synchronizovanému vzájemnému pohybu v průběhu skenování bylo konečně možné dosahovat standardizovaných výsledků měření. Právě standardizace nastavených parametrů jednotlivých částí aparatury umožňuje dosažení stabilních výsledků samotného měření. Při dosažení stabilizace výstupních dat lze teprve přistoupit k jejich optimalizaci v rámci postprodukčního procesu s ohledem na co nejefektivnější využití možností detektoru Widepix. Zde se jedná hlavně o využití potenciálu materiálově citlivé rentgenové radiografie s ohledem na potřeby restaurátorského průzkumu uměleckých děl.

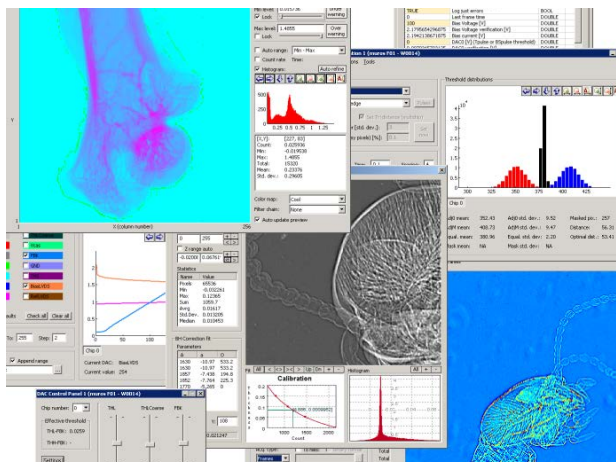
Konstrukce modelu RToo 2D (Obr.56) je postavena na modulárním aluminiovém rámu o rozměrech 120 cm x 70 cm x 128 cm, oproti předchozí verzi však došlo k několika konstrukčním vylepšením, která měla za následek zpevnění celé konstrukce a eliminaci nežádoucích vibrací v průběhu měření. Jako zdroj rentgenového záření je zde použita rentgenka Oxford Instruments Apogee o maximálním napětí 50kV, s vyzařovacím spotem 30 μm a beryliovým okénkem. Detektor Widepix 2(1)x5 zůstal oproti předchozí verzi nezměněn. Jako operační

systém pro zpracování a export naměřených dat byl použit opět program Pixelman (Obr.57).



• Obr. 56 - Modulární skenovací systém RToo 2D. Zdroj: InsightArt, foto: Rudy Kovář, 2018

Aparatura RToo 2D již také byla nainstalována do samostatného (mobilního) stíněného boxu, který je tvořen aluminiovou konstrukcí, olověným stíněním a certifikovanými bezpečnostními prvky. Tento *Lead- Shielded Box* je určen převážně pro použití mimo specializovaná radiologická pracoviště, která nemají možnost odstínění rentgenového záření. Rozměry ochranného boxu jsou 1580 cm x 1590 cm x 1586 cm a jeho váha činí 800 kg. Pro potřeby transportu je však možné ochranný box demontovat na jednotlivé části, čímž je značně



• Obr. 57 - Ovládací software Pixelman. Zdroj: <http://aladdin.utef.cvut.cz/ofat/others/Pixelman/Pixelman.html>

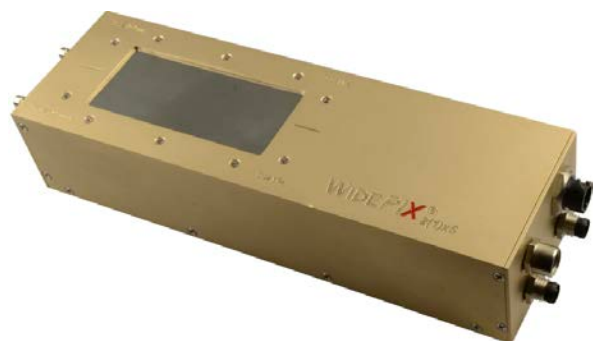
usnadněna jeho mobilita. Vnitřní rozměry ochranného boxu zároveň udávají limity pro maximální rozměry skenovaných obrazů.

Technické parametry RToo 2D

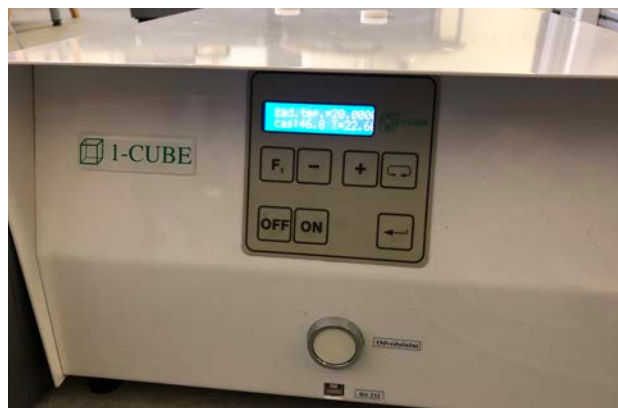
- Rentgenka: Oxford Instruments Apogee 50kV (*Obr.58*)
- Kamera: WidePix 2(1)x5 (*Obr.59*)
- Chladič detektoru: 1-Cube- Colortube (*Obr. 60*)
- Řídící elektronika
- Mechanická posuvná aparatura: Microcon 700mm
- Modulární konstrukce pro ukotvení obrazu
- Software: PIXELMAN
- Certifikovaný Lead- Shielded Box
- Interlock (*Obr.61*)



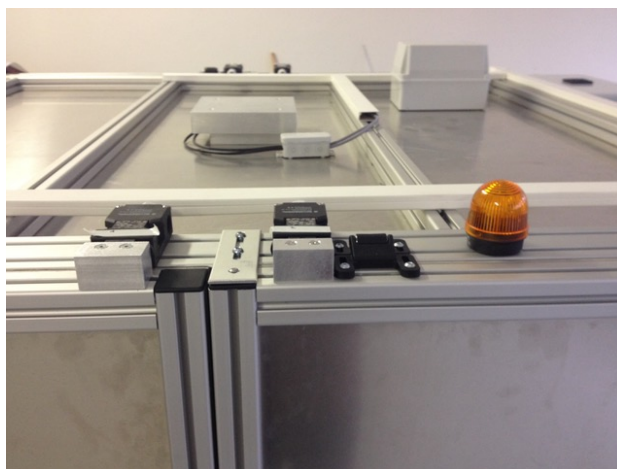
- Obr. 58 - Rentgenka Oxford Instruments Apogee. Zdroj: <https://xray.oxinst.com/products/x-ray-tubes/apogee-5500-series-radiation-shielded-x-ray-tube>



- Obr. 59 - Detektor WidePix 2(1)x5. Zdroj: Advacam



- Obr. 60 - Chladič detektoru 1-Cube- Colortube



- Obr. 61 - RToo Shielded Box- Interlock. Zdroj: InsightArt, 2018

6.3 RToo 3D

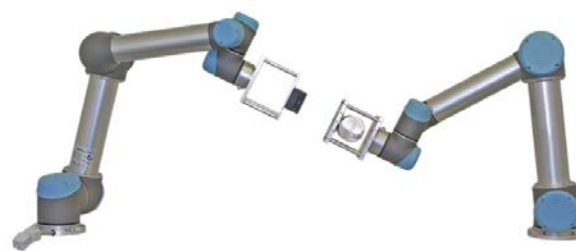
Doposud posledním vývojovým článkem aparatury RToo, je model RToo (*Obr.62*). Jeho konstrukce se zcela liší od předchozích verzí využitím robotického systému k posuvům zdroje rentgenového záření a detektoru. Celková koncepce je tedy postavena na konstrukci dvou synchronizovaných robotických manipulátorů, díky nimž se rozšiřuje možnost skenovací aparatury o mobilitu ve 3D prostoru namísto předchozímu systému limitovanému pohybem dvěma směry (nahoru, dolů a doleva, doprava). Použití robotických ramen rozšiřuje možnosti aplikace přístroje také na skenování dřevěných i jiných plastik, archeologických nálezů a předmětů užitého umění. Právě díky možnosti natáčení aparatury podle libovolné osy, se můžeme na

zkoumaný vzorek dívat prakticky z jakéhokoli úhlu, čímž je možné získat bezprecedentní informace o zkoumaném objektu v perspektivě 3D, která v tomto případě může suplovat počítačovou tomografii a tomosyntézu. RToo 3D tedy kombinuje veškeré výhody předchozího modelu se zcela inovativním přístupem k manipulaci s detektorem a rentgenkou. Tato koncepce vznikla ve spolupráci firmy InsightArt, která přispěla svým know-how z předchozích modelů a Radalitica, která měla za úkol vývoj a programování celého robotického systému postaveného na pohyblivých manipulátorech Universal Robots UR-5 (Obr.63). Dalším vylepšením v aparatuře RToo 3D je použití zcela nové modelové řady detektoru Widepix 1x5 MPX3 Si, s jehož pomocí lze snížit expoziční časy zhruba na polovinu ve srovnání s předchozími verzemi. Zdroj rentgenového záření zůstal oproti předchozí verzi nezměněn a i v této variantě je použita rentgenka Oxford Instruments Apogee 50kV. Pro dvoufázovou ochranu skenovaných předmětů je do systému zabudována pojistka v podobě laserových stěn.



• Obr. 62 - RToo 3D robotický systém. Zdroj: InsightArt, foto: Rudy Kovář, 2018

S využitím robotických paží se otevřel prostor pro nová zcela inovativní řešení v rámci rentgenové radiografie s pixelovými detektory Widepix. Tato koncepce například přináší možnost ručního programování pozičních pohybů robotických ramen „free run mode“. S pomocí této aplikace výzkumník programuje pohyb robotů manuálně, prostým



• Obr. 63 - Synchronizované robotické manipulátory Universal Robots UR 5. Zdroj: InsightArt, 2018

fyzickým pohybem hlavy jednoho z manipulátorů po zvolené trajektorii kolem zkoumaného objektu. Tato cesta je následně zopakována řídicím programem při „ostrém“ měření, přičemž druhý manipulátor zrcadlově kopíruje ten naprogramovaný - vůdčí. Další nadstavbou je pak využití živého náhledu s pomocí 3D ovládacího joysticku v režimu „real-time mode“, díky kterému lze zkoumaný předmět vizualizovat pod nejrůznějšími úhly. V podstatě se tak jedná o tomografii v reálném čase. Zvolenou cestu náhledu zkoumaného objektu je pak možné samozřejmě zopakovat v režimu „ostrého“ měření. Pro restaurátorskou praxi je tato funkcionality velmi přínosná a to hlavně při průzkumu dřevěných polychromovaných plastik nebo obrazů na dřevěných deskách, velký potenciál je zde samozřejmě také pro průzkum archeologických nálezů a užitého umění (Obr.64).



• Obr. 64 - RToo 3D umožňuje tomografické skenování archeologických nálezů a předmětů užitého umění. Zdroj: InsightArt, foto: Rudy Kovář, 2018

V rámci budoucího vývoje se také počítá s kombinací živého náhledu a vizualizace pomocí virtuální reality (VR) (Obr.65), která by měla přinést skutečně novou dimenzi do způsobu radiografického zkoumání uměleckých děl v podobě 3D virtuální prohlídky vnitřní struktury zkoumaného díla. Manipulace pohybů ve vizualizovaném objektu může být zprostředkována intuitivním haptickým ovládáním, umožňujícím přesnou orientaci v nahlíženém 3D prostoru.⁵⁰ Aparatura RToo 3D je plně kompatibilní s ochranným boxem z předchozí verze RToo 2D (Obr.66).



- Obr. 65 - Nástroj pro virtuální realitu umožní zcela nové možnosti inspekce vnitřní struktury zkoumaného díla. Ilustrační foto. Zdroj:<https://www.eschoolnews.com/2018/07/17/virtual-reality-research-remember/>

Technické parametry RToo 3D

- Rentgenka: Oxford Instruments Apogee 50kV
- Kamera: Widedix 1x5 MPX3 Si
- Chladič detektoru: 1-Cube- Colortube
- Robotická aparatura: Universal Robots UR-5
- Řídící jednotka manipulátorů: Universal Robots
- Modulární konstrukce pro ukotvení obrazu
- Software: RadalyX Studio
- Certifikovaný Lead- Shielded Box
- Interlock

Hlavní výhody robotické aparatury RToo 3D⁵¹



- Obr. 66 - Technické řešení ochranného stíněného boxu se systémem RToo 2D uvnitř. Zdroj: InsightArt

- Použití výkonného pixelového detektoru Widedix 1x5 MPX3 Si. Nejnovější generace rentgenového zobrazovacího detektoru postaveného na architektuře čipu Medipix3.
- 2D spektrální radiografické zobrazování pomocí synchronizovaného pohybu rentgenky a detektoru.
- Skenování může být provedeno s libovolnou orientací roviny obrazu v aparatuře při maximálních rozměrech 1.0 x 0.7 m2.
- Jednoduché programování dráhy skeneru pomocí manuálního režimu „free run mode“.
- Rentgenová analýza v reálném čase „real-time mode“.
- Synchronizovaný pohyb dvou manipulátorů Universal Robots UR-5.
- Kompaktní zdroj rentgenového záření Oxford Instruments Apogee (50kVp, 1mA, 30 μm).
- Certifikovaný ochranný stíněný box o rozměrech 185 x 185 x 185 cm včetně zabudovaného interlocku a výstražného světla. Vnitřní prostory boxu jsou vybaveny

⁵⁰ MIHELJ, Matjaž a J. PODOBNÍK. *Haptics for virtual reality and teleoperation*. New York: Springer, [2012]. International series on intelligent systems, control and automation--science and engineering, v.64. ISBN 978940075

⁵¹ Zdroj: InsightArt, *RToo 3D, Advanced Robotic X-ray Scanner for Art*, Technical description

kamerami pro online kontrolu procesu měření.

- Ochrana skenovaných předmětů pomocí laserových stěn.
- Software RadalyX Studio pro Mac Os, nebo Microsoft Windows.

6.4 RToo 3D MULTIMODAL

Koncepce plánované nadstavby aparatury RToo 3D s označením *Multimodal* vychází z myšlenky adaptabilní skenovací aparatury, která s pomocí jednotlivých výměnných, či doplňkových modulů bude schopna obsáhnout měření zkoumaného vzorku (obrazu, sochy atd.) v širším rozsahu elektromagnetického záření. V praxi to znamená, že do stávající aparatury RToo 3D budou implementovány kromě detektoru Widepix pro analýzu MRXR také další moduly pro měření makro-rentgen fluorescence (XRF), ultrafialové luminiscence (UV) a infračervené reflektografie (IR). Standardně bude na skenovací hlavu manipulátoru instalována CCD kamera pro makro skenování díla ve viditelném světle. S tímto modulem je také možné využít módu reliéfního zobrazení obrazu, které umožňují implementované LED diody rozmístěné v okolí čočky kamery. Tato funkcionalita beze zbytku nahrazuje dokumentaci díla v razantním bočním osvětlení, a to i s možností přesného měření výšky reliéfní struktury malby v celé jeho ploše.

Díky tomu, že aparatura RToo pracuje v režimu skenování jednotlivých úseků, je možné veškeré tyto analýzy provádět v nadstandardně vysokém rozlišení. Vzhledem ke stabilnímu pozičnímu režimu všech provedených měření budou mít také jednotlivé naměřené analýzy shodné dimenzionální parametry, čímž bude umožněna snadná komparace snímků a také jejich spektrální prolínání a procházení na úrovni různých vlnových délek elektromagnetického spektra. Cílem multimodálního systému RToo 3D je standardizace a synchronizace měření v širším rozsahu vlnových délek elektromagnetického spektra a kompletace standardních i nejmodernějších neinvazivních průzkumných metod do jednoho celku, čímž se

výrazně usnadní a zefektivní práce restaurátorů jak v procesu samotného měření, tak při následném vyhodnocování naměřených dat. Samotná instalace doplňkových modulů bude prováděna programově pomocí speciálního multispektrálního módu manipulátorů. Skenovací aparatura v tomto módu automaticky vymění příslušný modul po dokončení předchozí analýzy bez nutnosti průběžného zásahu operátora.

Technická specifikace systému RToo 3D multimodal

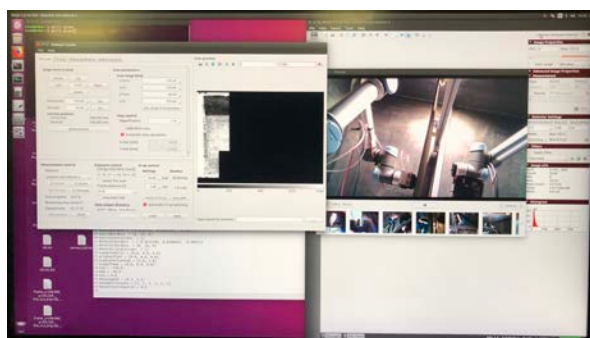
Parametr	Hodnota
Max skenovací rozsah	1300 mm x 700 mm x 450 mm
Rozsah skeneru	1850 mm x 1850 mm
Rychlost skenování v režimu B&W	350 mm ² /s
Rychlost skenování v režimu <i>full spectral</i>	40 mm ² /s
Inspekční osy	3D (horizontální, vertikální a zvětšování), 3D rotace
Skenovací módy	Plošné skenování vzorků (pevná pozice rentgenky) Plošné skenování pro tenké ploché vzorky (detektor a rentgenka se pohybují společně) 6D prohlížení v reálném čase
Software	RadalyX Studio
Zpracování dat	Cloudové řešení integrované do RadalyX Studio
Rozlišení	55 μm
Rentgenka	50kVp, 1mA
Radiační ochrana	Pb stěna 2 mm

Úroveň radiace	<< 1 μ Sv na povrchu ochranného boxu
Pixelový detektor	WidePix® 1x5 se silikonovým senzorem
CCD kamera pro makrofotografii	Stejný skenovací rozsah jako pro RTG Prostorové rozlišení 50 μ m Synchronizace makroskenování a RTG pro lepší orientaci
Energetická náročnost	660W

Software: RadalyX Studio⁵²

Aparatura RToo je ovládána pomocí softwarového nástroje RadalyX Studio (Obr.67), který umožňuje operátorovi kalibraci celého systému v několika krocích. Uživatel zde může jednoduše nastavit parametry měření udávající jak hodnoty rentgenky, tak detektoru, s využitím několika základních typů měření.

- Fixní skenování vybrané oblasti (s pevným zorným polem).
- Plošné skenování (více zorných polí).
- 6D prohlídka v reálném čase s manuálním ovládáním robotů horizontálně, vertikálně a zvětšení obrazu. Kromě toho umožňuje 3D rotaci pro prohlížení analyzované části z libovolného úhlu (pomocí integrované 6-osé ovládací myši).



• Obr. 67 - Pracovní plocha softwarového nástroje RadalyX Studio.

Objekty mohou být zkoumány v režimu "6D" zobrazování v reálném čase a robotický systém je v tomto případě řízen online pomocí 3D joysticku. Režim je snadno konfigurovatelný v RadalyX Studio. Okamžitá zpětná vazba pro operátora měnícího pozorovací úhel a rentgenové snímky v reálném čase, jsou dokonalým nástrojem pro pozorování 3D struktury vzorku, aniž by bylo zapotřebí spustit úplnou počítačovou tomografii. Navíc zobrazování v reálném čase odhaluje struktury v plném rozlišení 55 μ m. Skenování lze zaznamenat jako video pro pozdější použití.

RadalyX Studio také zpracovává a propojuje naměřená data do jednoho konečného obrazu. V postprodukčním procesu si uživatel může vybírat mezi různými filtry pro zobrazení a manipulovat s dynamickým rozsahem výsledných snímků. Různé módy a parametry se samozřejmě dají ukládat pro přesné zopakování měření, nebo pro aplikování shodného postprodukčního procesu. Výsledné naskenované obrázky jsou následně vyexportovány do bitmapových souborů pro snadné prohlížení nebo následné úpravy v běžném softwaru, jako je například Adobe Photoshop.

Softwarový nástroj RadalyX Studio v módu spektrálního měření rentgenového záření umožňuje extrahovat více informací, o materiálové struktuře zkoumaného díla. Software je dodáván s pokročilým nástrojem pro vyhledávání podobných materiálů při skenování. To znamená, že umožňuje nalezení podobných materiálů / pigmentů ve struktuře malby. Následně je možné vyexportovat mapu nalezených materiálů pro následnou analýzu. Je také možné pomocí uložených, dříve vytvořených filtrů, vyhledávat obdobné materiálové kompozice v dalších provedených skenech pro přesnou komparaci malířských stylů a rukopisu jednotlivých umělců.

⁵² Zdroj: InsightArt, RToo 3D, Advanced Robotic X-ray Scanner for Art, Technical description

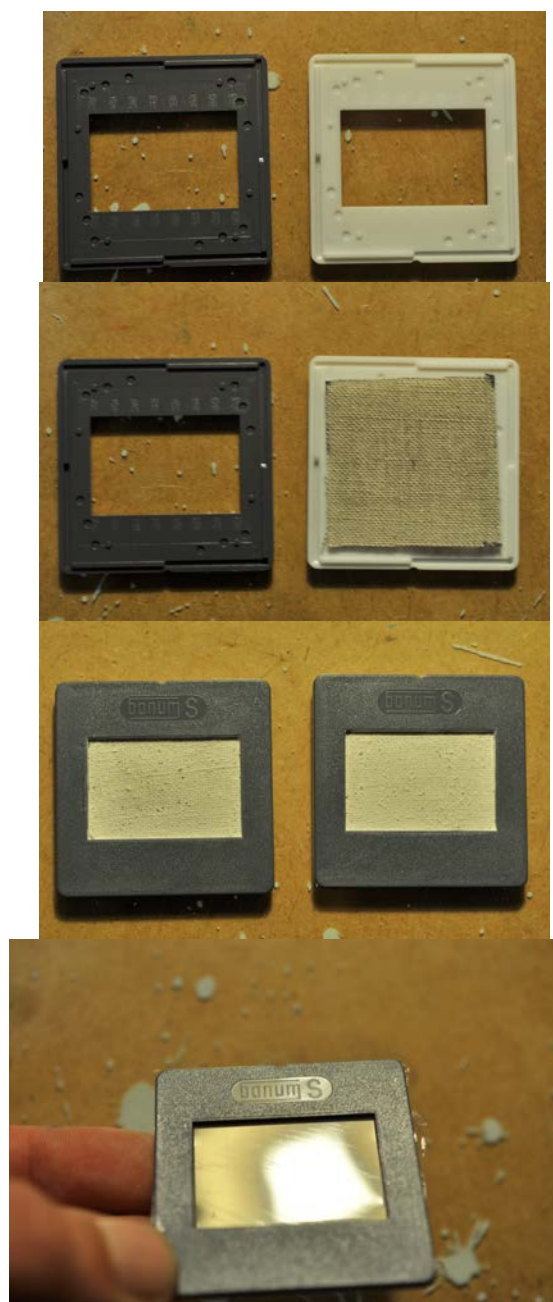
TESTOVÁNÍ VZORKŮ PRO KALIBRACI MRXR

MRXR (Material resolving (color) X-ray radiography)- pro plné využití potenciálu této metody je nutné dokonalé rozpoznání zobrazení jednotlivých materiálů s použitím daného pixelového detektoru. Pokud budeme mít přehled o tom, jaký materiál se v RMXR zobrazuje jakou barevností, pak bude možné tyto údaje zaznamenat do patřičného softwarového kódu (v současnosti ve fázi vývoje). Ve finální fázi této kalibrace by měl použitý software automaticky dešifrovat naměřená data a na jejich základě definovat rozložení materiálu (pigmentů) v ploše zkoumaného obrazu. Vývoj tohoto řešení je však poměrně náročná záležitost a musí mu nutně předcházet mnoho pečlivých měření. Vzhledem k obrovskému záběru různých stylů malby, rozmanitosti užívaných materiálů a technologických postupů je potřeba vyrobit a testovat širokou škálu různých materiálových vzorků pro kalibraci.

V první fázi projektu byla provedena revize měřicí aparatury rentgenové mikroradiografie, aby bylo možné přesněji stanovit design a parametry nosičů materiálových vzorků. Jako nejvhodnější byly vyhodnoceny klasické diapozitivní rámečky a to především kvůli jejich ideálním rozměrům a také kvůli snadné manipulaci s nimi. Další výhodou těchto rámečků je, že se do nich dají vložit různé druhy nosné podložky (plátno, folie, papír) pro nanesení samotného materiálového vzorku. Důležitým parametrem také bylo, aby jednotlivé vzorky měly ve všech případech shodnou mohutnost (výška vrstvy barvy v řezu), což reliéfní tvarování diarámečků umožňuje. Celková výška rámečku je 2 mm, s umístěním nosného média do jeho středu tedy vychází mohutnost vzorku pigmentu na ideální 1 mm.

Po konzultaci s techniky obsluhujícími MRXR aparaturu byly zvoleny dva druhy nosné podložky vzorku, to znamená, že byly vyhotoveny dva vzorky od každého zkoumaného pigmentu na dvou různých podložkách, aby bylo zároveň možné detekovat případné difference v měření způsobené

útlumem podkladového materiálu. První sada vzorků je tedy nanesena na jemné plátěné podložce s klišo-křídovým podkladem a druhá sada je pak aplikována na velmi tenké průhledné PVC fólii bez podkladového nátěru.

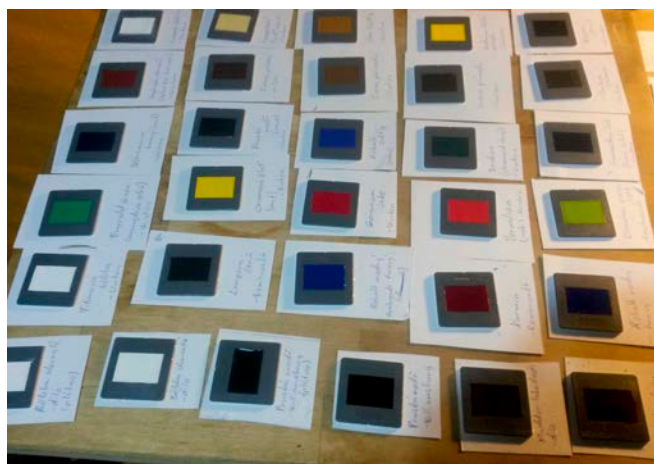


• Obr. 68-71 - příprava nosičů pro testovací vzorky.

Dále bylo nutné stanovit rozsah materiálové databáze, tedy vyselektovat z celé škály historických pigmentů určitý okruh, který bude mít v této fázi (počítáme s dalším rozšiřováním této databáze) vypovídající hodnotu pro určité časové období. Vzhledem k tomu, že tento projekt je součástí mé disertační práce, rozhodl

jsem se zaměřit na materiály používané v evropském regionu v druhé polovině 19. století. Výběr zkoumaných pigmentů se nadále ještě specifikoval známou materiálovou skladbou díla, na kterém bylo vyhotoveno referenční měření. Jedná se o olejomalbu na plátěné podložce s předpokládaným rokem vzniku 1880 s názvem *La Crau s pohledem na Montmajour*. Do tohoto setu databáze jsem také začlenil vybrané novodobé materiály, které se na obraze z 19. století mohou nacházet v místech pozdějších oprav a v případě plošného výskytu může jejich detekce pozměnit údaje o autorství, dataci či provenienci díla.

Pro jednotlivá měření je nejdůležitějším aspektem obsah referenčních chemických prvků v daném pigmentu, jehož chemické složení je známé. Proto jsem zvolil použití komerčně prodávaných olejových barev v tubách, jejichž přesná chemická skladba byla následně ověřována v laboratoři restaurátorské školy na AVU pomocí metody XRF (Obr.74). Bohužel se však ukázalo, že výrobci ne vždy dodržují deklarované složení použitého pigmentu a nastavují barvy levnějšími náhražkami. Toto se však prokázalo i u několika vzorků testovaných čistých pigmentů od renomovaných výrobců. Vzorky s diferenčním chemickým složením byly proto v databázi nahrazeny.



• Obr. 72 - výsledná databáze testovacích vzorků.

- 1) Titanová běloba- Umton
- 2) Zinková běloba- Umton
- 3) Olovnatá běloba- Dílo



• Obr. 73 - výsledná databáze testovacích vzorků.

- 4) Kremžská (olovnatá) běloba- Mánes
- 5) Neapolská žluť- Umton
- 6) Neapolská žluť- Rembrandt
- 7) Okr světlý- Umton
- 8) Siena přírodní- Umton
- 9) Siena pálená- Umton
- 10) Umbra přírodní- Umton
- 11) Umbra pálená- Umton
- 12) Anglická (železitá) červeň- Umton
- 13) Madder lake deep- Dílo
- 14) Karmín- Rembrandt
- 15) Geranium lake- Winton
- 16) Vermilion- Rembrandt
- 17) Chromová oranž- Schmincke
- 18) Chromová žluť světlá- Štolo
- 19) Kadmium žluté střední- Umton
- 20) Cinnabar green light- Rembrandt
- 21) Emerald green- Winton
- 22) Viridian (chromoxid ohnivý)- Umton
- 23) Smargdový lak- Umton
- 24) Kobalt modrý světlý- Umton
- 25) Kobalt modrý tmavý- Rembrandt
- 26) Ultramarin- Williamsburg
- 27) Pruská modř- Williamsburg
- 28) Kostní čern- Umton
- 29) Lampová čern- Rembrandt
- 30) Chromová žluť (imit)- Winton

- 31) Vermilion (imit)- Winton
- 32) Ultramarin- Umton
- 33) Pruská modř- Umton
- 34) Okr tmavý (plátno)- Umton

Další vzorky zahrnuté v databázi

- 1) Kadmium oranžové
- 2) Kadmium červené
- 3) Veronesova zeleň
- 4) Pthalocianidová zeleň
- 5) Zem zelená česká- Mussini
- 6) Pruská modř- Williamsburg
- 7) Indigo
- 8) Alizarin žlutý
- 9) Alizarin karmínový
- 10) Krémžská běloba- Old Holand



• Obr. 74 - Kontrolní měření prvkového složení kalibračních vzorků pomocí XRF.

Další část projektu byla zaměřena na specifikaci a proměřování vzorků pomocí energeticky citlivé rentgenové mikroradiografie. Toto měření prováděla firma Advacam.

V rámci tohoto projektu byla vyhotovena materiálová databáze, která bude tvořit základ pro kalibraci aparatury na průzkum uměleckých

děl pomocí energeticky (materiálově) citlivé rentgenové mikroradiografie. Výběr pigmentů byl zaměřen na konkrétní okruh daný dobovým zařazením referenční malby. V průběhu měření se ukázalo, že některé druhy pigmentů jsou pro tyto přístroje nerozlišitelné jeden od druhého, a proto se dají tyto skupiny v budoucím rozšiřování databáze eliminovat. Jedná se například o železité pigmenty (okry, hlinky atd.), kde je obsah železa závislý na místě původu pigmentu a dalších specifických aspektech.

7.1 VÝSLEDNÁ ZPRÁVA Z MĚŘENÍ KALIBRAČNÍCH VZORKŮ

Souhrn spektrometrického zobrazovacího rentgenového měření vzorků pigmentů⁵³

Rentgenové zobrazování je standardní metodou pro zkoumání uměleckých děl, obrazů. Uspořádání klasického transmisního zobrazovacího zařízení je na Obr. 1. Běžné rentgenové zobrazovací techniky podávají informaci o vnitřní struktuře zkoumaného objektu, avšak ze získaných černobílých obrázků nelze zjistit materiálové složení vzorku. Materiály o různém prvkovém složení pak mohou být zobrazeny v rentgenovém snímku se stejnou úrovní šedi. Ve standardním snímku pak takové materiály nelze rozlišit. Rentgenový svazek, který přes vzorek prochází ovšem tuto informaci obsahuje. Standardní zobrazovače (film, CCD kamera se scintilátorem, apod.) nedokáží tuto informaci změřit.

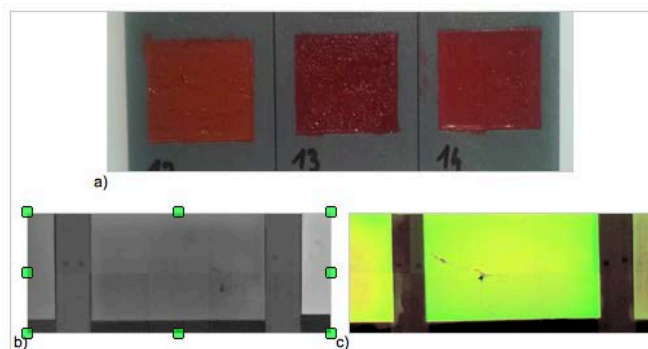
Zde přicházejí na řadu moderní rentgenové kamery, které dokáží měřit energii (tj. vlnovou délku) dopadajícího rentgenova záření. Díky tomu také dokáží změřit změny ve složení vlnových délek rentgenového svazku procházejícího vzorkem a z této informace pak lze dovodit i složení vzorku.

Tyto změny spektra svazku lze měřit senzory Timepix, které jsou základními stavebními kameny kamer firmy ADVACAM. Reálný

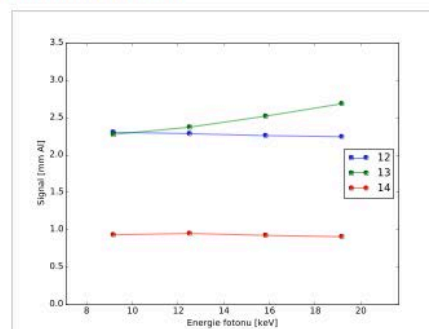
⁵³ Výsledná zpráva: ADVACAM, Josef Uher, *Souhrn spektrometrického zobrazovacího rentgenového měření vzorků pigmentů*

vzorek (tj. obraz) ovšem obsahuje často velice komplexní směs různých materiálů. Odezva detektoru je v takovémto případě velmi složitá a naměřená data nelze spolehlivě zpracovat tak, aby se získalo prvkové složení přímo. Jednodušší a spolehlivější metodou je vytvořit databázi odezvy různých pigmentů a materiálů nacházejících se v obrazech z daného období. Analýza dat rentgenového snímku obrazu pak spočívá v hledání lineární kombinace odezvy různých materiálů uložených v databázi. Vytvoření takovéto databáze, alespoň z počátku malého množství pigmentů bylo účelem měření prezentovaného v tomto dokumentu.

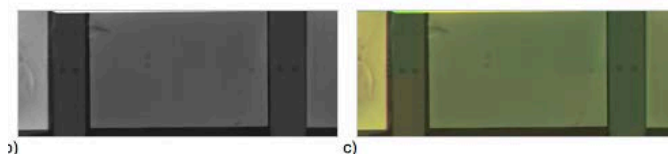
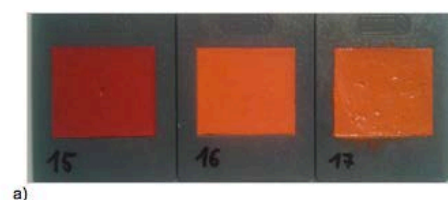
Na Obr.3 -14 jsou příklady naměřených dat několika vybraných pigmentů. Červený rámeček v Obr.a označuje úsek, který byl změřen rentgenovou kamerou, která má menší rozměr, než je rozměr tří vzorků. Přibližně stejný výsek byl měřen u všech vzorků. Měření spočívalo ve vytvoření série obrázků na různých energiích (vlnových délkách) rentgenových fotonů. V tomto případě se jednalo o minimálně čtyři energetické hodnoty. Tato naměřená data byla pak kalibrována srovnáním s odezvou hliníkových destiček. Tyto destičky tak tvoří referenční materiál a de-facto se u pigmentů určuje, do jaké míry se jejich vlastnosti pro průchod rentgenového svazku liší od hliníku. Hliník se pro kalibraci používá proto, že neobsahuje žádné skokové změny útlumu rentgenů v závislosti na energii (tzv. k-hrany). Zároveň tato metoda kalibrace kompenzuje někdy komplikovanou odezvu detektoru na dopadající záření. Takto vytvořená databáze tvoří základ pro pozdější skenování obrazů a pro precizní analýzu dat.



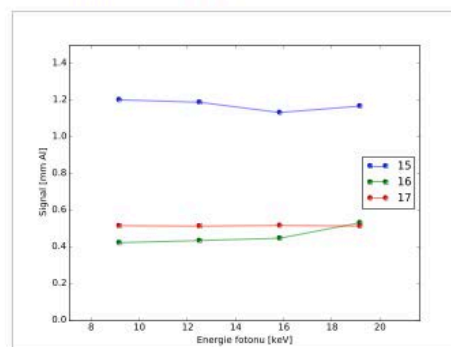
Obr. 4 Vzorky 12, 13 a 14: a) fotografie – červený rámeček označuje výsek, který byl změřen rentgenem, b) černobílý rentgenový obraz, c) barevný obraz, kde barva identifikuje odlišný materiál.



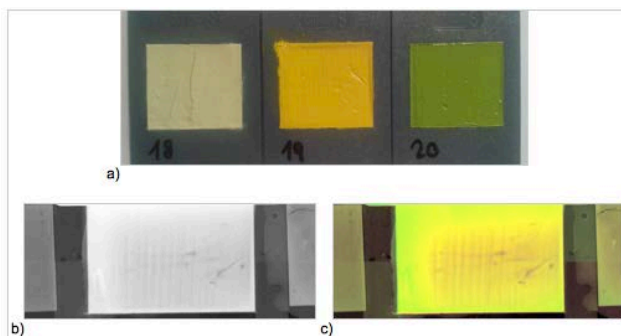
Obr. 5 Závislost naměřené odezvy materiálu na energii. Hodnoty jsou kalibrovány vůči odezvě hliníkové destičky.



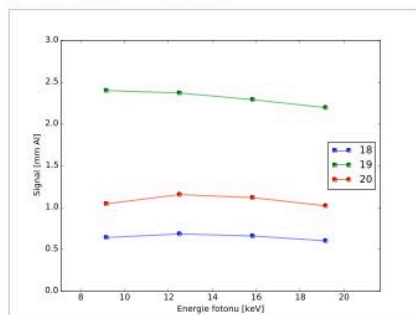
Obr. 6 Vzorky 15, 16 a 17: a) fotografie, b) černobílý rentgenový obraz, c) barevný obraz, kde barva identifikuje odlišný materiál.



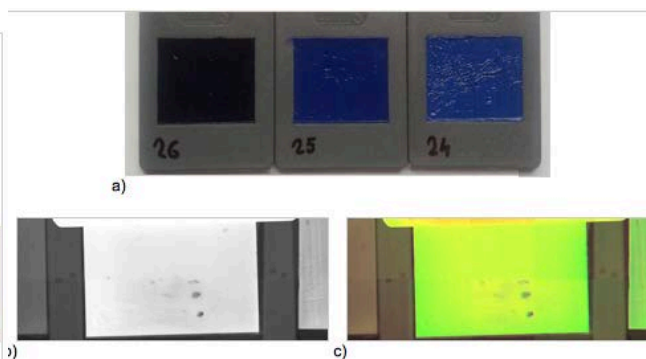
Obr. 7 Závislost naměřené odezvy materiálu na energii. Hodnoty jsou kalibrovány vůči odezvě hliníkové destičky.



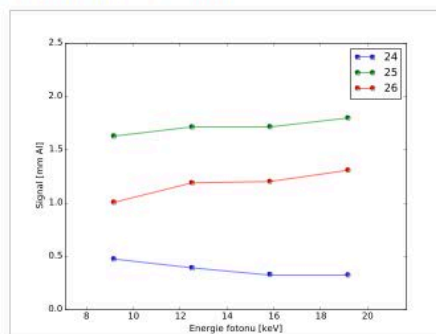
Obr. 8 Vzorky 18, 19 a 20: a) fotografie, b) černobílý rentgenový obraz, c) barevný obraz, kde barva identifikuje odlišný materiál.



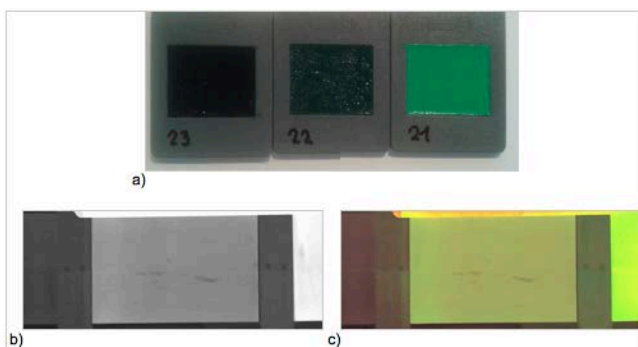
Obr. 9 Závislost naměřené odezvy materiálu na energii. Hodnoty jsou kalibrovány vůči odezvě hliníkové destičky.



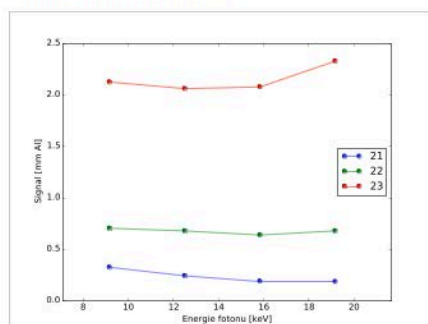
Obr. 12 Vzorky 24, 25 a 26: a) fotografie, b) černobílý rentgenový obraz, c) barevný obraz, kde barva identifikuje odlišný materiál.



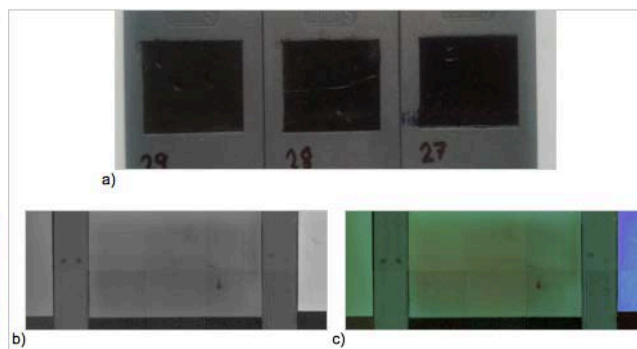
Obr. 13 Závislost naměřené odezvy materiálu na energii. Hodnoty jsou kalibrovány vůči odezvě hliníkové destičky.



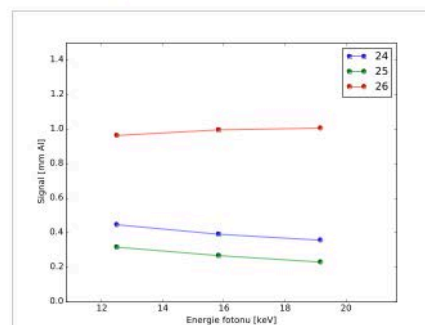
Obr. 10 Vzorky 21, 22 a 23: a) fotografie, b) černobílý rentgenový obraz, c) barevný obraz, kde barva identifikuje odlišný materiál.



Obr. 11 Závislost naměřené odezvy materiálu na energii. Hodnoty jsou kalibrovány vůči odezvě hliníkové destičky.



Obr. 14 Vzorky 27, 28 a 29: a) fotografie, b) černobílý rentgenový obraz, c) barevný obraz, kde barva identifikuje odlišný materiál.



Obr. 15 Závislost naměřené odezvy materiálu na energii. Hodnoty jsou kalibrovány vůči odezvě hliníkové destičky.

7.2 DALŠÍ MĚŘENÍ KALIBRAČNÍCH VZORKŮ

V rámci kalibračních měření byla také vytvořena škála některých referenčních pigmentů aplikovaných přímo na plátěné podložce s klišo-křídovým podkladem (Obr. 75). V této fázi bylo testování zaměřeno na vizualizaci jednotlivých materiálů s reálnou strukturou výstavby obrazu. Jako pojivo aplikovaných pigmentů byl použit lněný olej. Použité pigmenty byly selektovány tak, aby jejich chemická kompozice pokud možno co nejvěrněji korespondovala se složením historicky užívaných malířských barev. Testovány byly okruhy bílých, černých, žlutých, modrých, zelených, červených a hnědých pigmentů dle následujícího seznamu:

- Bílé: Olovnatá běloba, Zinková běloba, Titanová běloba, Blanc fix, Lithopon
- Černé: Kostní čern, Lampová čern
- Žluté: Neapolská žluť, Olovnato ciničitá žluť, Chromová žluť, Kadmium žluté,
- Červené: Minium, Kadmium červené, Alizarin, Anglická červen
- Modré: Smalt, Pruská modř, Indigo, Ultramarin, Kobalt
- Zelené: Svinibrodská zeleň, Emerald, Cinabar, Chromoxid zelený, Pthalocianidová zeleň, Zem zelená česká



- Obr. 75 - Referenční škála testovacích vzorků na plátěné podložce. Zdroj: InsightArt

- Hnědé: Umbra přírodní, Umbra pálená, Siena přírodní, Siena pálená, Okr

Výsledná měření poukazují na některé jasné difference jednotlivých okruhů pigmentů dle jejich chemické kompozice. Tyto výsledky jsou nadále využívány pro jednotlivé komparace v rámci testovacích měření historických maleb na plátěných podložkách (Obr. 76, 77).



- Obr. 76 - Výsledný snímek-1 kalibračního měření testovacích vzorků pigmentů na plátěné podložce. Zdroj: InsightArt

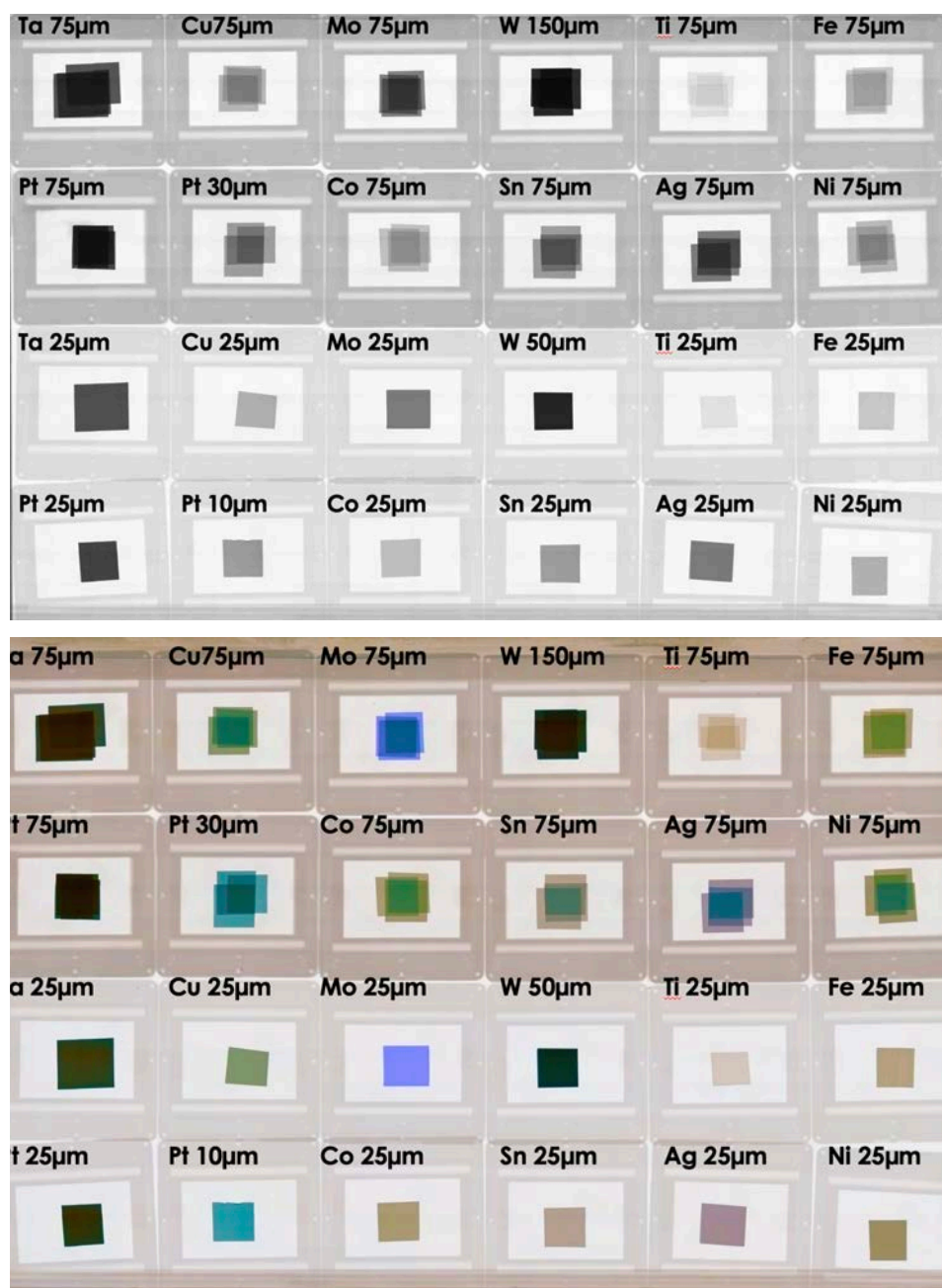


- Obr. 77 - Výsledný snímek-2 kalibračního měření testovacích vzorků pigmentů na plátěné podložce. Zdroj: InsightArt

Z výsledných měření pomocí MRXR je patrná výrazná difference škály bílých a žlutých pigmentů. Také energie zelených a některých modrých pigmentů jsou poměrně dobře rozeznatelné. Hlinky a černé pigmenty se v radiogramu téměř neprojevují.

Testovací škála kalibrovaných kovových vzorků

Pro další kalibrační měření byla vytvořena databáze vzorků přesně kalibrovaných plíšků různých kovů. Tato měření slouží převážně jako vstupní data pro testování pokročilých algoritmů na bázi umělé inteligence pro následné rozeznávání jednotlivých okruhů pigmentů v historických malbách. Naměřená data jsou nadále využívána pro přesné rozeznávání a komparaci jednotlivých pigmentů (Obr.78,79).



- Obr. 78,79 - Testovací škála kalibračních plíšků. Nahoře zobrazení pomocí HRXR a dole snímek naměřený pomocí MRXR s patrnou diferenciací jednotlivých kovů. Zdroj: InsightArt

HRXR A MRXR- PŘÍKLAD ANALÝZY OBRAZU NA PLÁTĚNÉ PODLOŽCE

8.1 HORKÝ LETNÍ VEČER V LESE

- Soukromá sbírka
- Autor: uvedeno Edvard Munch⁵⁴
- Název: Horký letní večer v lese / Hot Summer Night in Forest
- Datace: 1890
- Technika: olej na plátně
- Rozměry: 91 x 120,5 cm



• Obr. 80 - Horký letní večer v lese

Popis díla

Jedná se o olejomalbu na plátěné podložce o rozměrech 91,5 x 120,5 cm. Plátno je napnuto na dřevěném napínacím rámu a vsazeno do širokého zdobného rámu s imitací zlacení.

Obraz představuje lesní scénérii, které dominuje skupinka čtyř postav v popředí levé části výjevu a další pátá ženská postava v pravé části, která působí, že je záměrně separována od ostatních. Ve skupině v popředí jsou vyobrazeny dvě ženy/dívky a dva chlapci, kteří pravděpodobně rozdělávají oheň, ze kterého stoupá přízračný namodralý dým. Celá kompozice postav a prostředí působí na diváka velice promyšleným psychologickým dojmem a je na místě se domnívat, že toto bylo autorovým prvotním záměrem. Tuto myšlenku podporují i další technické aspekty malby.

Metodika průzkumu

Technologický a restaurátorský průzkum obrazu Horký letní večer v lese, olejomalba na plátně, pocházející ze soukromé sbírky, byl založen na standardních optických průzkumných metodách, jako je IR reflektografie, UV luminiscence, RTG. Dílo bylo podrobeno měření pomocí RTG mikroradiografie HRXR v centru Excellence V Telči. Dále pak byly zkoumány fotografie v rozptýleném, přímém a bočním razantním osvětlení a makro a mikrofotografie. Pomocí transmisní fotografie z rubové strany lze pak pozorovat rozsah krakeláže malby a intenzitu barevné vrstvy na různých částech malby. Také byl proveden chemicko-technologický laboratorní průzkum k upřesnění a určení materiálové skladby díla (Obr.82). Výsledky těchto průzkumů byly dále porovnávány s výsledky dalších publikovaných analýz Munchova díla. Především to byl CATALOGUE RAISONNÉ a v něm publikovaný článek od Biljany Topalové-Casadieho s názvem *Technical Aspects of Edvard Munch's Paintings*⁵⁵ a publikace *Edvard*

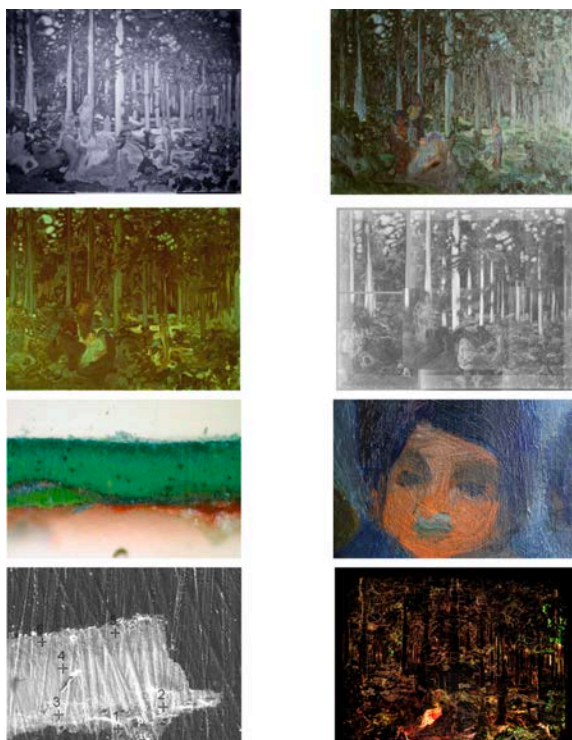
⁵⁴ Dle dostupných informací bylo dílo vystaveno na 65. výroční výstavě Krasoumné jednoty pro Čechy v Praze roku 1904 pod názvem "Les" s katalogovým číslem 236 a uvedeným autorem- Edvard Munch. Autorství tohoto díla je některými odborníky podporováno, ale má i své odpůrce. Provedená měření, analýzy a komparativní průzkumy byly vyhotoveny na základě požadavku majitele díla se zaměřením na objasnění jeho technologické struktury a historických souvislostí, které by přispěly k debatě o jeho autorství.

⁵⁵ TOPALOVA-CASADIEGO, Biljana., WOLL, Gerd. *Technical Aspects of Edvard Munch's Paintings. Edvard Munch: complete paintings : catalogue raisonné*. New York: Thames & Hudson, 2009. ISBN 9780500093450.

*Munch-The Sick Child-The Story of a Masterpiece*⁵⁶ a Investigation of Materials Used by Edvard Munch od Brian Singer, Trond Aslaksby, Biljana Topalova a Eva Storevik.⁵⁷



• Obr. 81 - Rtg transmisní mikroradiografie HRXR- Horký letní večer v lese. Zdroj: ÚTEF a Centrum EXCELENCE v Telči



• Obr. 82 - Ilustrační zobrazení aplikovaných průzkumných metod.

Rentgenová mikroradiografie s velkoplošným pixelovým detektorem WidePIX10x10⁵⁸

V rentgenové transmisní radiografii dochází při průchodu rentgenového záření objektem k útlumu jeho intensity. Zobrazovací detektor umístěný za objektem zaznamená změny intensity záření, čímž vznikne radiogram objektu. Kvalita radiogramu je určena především jeho rozlišovací schopností a kontrastem. Rozlišovací schopnost je určena velikostí nejmenšího zachyceného detailu, zatímco kontrast je důležitý pro rozlišení různých materiálů a jejich hustot ve zkoumaném objektu. Rozlišovací schopnost radiografického systému je určena velikostí vyzařovací skvrny rentgenového zdroje a velikostí pixelů zobrazovacího detektoru. Kontrast v radiogramu závisí především na expoziční době a na přítomnosti šumu v obrázku.

Rentgenový radiografický systém laboratoře Centra Excellence v Telči, který byl použit v této práci, je vybaven rentgenkou typu nanofokus (velikost vyzařovací skvrny 1 μm) a světově unikátním bez šumovým pixelovým detektorem WidePIX 10x10. Maximální rozlišovací schopnost tohoto systému je 1 μm a jeho kontrast je virtuálně neomezený díky bez šumové práci detektoru WidePIX10x10.

Unikátní zobrazovací detektor WidePIX 10x10 je tvořen maticí 10 x 10 dlaždic tvořenými křemíkovými pixelovými detektory Timepix registrující jednotlivé fotony rentgenového záření (každá dlaždice má 256 x 256 pixelů každý o velikosti 55 μm). WidePIX 10x10 je plně citlivý v ploše 14.3 x 14.3 cm² bez jakýchkoli mezer mezi dlaždicemi. Kamera má celkem 6.5 mega pixelů.

Technologie detektorů Timepix registrujících jednotlivé ionizující částice (tedy i fotony rentgenového záření) byla vyvinuta

⁵⁶ USTVEDT, Øystein a Trond ASLAKSBY. *Edvard Munch: det syke barn : historien om et mesterverk = the sick child : the story of a masterpiece*. Oslo: Nasjonalmuseet, c2009. ISBN 9788281540361

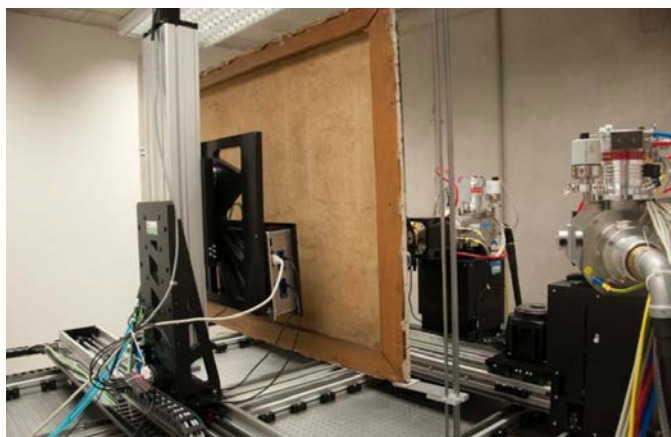
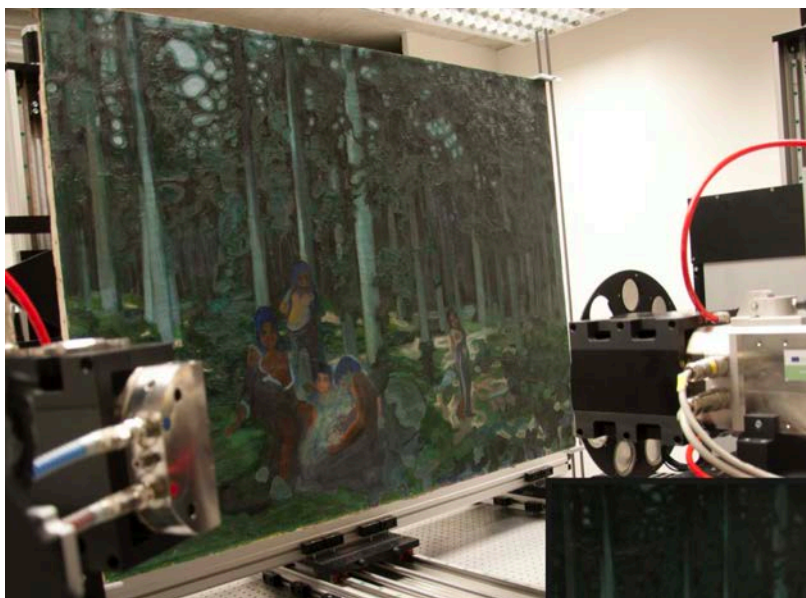
⁵⁷ SINGER, Brian., ASLAKSBY, Tront., TOPALOVA-CASADIEGO, Biljana., & STOREVIK TVEIT, Eva. (2010). Investigation of Materials Used by Edvard Munch. *Studies in Conservation*, 55(4), 274-292. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/42751727>

⁵⁸ Výsledná zpráva popisující metodiku radiografického měření díla byla vyhotovena ve spolupráci s Danielem Vavříkem a Zdeňkem Vykydalem z ÚTEF a Janem Jakůbkem z Advacam.

mezinárodní kolaborací Medipix v CERN. Ačkoliv byly tyto detektory původně vyvíjeny pro vysoce energetické ionizující částice a radiaci daleko za oblastí viditelného světla, nalézají uplatnění v mnoha dalších oblastech, jako je například rentgenová radiografie. Detektor Timepix se skládá z pixelového polovodičového čipu sensoru (obvykle křemíkového) připojeného technologií bump-bondingu ke čtecímu čipu Timepix obsahujícího vlastní elektroniku se zesilovačem, diskriminátorem a digitálním čítačem pro každý pixel. Tak je signál každé individuální částice zpracováván nezávisle (signál je zesílen, porovnán s přednastaveným energetickým prahem a digitálně započítán). Při interakci částice v sensoru je tedy digitální čítač v příslušném pixelu inkrementován a vliv temného proudu či elektronického šumu je plně potlačen. Díky principu digitálního počítání částic je výsledná odezva detektoru absolutně lineární a dynamický rozsah detektoru je prakticky neomezený. Vynikající vlastnosti polovodičových pixelových detektorů počítajících jednotlivé částice na poli radiografie jsou známy. Patří mezi ně zejména: neomezený dynamický rozsah, absence integračního a čtecího šumu, vysoká rozlišovací schopnost a energetická citlivost umožňující materiálově citlivou (barevnou) rentgenovou radiografii. Hlavní nevýhodou této technologie byla do nedávna relativně malá citlivá plocha sensorů v řádu několika cm². Tato nevýhoda byla v současnosti úspěšně odstraněna v ÚTEF ČVUT v Praze díky nové technologii tzv. bezhranových polovodičových sensorů spolu s technikou přesné montáže a víceúrovňové architektury čtecí elektroniky. Mechanická konstrukce výsledného velkoplošného detektoru je modulární a rozšiřitelná na libovolnou velikost.

Systém popsáný výše byl využit ke skenování olejové malby na plátně o velikosti 120 x 90 cm² (Obr.83,84). Vzhledem k velikosti obrazu

překračující výrazně citlivou plochu detektoru byla použita technika skenování. Obraz byl při snímání upevněn nehybně ve statickém rámu, zatímco detektor WidePIX 10x10 se spolu s rentgenkou pohybovaly v krocích přes celou jeho plochu. Skenování probíhalo s nízkým geometrickým zvětšením na úrovni 1.1 x. Výsledné prostorové rozlišení radiografického obrazu tedy činilo 50 µm. Celkově bylo sejmuto 12 x 9 snímků. Rentgenka s wolframovým terčíkem a beryliovým okénkem byla provozována při napětí 90 kV a výkonu 5 W. Expoziční doba pro každý snímek činila 60 s. Získané obrázky byly korigovány na efekt tvrdnutí svazku metodou kalibrace signálu na ekvivalentní tloušťku. Výsledný složený rentgenový radiogram malby má 25 000 x 20 000 pixelů což je celkem 500 mega pixelů.



• Obr. 83,84 - Skenovací aparatura v centru EXCELENCE v Telči- Průběh měření obrazu.



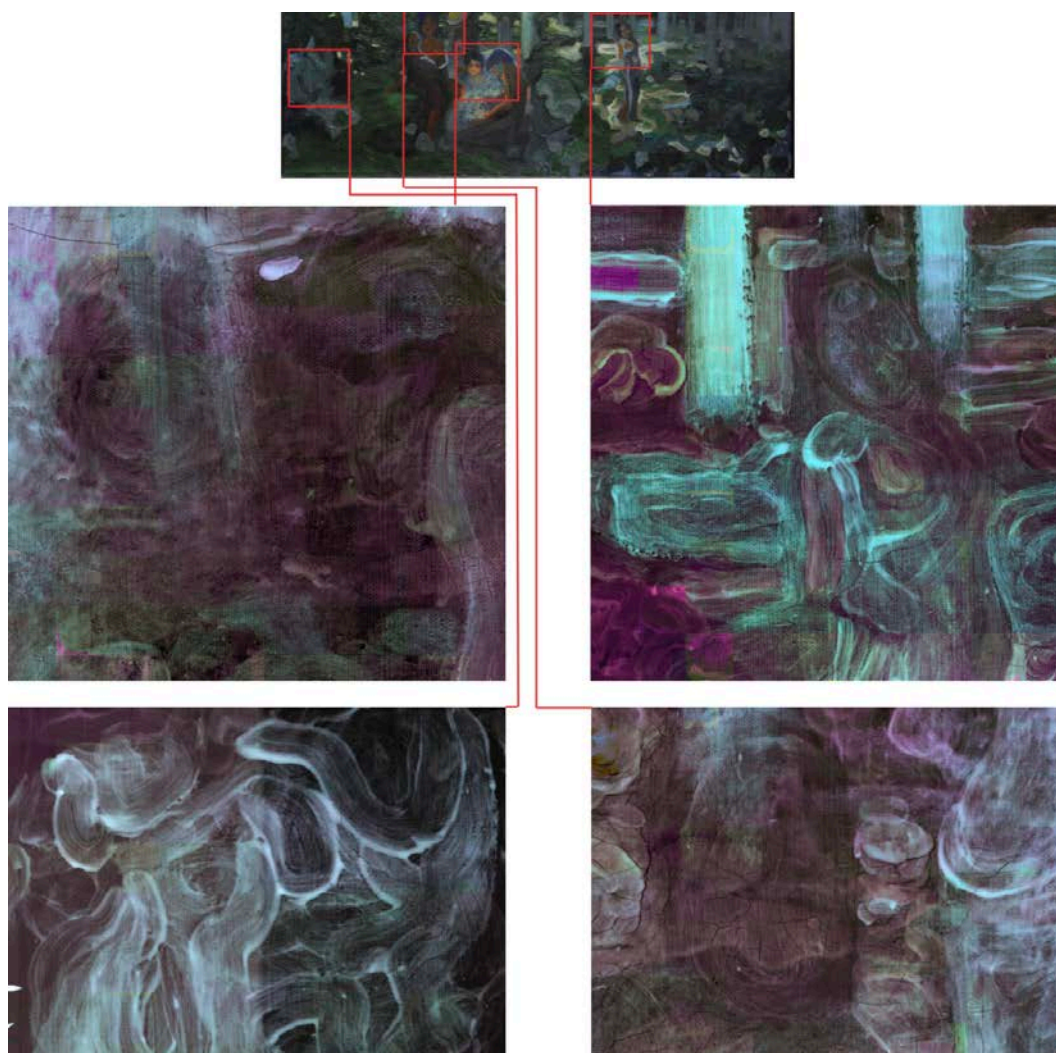
• Obr. 85 - Výsledný radiografický snímek ve vysokém rozlišení 25 000 x 20 000 pixelů- 500 megapixelů. Zdroj: ÚTEF



• Obr. 86 - Komparace RTG snímku pořízeného na fotocitlivý materiál a radiografie HRXR



• Obr. 87 - Zobrazení jednotlivých úseků malby pomocí materiálově citlivé radiografie MRXR.



• Obr. 88 - Vybrané detaily malby zobrazené pomocí materiálově citlivé radiografie MRXR. Zdroj: ÚTEF

PIXELOVÉ DETEKTORY V RESTAURÁTORSKÉ PRAXI

9.1 KOMPARATIVNÍ RESTAURÁTORSKÝ PRŮZKUM OBRAZU LA CRAU S POHLEDEM NA MONTMAJOUR

- Soukromá sbírka
- Autor: uváděno Vincent van Gogh
- Název: La Crau s pohledem na Montmajour (La Crau with a View of Montmajour)
- Datace: 1888 ?
- Technika: olej na plátně
- Rozměry: 68 x 90
- Signatura: "Vincent" v levém spodním rohu



• Obr. 89 - La Crau s pohledem na Montmajour

Dílo představuje další variantu známého obrazu Vincenta Van Gogha *Harvest at La Crau with Montmajour in the Background* (Obr.90), z roku 1888. Ke známé variantě tohoto díla existuje také několik studií v podobě kreseb a akvarelů. Všechny varianty, včetně zkoumaného díla zachycují typické prvky krajiny v období žní, která se rozprostírá na planině mezi Arles a horským masivem s opatstvím Montmajour. Van Gogh namaloval známou variantu tohoto obrazu v červnu roku 1888 a z korespondence s jeho



• Obr. 90 - Harvest at La Crau with Montmajour in the Background. Zroj: <https://www.wikiart.org>

bratrem Theem víme, že toto dílo považoval za své doposud nejvydařenější. V dalších dopisech popisuje, že do této lokality chodí pracovat velmi často.⁵⁹

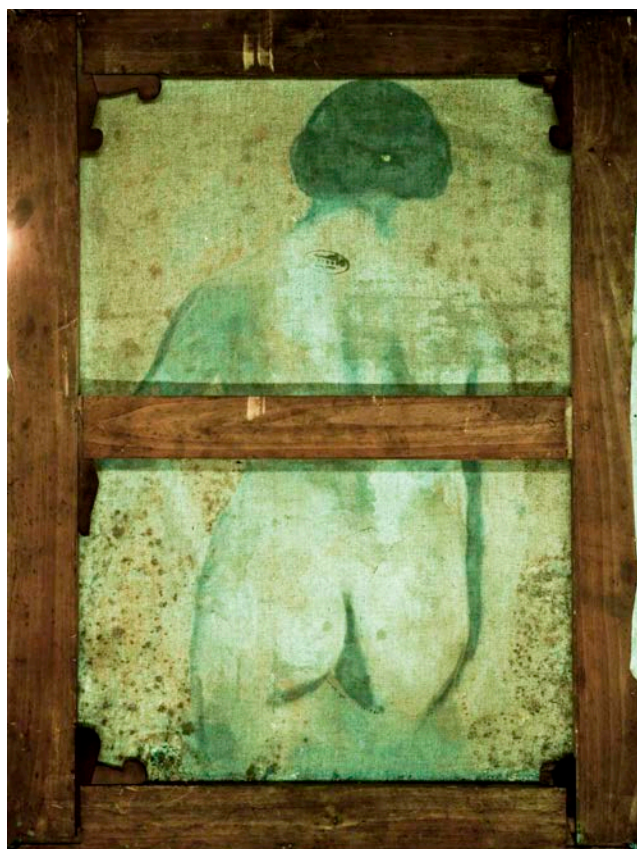
Obraz La Crau s pohledem na Montmajour představuje ideální příklad možnosti využití materiálově citlivé RTG radiografie pomocí zobrazovací aparatury RToo s implementovaným detektorem Widepix. Obraz je namalovaný na plátěné podložce olejovými barvami a představuje pohled na krajinu v blízkosti francouzského Arles se zříceninou opatství Montmajour v pozadí. V levém spodním rohu se nachází signatura Vincent. Obraz byl zakoupen současným majitelem v aukci, kde byl uveden jako kopie podle Van Gogha. Výtvarným zpracováním i tematickým zaměřením toto dílo zapadá do způsobu práce Vincenta van Gogha v roce 1888. Nicméně o jeho původu existuje jen minimum informací, a hlavně na obraze nebyl nikdy v minulosti proveden důkladný restaurátorský, technologický ani historický výzkum. Z těchto důvodů bylo dílo v letech 2015–2018 podrobeno celé škále dostupných analýz včetně materiálově citlivé RTG radiografie v centru EXCELENCE v Telči a následně s aparaturou RToo v InsightArt. V průběhu radiografického průzkumu díla bylo zjištěno, že se pod malbou krajiny La Crau nachází další výjev, a sice figura ženského aktu zobrazená zezadu (Obr.91). Jasný

⁵⁹ GOGH, Vincent van. *Dopisy přátelům*. 1. vyd. Praha: Odeon, 1977. 262 s., [64] s. obr. a barev. obr. příl. Paměti, korespondence, dokumenty, sv. 59.

obrys ženské postavy je patrný i v UV luminiscenci zadní strany (Obr.92).

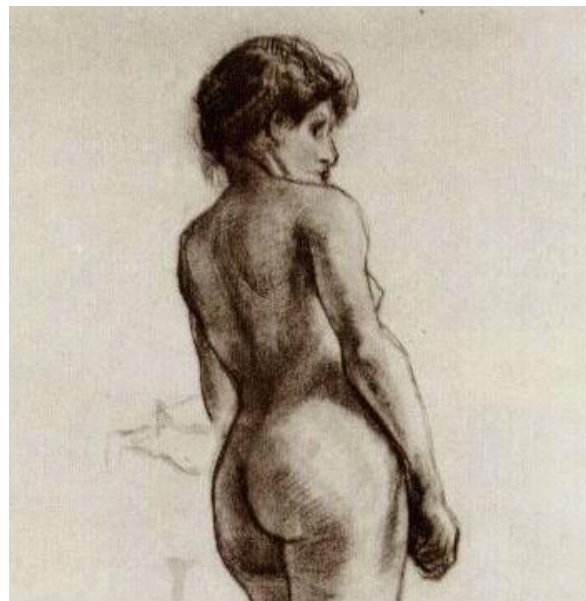


• Obr. 91 - Analýza MRXR se zákresem ženské figury ve spodní vrstvě malby. Zdroj: InsightArt



• Obr. 92 - UV luminiscence zadní strany díla odhaluje zřetelně původní malbu ženského aktu. V rozptýleném denním světle není figura vůbec viditelná.

Styl podmalby a pozice modelu ukazují, že se jedná o nedokončenou studijní malbu aktu. Podobné modely van Gogh kreslil a maloval v průběhu svého pařížského působení na kurzech v *Cormon Studio*⁶⁰ v letech 1886–88 (Obr.93).⁶¹



• Obr. 93 - Vincent van Gogh- studie ženského aktu zezadu. Zdroj: <https://www.wikiart.org>

Pastové vrstvy podmalby ženského aktu byly před malbou nového obrazu částečně seškrabány, na povrchu současné malby je tak v těchto místech patrný drobný reliéf. I o této praxi s použitím starších maleb pro nové zpracování se Vincent zmiňuje v korespondenci svému bratru Theovi.⁶² Z materiálově citlivých RTG snímků je patrné přesné rozložení jednotlivých pigmentů v celé ploše obrazu a také způsob jejich aplikace v jednotlivých částech díla. Pomocí separace jednotlivých energetických kanálů můžeme získat přesný přehled o způsobu autorovy práce s jednotlivými vrstvami a materiály (Obr.94) a (Obr.95). V následném postprodukčním procesu je také možné zobrazit pouze materiály,

60 NIENKE, Wite. *The Atelier Cormon, 1885-1886*. 2011. Dostupné z: <http://www.vangoghsstudiopractice.com/2011/04/spend-another-year-practising-drawing-first-/atelier-cormon-2/>

61 LAUTERKRANC, Jiří., UHER, Josef. *Nové možnosti průzkumu uměleckých děl pomocí rentgenové transmisní radiografie s využitím nejnovější generace pixelových detektorů. Fórum pro konzervátory-restaurátory: konference konzervátorů-restaurátorů .. Brno: Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace, 2011-. ISBN 978-80-87896-58-7. ISSN 1805-0050. 2018. s. 107*

62 Vincent van Gogh Letters. Dostupné z: <http://vangoghletters.org/vg/>



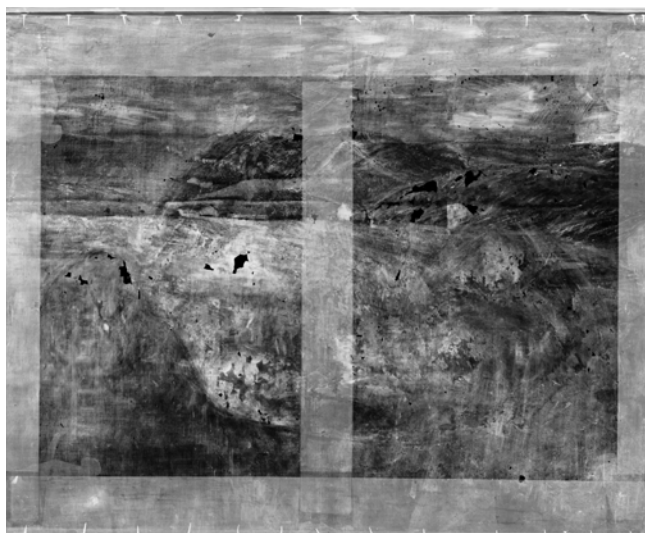
• Obr. 94 - Separace jednotlivých energetických / materiálových kanálů v ploše malby. Zdroj: InsightArt



• Obr. 95 - Separace jednotlivých energetických / materiálových kanálů v ploše malby. Zdroj: InsightArt

kteřé souvisí výlučně s vrstvou malby, kterou chceme vizualizovat.

Na obrázku č. 96 vidíme v HRXR snímku všechny sečtené vrstvy malby. Pomocí separace energetických kanálů je na obrázku č. 97 zobrazena pouze původní figura ženského aktu, veškeré vrstvy malby, které souvisejí s vrchní malbou krajiny La Crau s pohledem na Montmajour, zde byly potlačeny pomocí filtrování signálu jednotlivých energií. Je evidentní, že tato metoda umožňuje zcela nový způsob práce pomocí technologie rentgenové radiografie s použitím nejmodernějších pixelových detektorů. Možnosti postprodukčního zpracování obrazu jsou obrovské a přinášejí s sebou mnoho způsobů



• Obr. 96 - HRXR snímek zobrazující veškeré naměřené energie. Zdroj InsightArt



• Obr. 97 - Výsledný snímek MRXR odhalující původní malbu ženského aktu díky filtraci jednotlivých energetických kanálů. Tento unikátní radiografický obraz zobrazuje veškeré detaily původní malby, čímž umožňuje dokonalou komparaci malířského stylu autora. Zdroj: InsightArt

zpracovávání výsledného rentgenového snímku tak, aby měl co největší vypovídající hodnotu o

studovaném díle. Například přesné zobrazení figury ve spodní vrstvě obrazu La Crau s pohledem na Montmajour umožňuje provedení precizní komparace malířského stylu předpokládaného autora s jeho dalšími díly. Je také možné porovnávat distribuci jednotlivých energetických kanálů v různých malbách jednoho autora, ale pro takovou komparaci je nutné vytvoření několika referenčních radiografických snímků jiných ověřených děl. Výpovědní hodnota takové komparativní analýzy by byla jistě velmi užitečná pro odhalování padělků a chybně přiřazených děl.

Komparace tohoto díla a jeho technologických aspektů s dalšími autorovými pracemi je nutnou součástí ověřování jeho autenticity. Jako výchozí srovnávací dílo se samozřejmě nejlépe uplatní obraz s totožným motivem *Harvest at La Crau with Montmajour in the Background*.

Obě plátna zachycují krajinu s poli, hospodářskými staveními a sedláky, kteří svážejí úrodu obilí. Na obou dílech se také nacházejí shodné detaily, jako jsou modrá kára, červený pluh, žebříky, povoz se senem a kupka sena. Na obou dílech jsou taktéž namalovány postavy v popředí. Na známé variantě je to ženská figura situovaná v pravé střední části v zahradě mezi ploty a na zkoumaném díle jsou to dvě ženské figury na cestě (starší žena s dítětem) ve střední části obrazu. Obě díla zachycují zemědělská stavení rozprostřená v krajině, jejichž počet a lokalizace se také shodují s akvarelovou studií a s dispozicí budov na historických mapách (Obr. 98, 99, 100, 101).



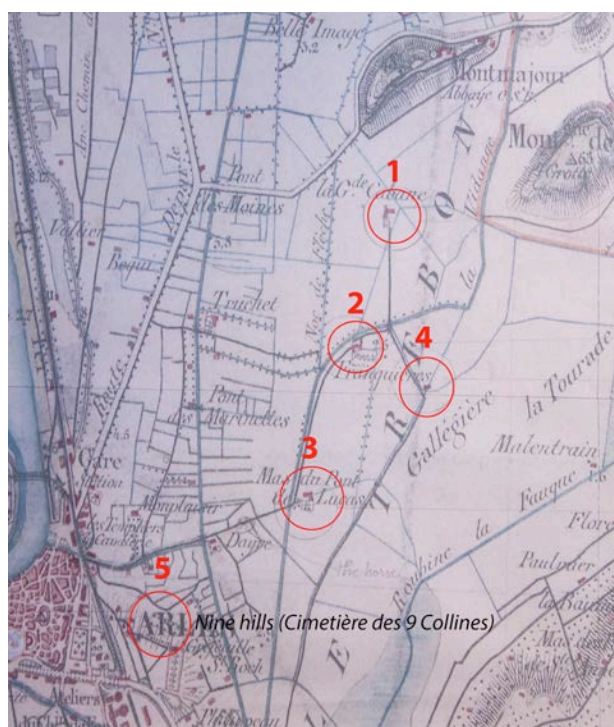
• Obr. 98 - La Crau s pohledem na Montmajour- rozvržení budov v krajině.



Obr. 99 - Harvest at La Crau with Montmajour in the Background- rozvržení budov v krajině.



Obr. 100 - Studie k obrazu Harvest at La Crau with Montmajour in the Background- rozvržení budov v krajině. Zdroj: <https://www.wikiart.org>

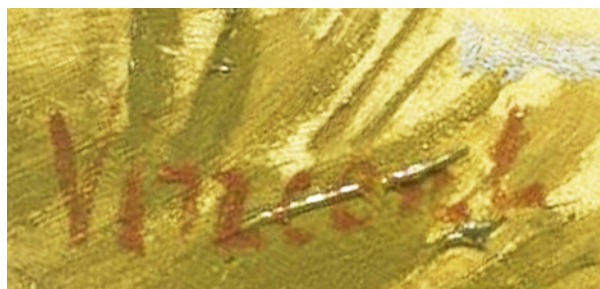


Obr. 101 - Rozvržení stavení na planině La Crau na dobové mapě.

Většina těchto stavení však byla v historii zničena rozsáhlou povodní a dnes zde zbyl pouze jediný dům, který je však na obou dílech zachycen. Neznámá varianta díla se liší hlavně stavením, které je zde vyobrazeno v popředí na levém okraji díla. O dům je opřen žebřík a v okně se zelenou okenicí je vyobrazen květináč s květinami.

Zkoumané dílo má jedno důležité specifikum, a sice že je namalováno z nadhledu, stejně jako známá varianta. Toto tvrzení dokazuje jednoduchý fakt, že při pohledu na reálnou krajinu ze země v úrovni polí není vidět pohoří, které se rozprostírá za opatstvím Montmajour. Toto pohoří se začne divákovi vyjevovat až z pohledu od 5 metrů nad terénem. Jediné možné místo v krajině odkud mohl Vincent tuto scenérii pozorovat je útvar s názvem *9 kopců*, který se nacházel za branami Arles kudy vedla cesta k opatství. Tyto haldy jsou však již v současnosti částečně srovnány s okolním terénem a na jejich místě je vybudován hřbitov *Cimetière des 9 Collines*. Tato hypotéza byla ověřena přímo na místě pomocí fotoaparátu umístěného na vysokém stativu. Z průzkumu dané oblasti je také patrné, že zkoumané dílo bylo namalováno jen zhruba 10-50 metrů doleva od místa, kde Vincent maloval známou variantu obrazu. Kupka sena, která se na známém obraze nachází v levé části je tak na druhé variantě vyobrazena na pravé straně. Z tohoto lokačního posunu se pak malíři naskytl pohled na cestu lemovanou ploty s cypřišemi, která je středovou dominantou předního plánu obrazu. Tyto a další dobové a krajinné reálie do značné míry vyvracejí možnost, že by zkoumaný obraz mohl být novodobým falzifikátem. Obě díla jsou pak signována podobnou červenou signaturou *Vincent* v levém spodním rohu (Obr.102, 103,104,105).

Kompletní souhrn provedených analýz a komparací je součástí technologické a historické studie díla.⁶³ Na následujících dvou stránkách jsou ukázky z této studie, které zobrazují možnosti detekce různých vrstev malby s použitím technologie HRXR a MRXR.



Obr. 102 - Signatura obrazu Harvest at La Crau with Montmajour in the Background.



Obr. 103 - Signatura obrazu La Crau s pohledem na Montmajour.

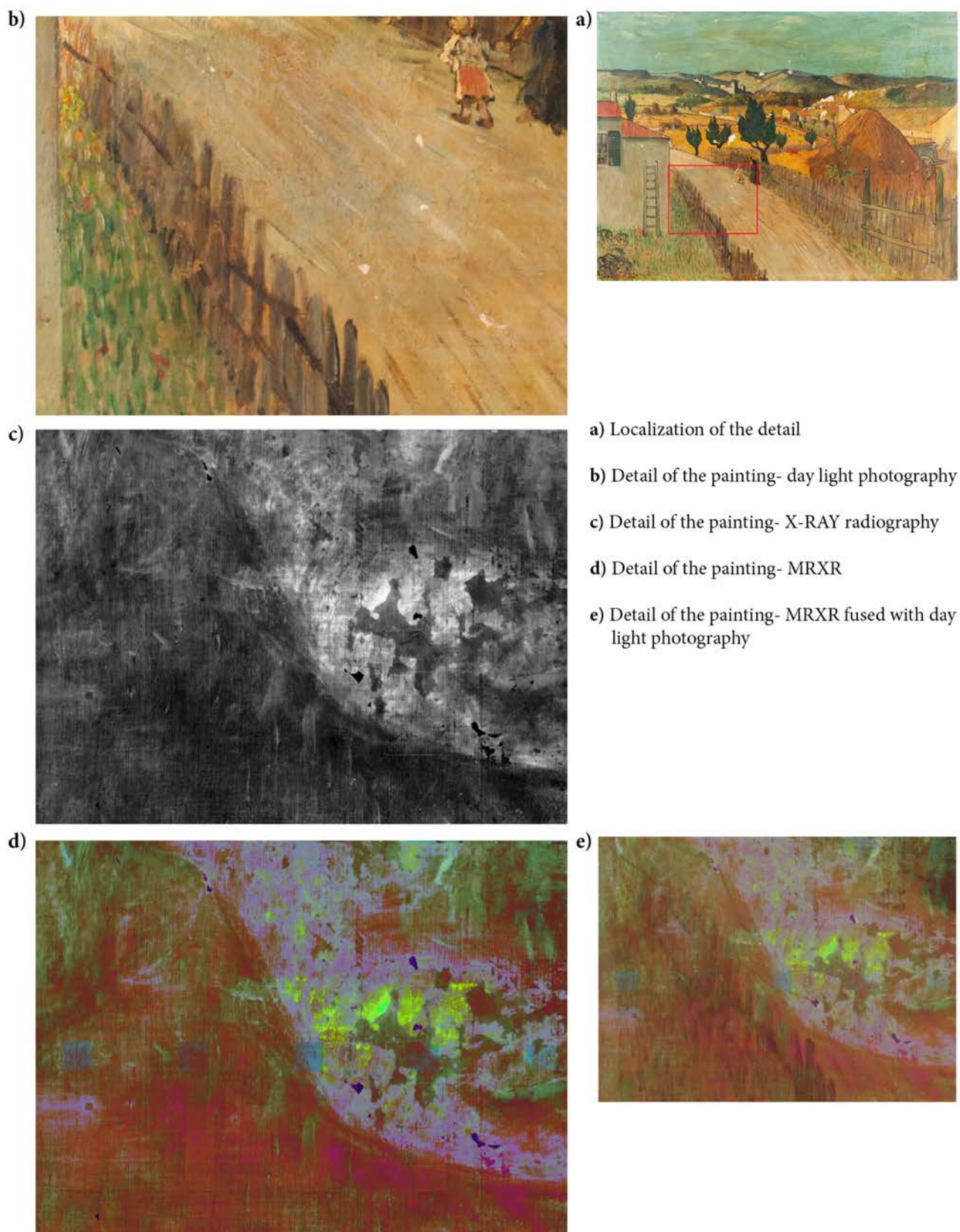


Obr. 104 - Signatura obrazu Harvest at La Crau with Montmajour in the Background.

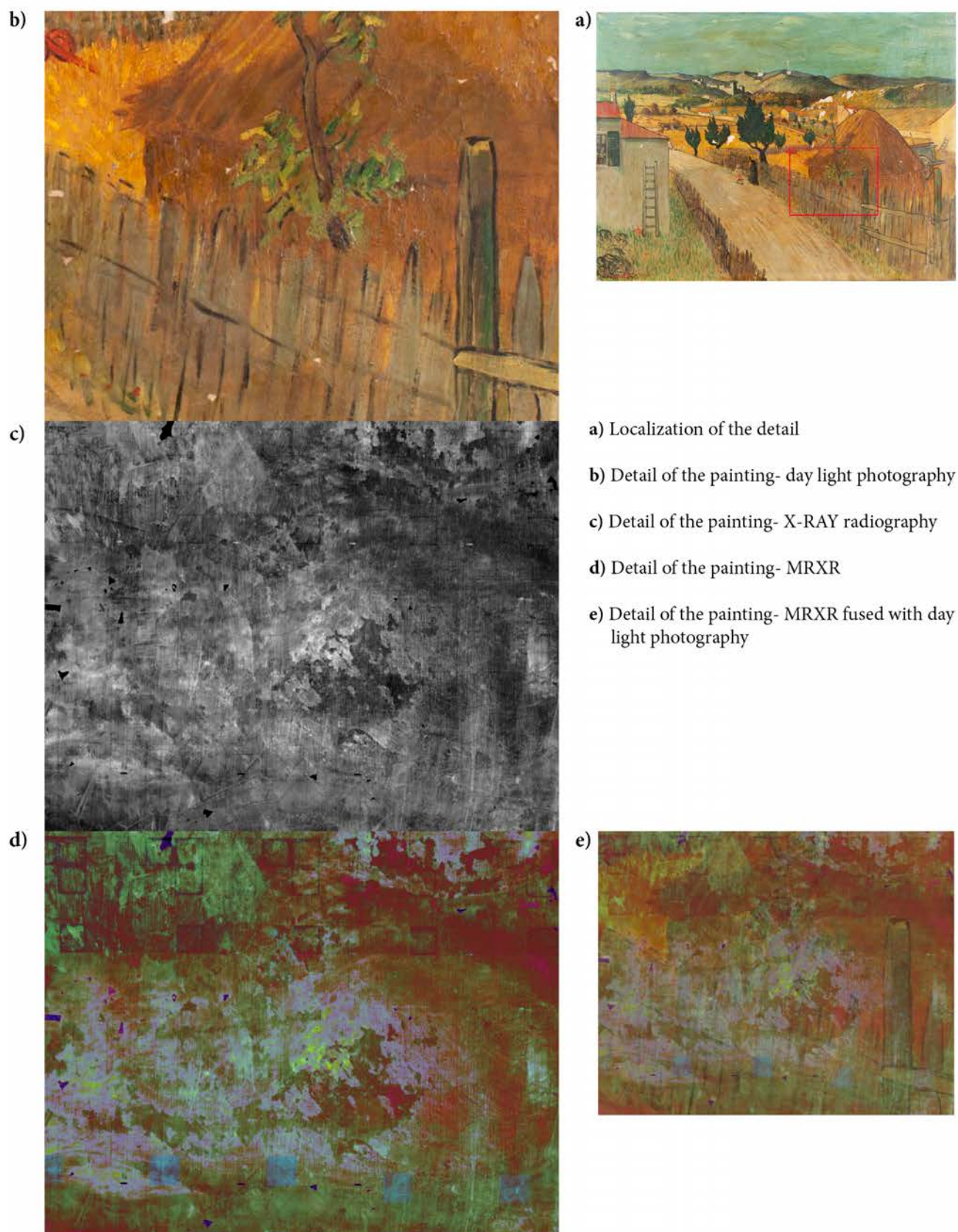


Obr. 105 - Signatura obrazu La Crau s pohledem na Montmajour.

⁶³ LAUTERKRANC, Jiří. La Crau with a View of Montmajour, *Technological and Historical Restoration Research of the Painting*. 2015-2017

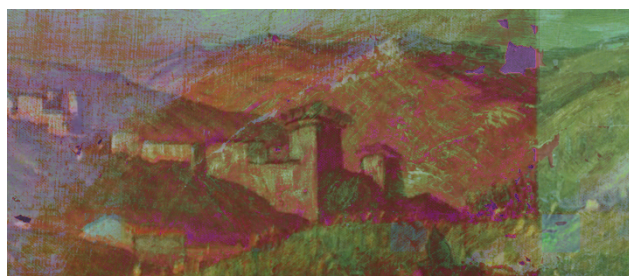


Obr. 106 - Díky použití materiálově citlivé radiografie (d) rozeznáváme jednotlivé pigmenty, a dokážeme tak určit, které struktury jsou součástí původní malby ženského aktu. Zdroj: LAUTERKRANC, Jiří. *La Crau with a View of Montmajour, Technological and Historical Restoration Research of the Painting*. 2015-2017. RTG snímky: Centrum EXCELENCE a ÚTEF



Obr. 107 - Díky použití materiálově citlivé radiografie (d) rozeznáváme jednotlivé pigmenty, a dokážeme tak určit, které struktury jsou součástí původní malby ženského aktu. Zdroj: LAUTERKRANC, Jiří. *La Crau with a View of Montmajour, Technological and Historical Restoration Research of the Painting*. 2015-2017. RTG snímky: Centrum EXCELENCE a ÚTEF

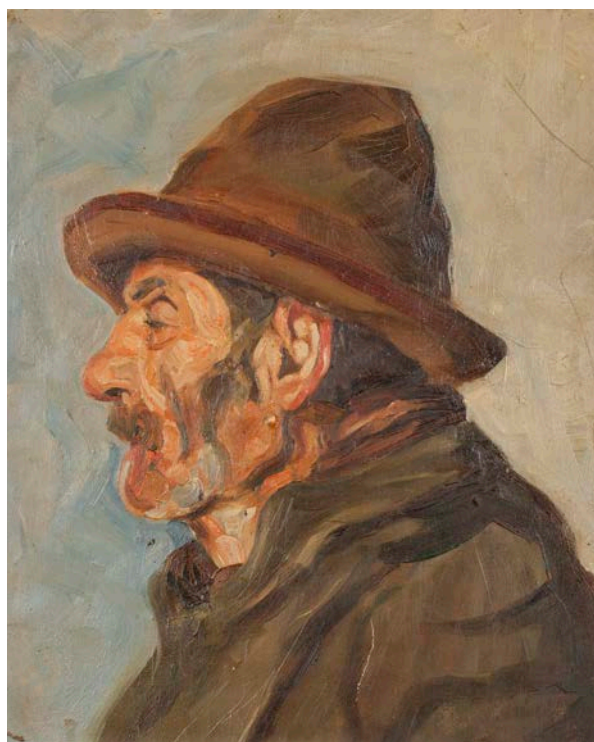
Jednotlivé použité radiografické snímky jsou přiloženy v části obrazové dokumentace této práce.



Obr. 108 - Mont Majour- MRXR

9.2 UKÁZKA MIKORADIOGRAFIE S VYSOKÝM ROZLIŠENÍM - MALBA NA PAPÍROVÉ PODLOŽCE

- Název: Portrét muže v klobouku (2)
- Technika: olej na papíře / kartonu
- Rozměry: 46 x 39 cm
- Datace: po 1885
- Signatura: ne
- Autor: neznámý
- Soukromá sbírka



• Obr. 109 - Portrét muže v klobouku- fotografie v rozptýleném světle.

Popis díla

Dílo představuje portrét postaršího muže. Jedná se nejspíš o sedláka v hnědém klobouku a kabátě, se světle modrou oblohou v pozadí. Portrét je namalován z profilu. Mužova tvář je malována výrazně pastózními jistými tahy *alla prima* v jasných oranžovo žluto hnědých odstínech, které evokují poslední paprsky západu slunce. Pocit jasně ozářené tváře slunečními paprsky podtrhuje také výraz obličejové s přivřenými víčky. Vysoký okrově hnědý klobouk je lemován tmavě červeným okrajem. Na klobouku je patrné, že byl původně namalován nižší, ale v průběhu práce se autor rozhodl pro zvětšení a změnu tvaru-pentimenti. Tato změna je jasně viditelná pouhým okem, ale následující optické průzkumy jí zcela potvrzují. Kabátec je namalován výraznými silnými tahy ve studených hnědo zelených barvách. Obloha v pozadí je vyvedena ve světle modré barvě s nádechem zelených a žlutých tónů, pozadí je opět malováno širokými a dlouhými tahy štětce. Na zadní straně obrazu se nachází nečitelný nápis provedený tužkou.

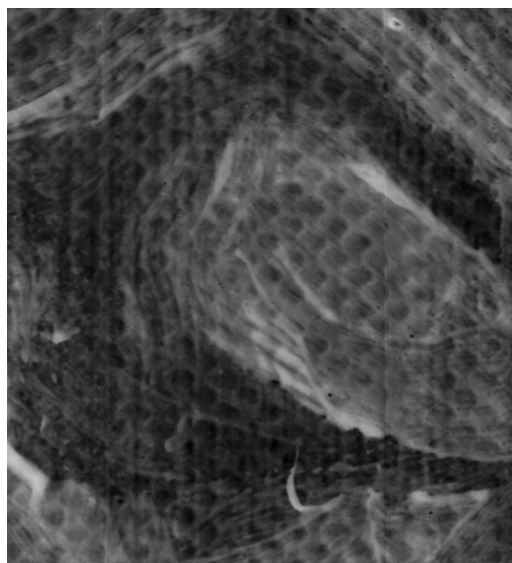


• Obr. 110 - Portrét muže v klobouku- kombinace fotografie a radiografie HRXR znázorňující autorskou změnu v malbě klobouku. Zdroj: InsightArt



- Obr. 111 nahoře a 112 dole - Porovnání kvality neměřených radiogramů. Nahoře je snímek provedený na klasickou fotografickou fólii, dole radiografie ve vysokém rozlišení s detektorem Widex. Zdroj: AVU a InsightArt

Při výrazném zvětšení radiogramu je patrná jeho kvalita ve vysokém rozlišení, dosažená použitím HRXR (Obr.113, 114, 115).



- Obr. 113, 114, 115 - Zdroj: InsightArt

9.3 VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ HRXR PRO RESTAUROVÁNÍ DESKOVÉHO OBRAZU MADONA S JEŽÍŠKEM

- Název: Madona s žehnajícím Ježíškem
- Autor: neznámý
- Datace: 16. stol
- Původ: soukromá sbírka
- Technika: vaječná tempera na dřevěné (borové) desce



• Obr. 116 - Madona s Ježíškem, fotografie v rozptýleném světle před restaurováním.

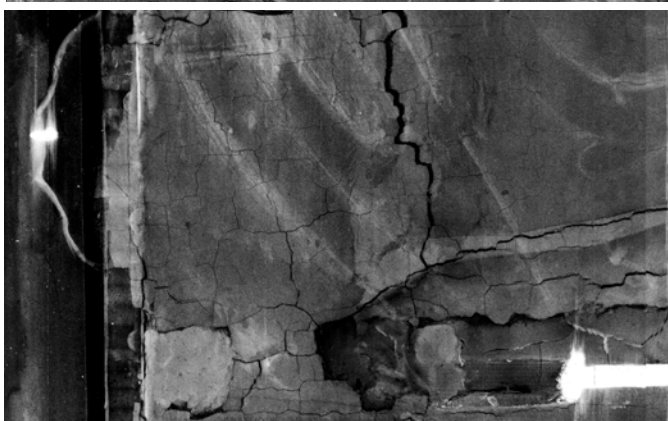
Popis díla a jeho stavu před restaurováním

Obraz představuje Pannu Marii, jenž třímá v levé ruce Ježíška. Madona je oděna v tmavě červené pláštěnce, pod kterou má modrý šat se zlatými hvězdami. Ježíšek je oděn do modrého šatu se svítivě červeným pláštěm. V levé ruce drží zlaté jablko a pravou má pokrčenou v žehnajícím gestu. Pozadí výjevu je zlacené, a nad hlavou Madony i Ježíška je pak situována svatozář. Obraz je vsazen do rámu, který je s ním pevně spojen. Rám je evidentně nepůvodní, pravděpodobně pochází z 18. století. Dílo se před restaurováním nacházelo ve velmi špatném technickém stavu. Celá plocha obrazu byla pokryta silnými lakovými vrstvami.

Malba se v šupinách oddělovala od podkladu a stejně tak i zlacení zdobného rámu. Na díle se nacházelo značné množství retuší, přemaleb a tmelů. Tmelý byly nanесeny velice neřemeslně a v mnohých místech zbytečně překrývaly původní malbu. Nosná deska není původní, obraz byl v minulosti transferován a přenesen na plátěnou podložku, která byla následně nalepena na novou nosnou desku. Poté byl obraz vsazen do zdobného rámu, se kterým je napevno konstrukčně spojen. Je pravděpodobné, že tyto úpravy byly provedeny v rámci jedné rekonstrukce. Plátěná podložka s transferovanou malbou se v mnohých místech oddělovala od nosné desky z důvodu nefunkčnosti původního lepu. Většina těchto defektů byla odhalena a důsledně zmapována pomocí RTG radiografie ve vysokém rozlišení ještě před zahájením restaurování (Obr.117).



• Obr. 117 - Radiografie ve vysokém rozlišení pomohla přesně lokalizovat místa destrukce vrstvy malby a dřevěné nosné desky, díky tomu bylo možné šetrně odstranit nevhodné výplně a přemalby bez rizika dalšího poškození originální malby. Zdroj: InsightArt



• Obr. 118, 119, 120 - Přesná detekce poškození malby pomocí HRXR. Zdroj: InsightArt



• Obr. 121 - Detail Poškození malby v průběhu restaurování.

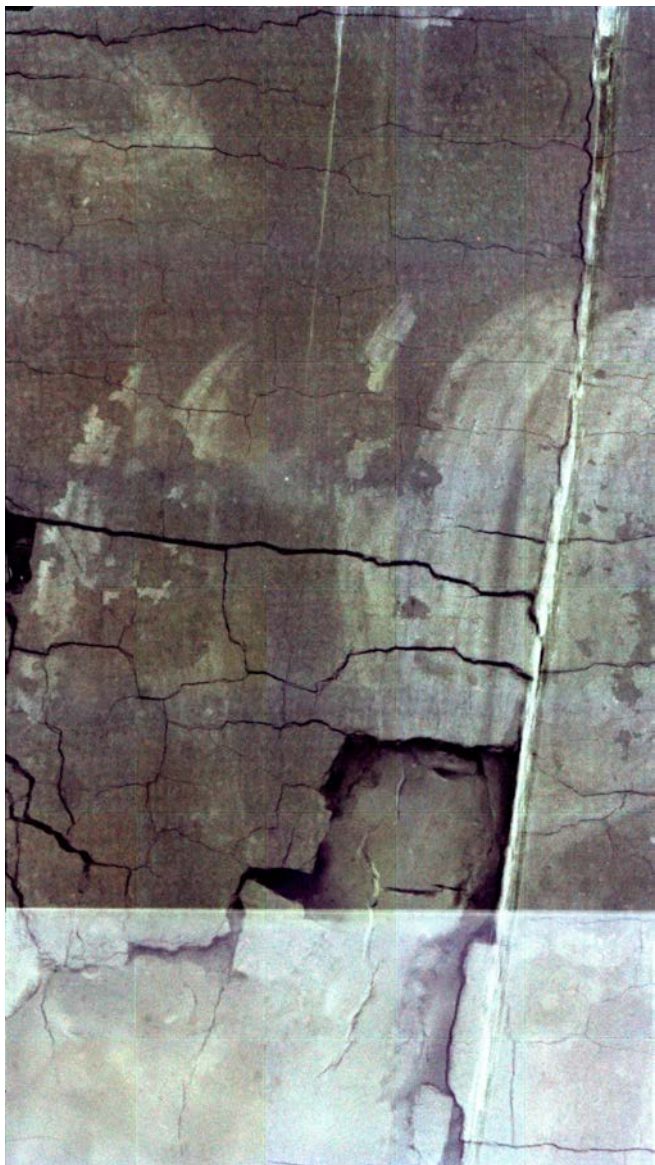


• Obr. 122 - Průběh snímání lakových vrstev, nepůvodních přemalůb a nevhodných tmelů.



• Obr. 123 - Dílo po ukončení restaurátorských prací.

•



• Obr. 124 - Madona s Ježíškem- detail materiálově citlivé mikroradiografie. Zdroj: InsightArt



• Obr. 125 - Madona s Ježíškem- detail materiálově citlivé mikroradiografie s vysokým kontrastem energií. Zdroj: InsightArt



• Obr. 126 - Madona s Ježíškem- detail materiálově citlivé mikroradiografie s vysokým kontrastem energií. Zdroj: InsightArt



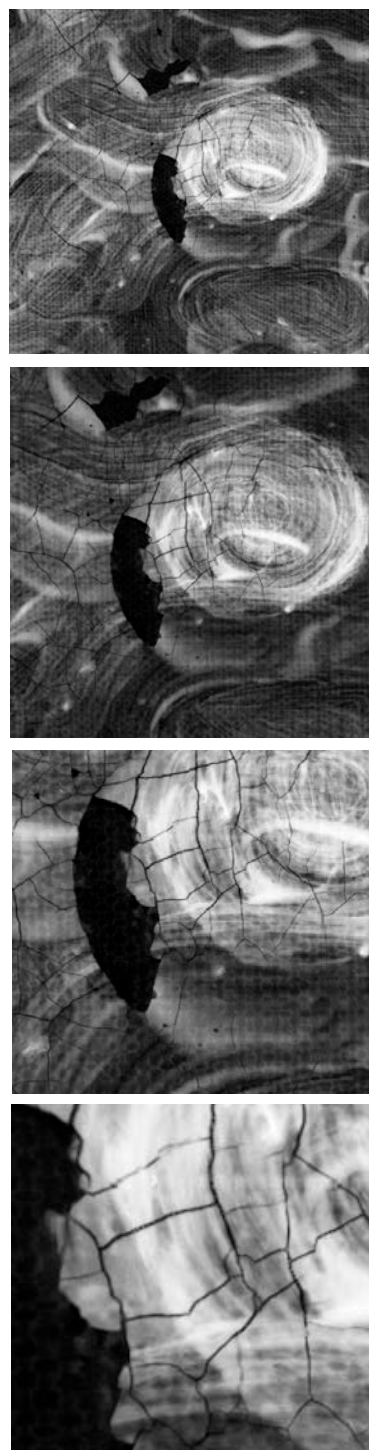
• Obr. 127 - Madona s Ježíškem- detail materiálově citlivé mikroradiografie. Zdroj: InsightArt

VYHODNOCENÍ MOŽNOSTÍ RENTGENOVÉ MIKORADIOGRAFIE A MATERIÁLOVĚ CITLIVÉ RADIOGRAFIE S POUŽITÍM PÍXELOVÝCH DETEKTORŮ WIDEPIX PRO RESTAURÁTORSKÝ KOMPARATIVNÍ PRŮZKUM UMĚLECKÝCH DĚL

Je zřejmé, že rentgenová transmisní radiografie pomocí nejnovějších pixelových detektorů má v oboru průzkumu uměleckých děl velkou budoucnost. Se zapojením dalších technologických procesů, jako je umělá inteligence pro přesné stanovení detekovaných pigmentů v malbě či virtuální realita pro možnosti důkladnější analýzy radiogramů, se z této metody stává užitečný nástroj pro přesnou identifikaci uměleckých děl v procesu autentifikace. Z hlediska rozsáhlých možností aplikace a využití je evidentní, že tyto metody v brzké době proniknou do běžné praxe restaurátorů, konzervátorů, technologů i historiků, kterým mohou významně napomoci v jejich profesním zaměření. Vývoj těchto technologií samozřejmě nadále pokračuje, nicméně již dnes máme v rukou nový funkční nástroj, který posouvá obor rentgenové radiografie na novou úroveň.⁶⁴

S vývojem modulární robotické aparatury pro skenování s detektory Widepix se stává mikroradiografie plně využitelnou metodou průzkumu v běžném provozu. Nejedná se tedy již čistě o výzkumný projekt, ale o technologii uvedenou úspěšně do praxe. Ze všech provedených měření, jejichž výsledky jsou použity v této práci vyplývá, že aplikací těchto metod měření může výzkumník získat významné kvantum užitečných informací o zkoumaném předmětu a to v kvalitě a kvantitě, jaká doposud v radiografickém měření nebyla možná s využitím jediného přístroje. Například celoplošná mikroradiografie ve vysokém rozlišení umožňuje důsledné zkoumání díla v nejmenších detailech jeho vnitřní struktury (Obr.112-115). Kvalitativní vlastnosti těchto

snímků jsou díky nulovému šumu, vysokému dynamickému rozsahu a kontrastu na nesrovnatelně vyšší úrovni, nežli doposud běžně generované snímky s využitím konvenčních metod měření.



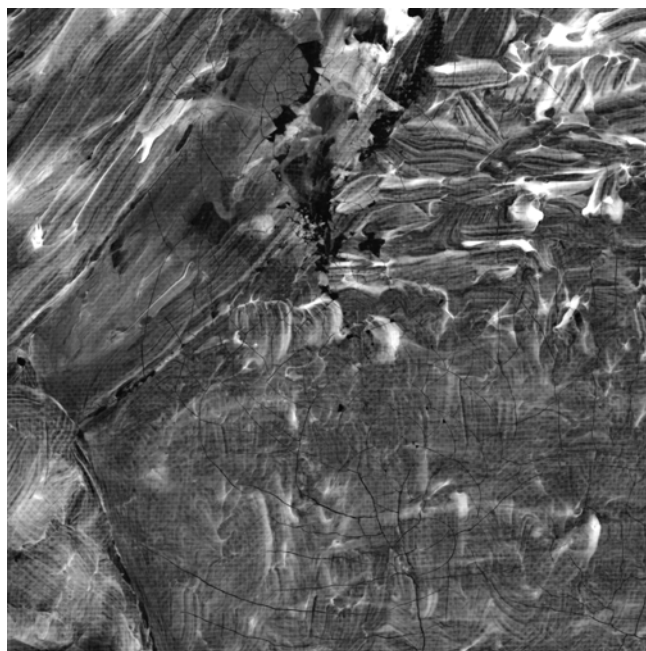
• Obr. 128-131 - Zobrazení kvality zvětšení snímků z HRXR. Zdroj: ÚTEF

64 LAUTERKRANC, Jiří., UHER, Josef. *Nové možnosti průzkumu uměleckých děl pomocí rentgenové transmisní radiografie s využitím nejnovější generace pixelových detektorů*. Fórum pro konzervátory-restaurátory: konference konzervátorů-restaurátorů .. Brno: Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace, 2011-. ISBN 978-80-87896-58-7. ISSN 1805-0050. 2018. s. 107

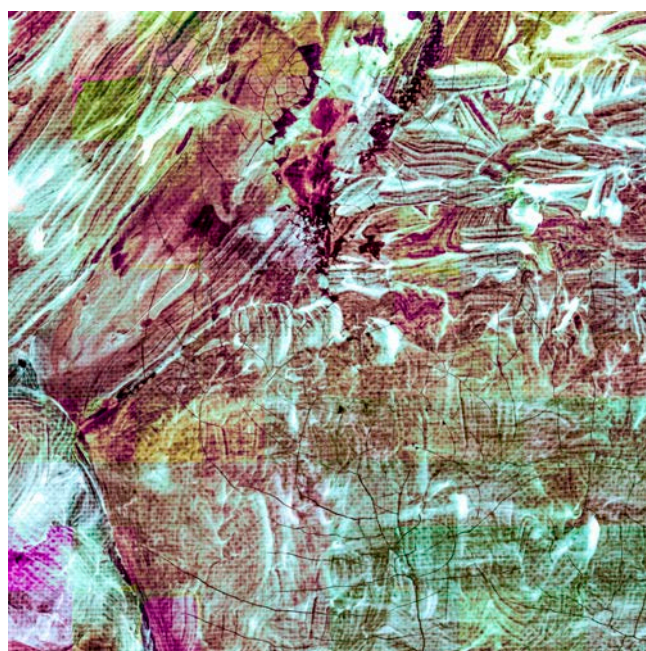
Tyto vlastnosti umožňují restaurátorům pomocí zobrazování určitých kanálů vizualizovat přesně takové informace o díle, které se vztahují k předmětu jeho zájmu na analyzovaném díle. Díky systému přímé digitalizace je průzkum naměřených radiogramů velice efektivní a umožňuje pomocí postprodukčních nástrojů potřebné informace zvýraznit a nepotřebné potlačit, či zcela odfiltrovat. Tyto možnosti jsou pak naplno využitelné díky možnosti filtrace jednotlivých energetických kanálů. V praxi tak restaurátor může zobrazovat jen určité materiály nebo skupiny materiálů distribuované v celé ploše zkoumaného díla. Pokud se pod viditelnou vrstvou malby nachází například starší obraz, který byl vytvořen pomocí jiné skupiny pigmentů než malba, která ho překrývá, jsou výsledky takového filtrování velice efektivní. Filtrovací energetická funkcionality byla otestována v rámci této práce na obraze *La Crau s pohledem na Montmajour* a přinesla nečekaně efektivní výsledky. Pomocí filtrace jednotlivých energetických kanálů byly v radiografickém snímku zcela potlačeny pigmenty, kterými byla namalována svrchní vrstva s malbou krajiny, čímž bylo možné vizualizovat vrstvu původní malby stojícího ženského aktu, který ve standardním RTG zobrazení nebyl vůbec patrný. Tato funkcionality je tedy pro potřeby restaurátorského průzkumu skutečně revoluční, protože se jedná o vizuální neinvazivní separaci dvou překrytých obrazů v rámci radiografického zobrazení v běžném laboratorním prostředí. Nejruznější opravy a přemalby jsou na zkoumaných obrazech poměrně běžným jevem a tento nástroj umožní restaurátorům a technologům zcela radikální možnosti ve způsobu jejich odhalování a vizualizace.

S energetickou senzibilitou použitých detektorů Wipepix je také spojena aplikace umožňující přesné mapování distribuce jednotlivých pigmentů v celé ploše malby a jejich barevnou vizualizaci (Obr.128, 129). Veškeré pigmenty v malbě se v tomto případě zobrazují dle daných energií s určitým přiřazeným barevným odstínem. Výsledný snímek je tedy radiografická celoplošná prvková mapa díla, která restaurátorovy umožňuje dokonalou

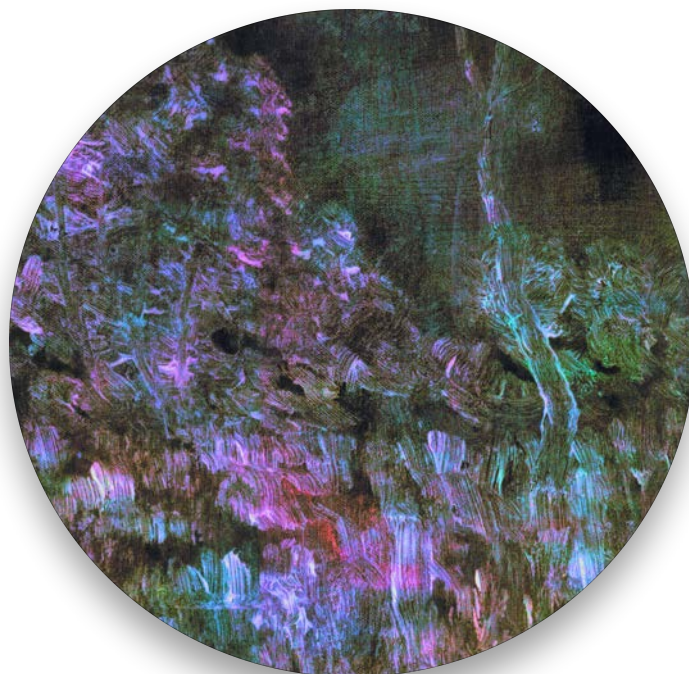
orientaci v průběhu jednotlivých zákroků, jako je například snímání nepůvodních přemaleb. Nevýhodou aplikace popisovaného systému v restaurátorském průzkumu zůstává zatím omezený dimenzionální rozsah skenovací aparatury. Využitelnost metody v praxi je tedy v současné době limitována skenovacím rozsahem ramen robotických manipulátorů. Nicméně v rámci dalšího vývoje aparatury se dá očekávat navýšení těchto parametrů v rámci konstrukčního řešení celého systému.



• Obr. 132 - HRXR - detail malby. Zdroj: ÚTEF



• Obr. 133 - MRXR - detail malby. Zdroj: ÚTEF



ZA VEDENÍ MÉ DISERTAČNÍ PRÁCE DĚKUJI
doc. MgA. Adamovi Pokornému, Ph.D.

A

profesorovi Karlovi Strettimu

ZA ODBORNÉ KONZULTACE DĚKUJI
Ing. Josefovi Uherovi, Ph.D.

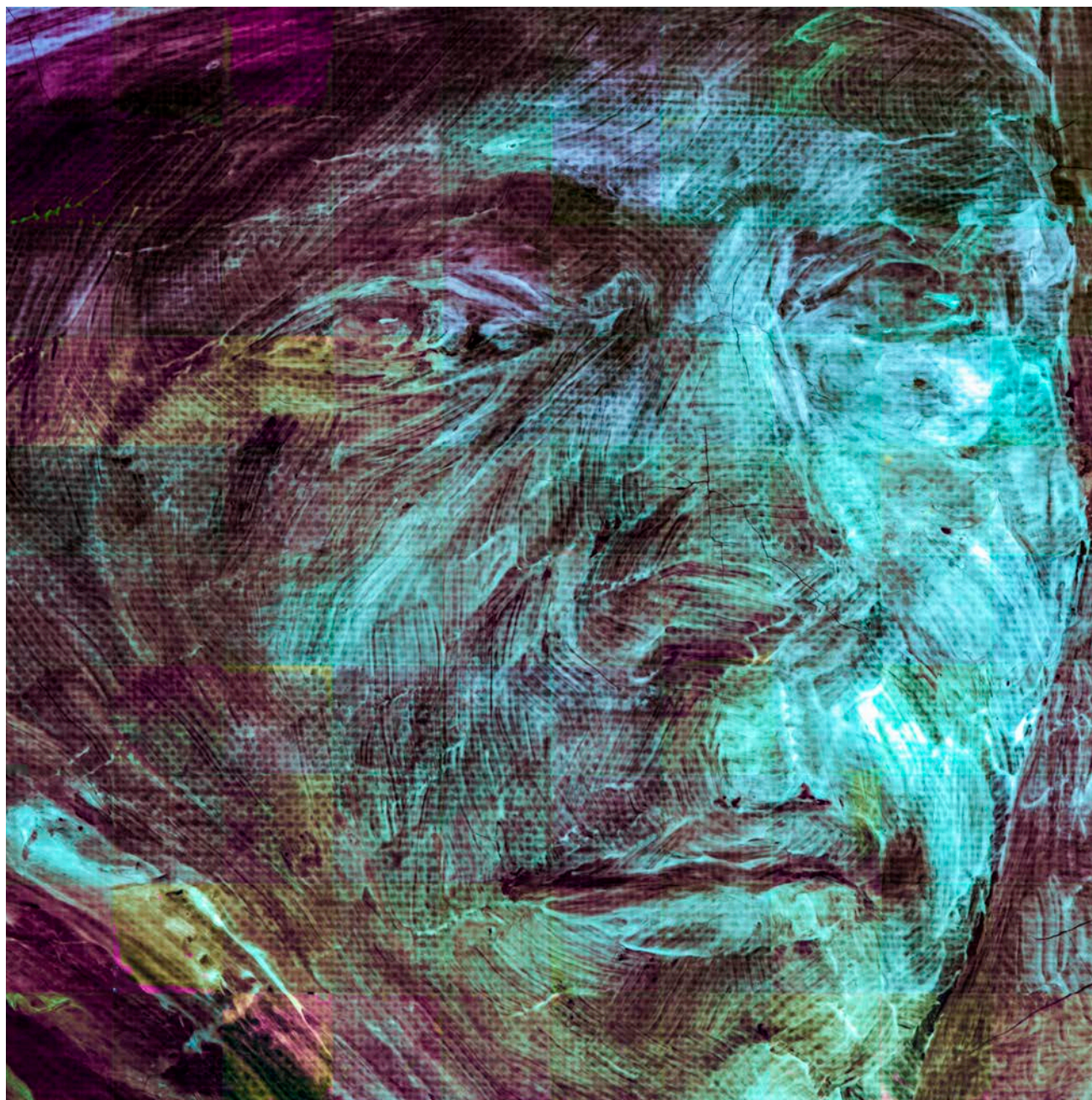
OBRAZOVÁ DOKUMENTACE

11.1 RADIOGRAFICKÉ SNÍMKY POUŽITÉ PRO POTŘEBY TÉTO PRÁCE - VYUŽITÍ TECHNOLOGIE HRXR A MRXR

11.1.1 Portrét muže v klobouku



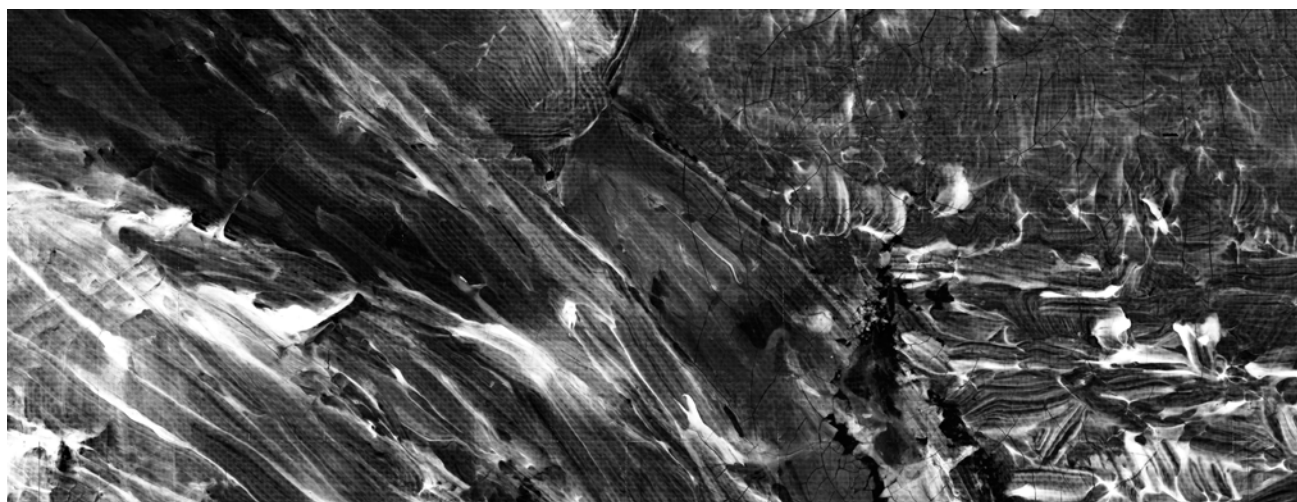
- Obr. 0 - Titulní strana, Portrét muže v klobouku - detail - snímek z HRXR. Zdroj: Jiří Lauterkranc, ÚTEF



- Obr. 0.1 - Titulní strana, Portrét muže v klobouku - detail - snímek z MRXR. Zdroj: Jiří Lauterkranc, ÚTEF

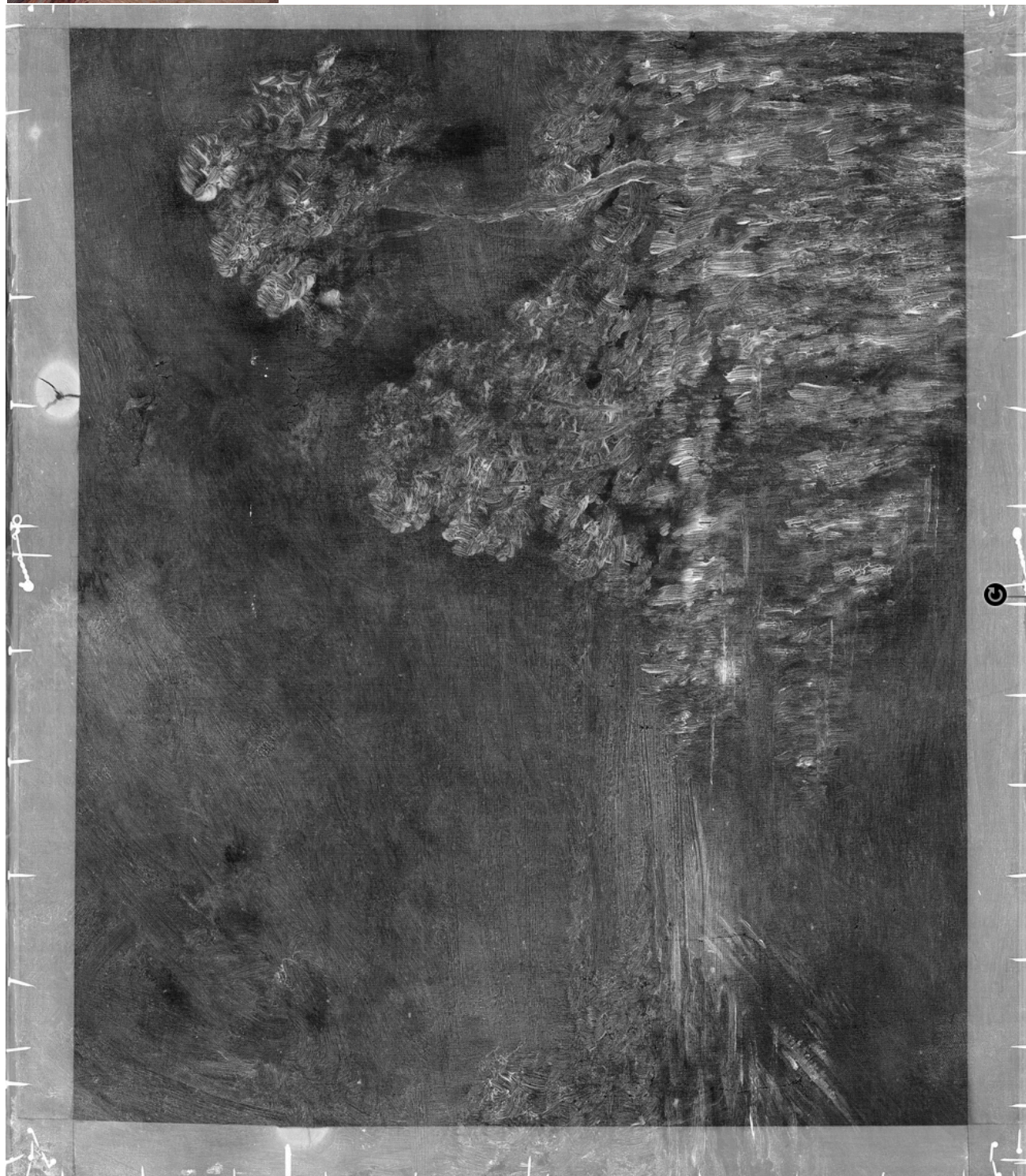


• Obr. 38 - Portrét muže v klobouku - snímek z HRXR ve vysokém rozlišení. Zdroj: Jiří Lauterkranc, ÚTEF



• Obr. 38 - Portrét muže v klobouku - snímek z HRXR ve vysokém rozlišení. Zdroj: Jiří Lauterkranc, ÚTEF

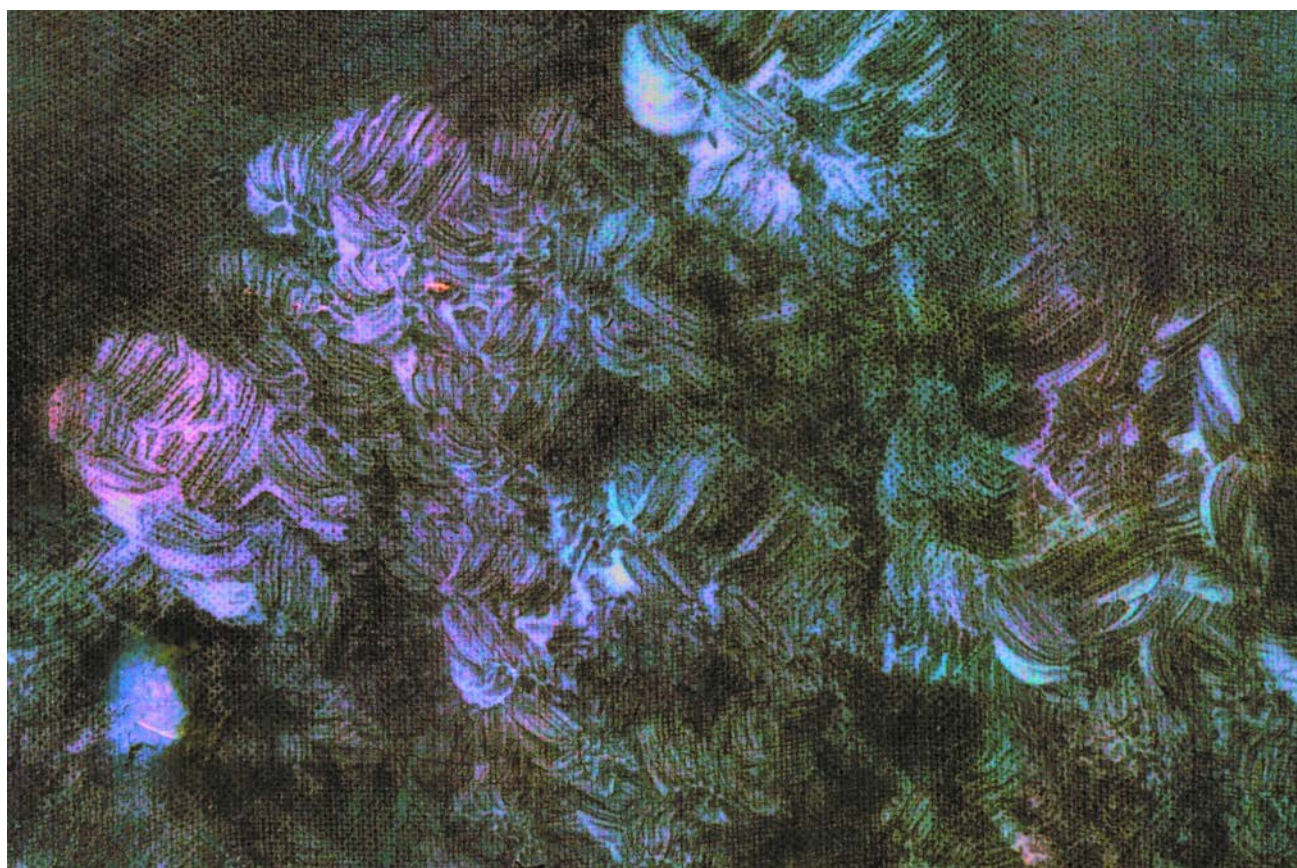
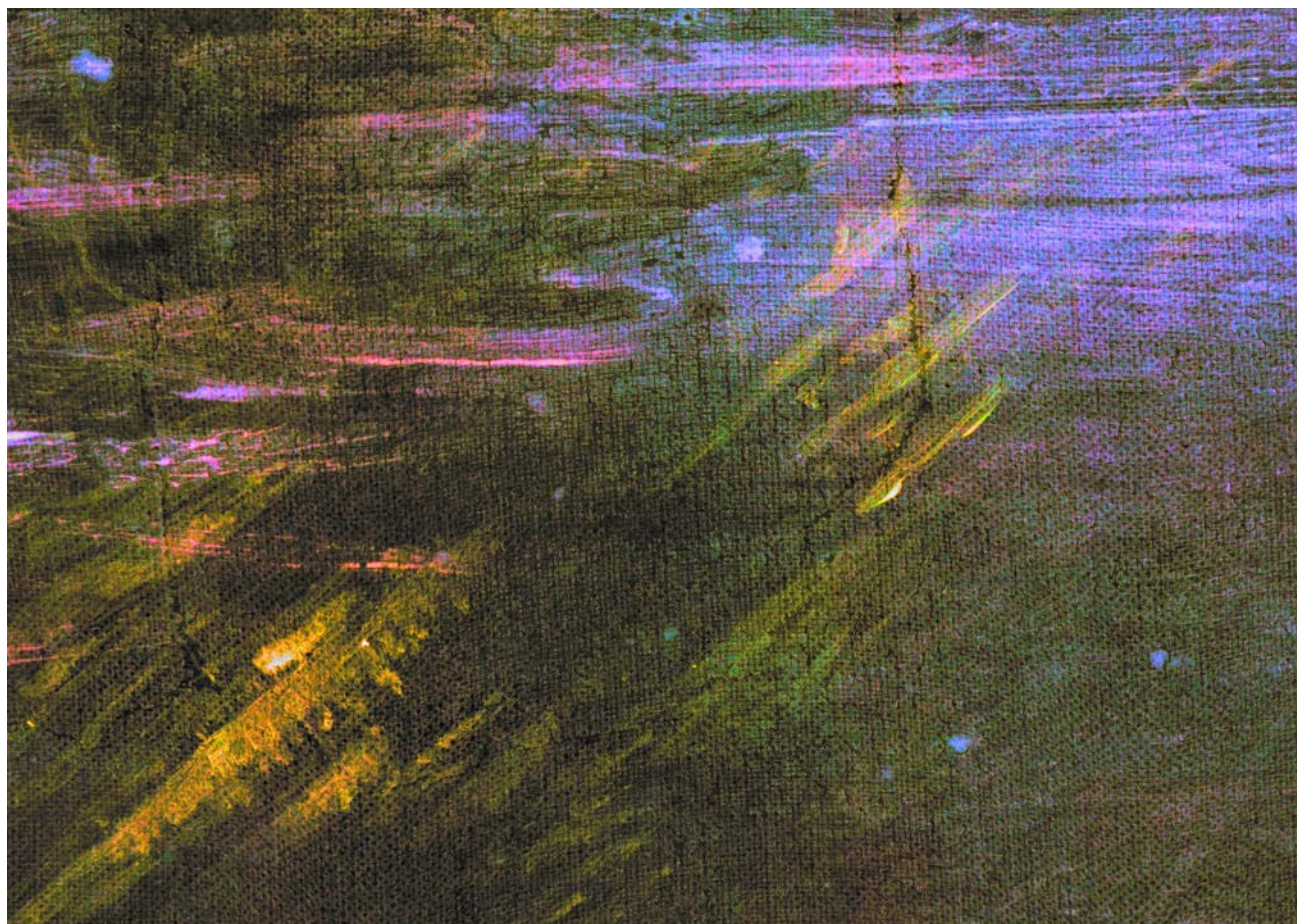
11.1.2 Na mostě



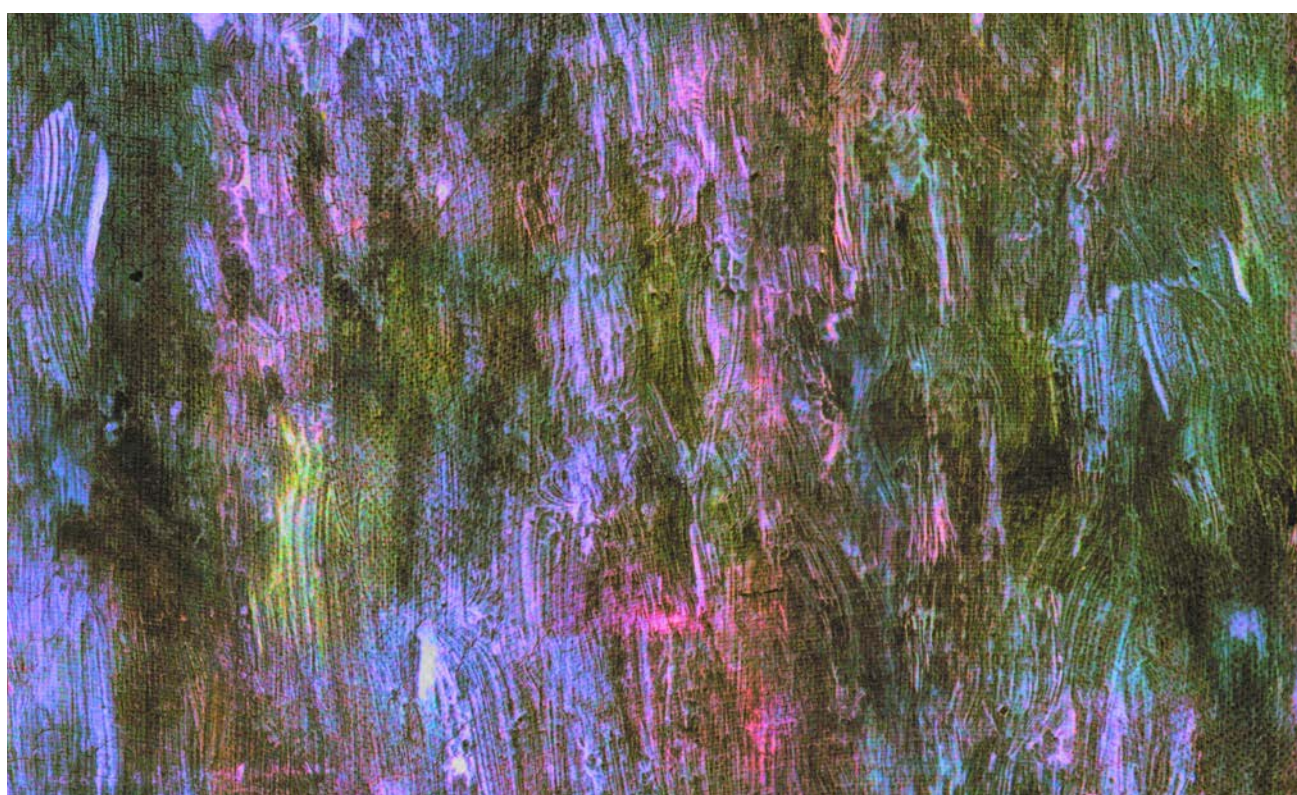
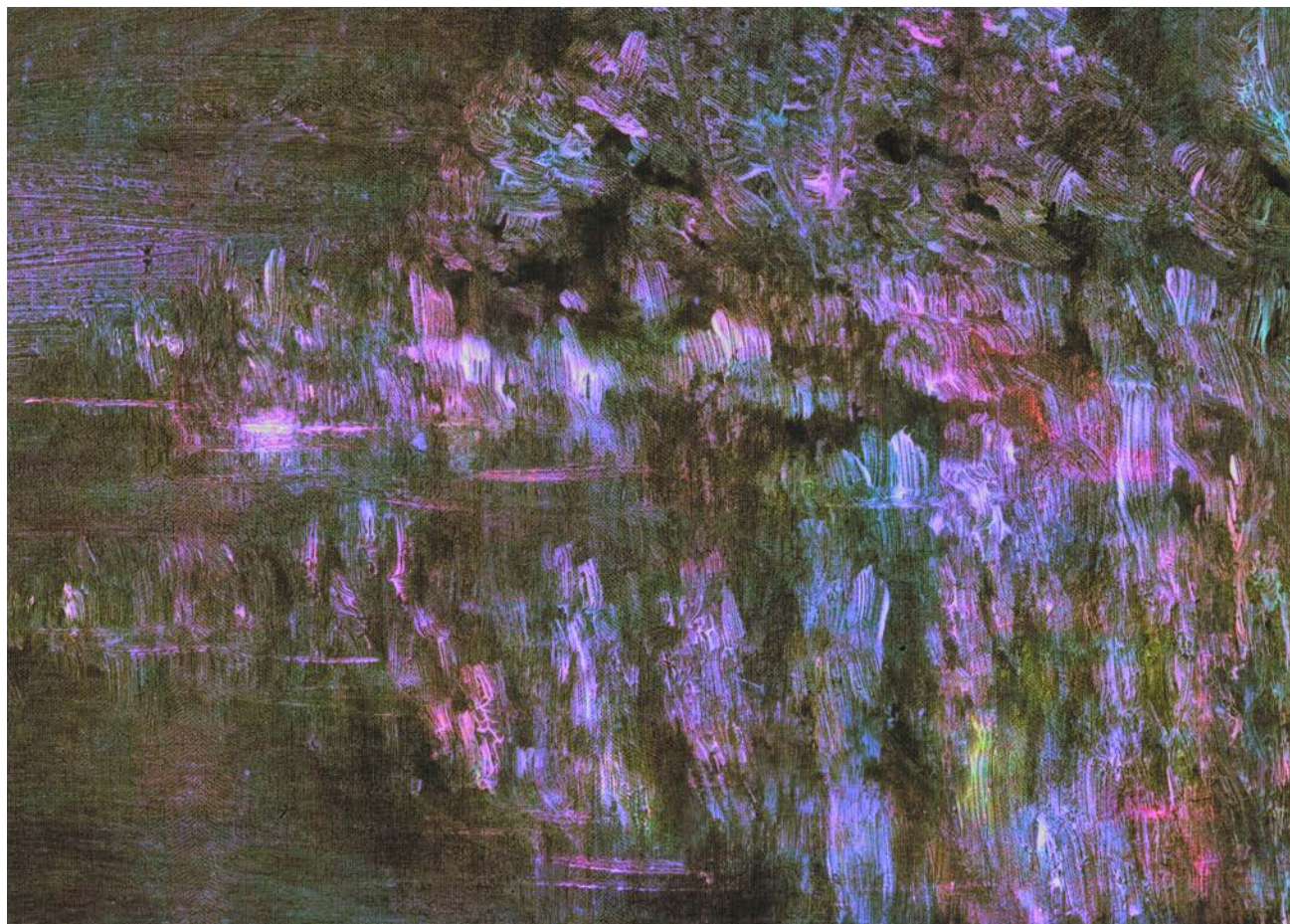
- Obr. 44 - Kopie obrazu Edvarda Muncha *Na mostě* - HRXR snímek ve vysokém rozlišení odhaluje malbu krajiny ukrytou pod svrchním obrazem. Zdroj: InsightArt



- Obr. 45 - Kopie obrazu Edvarda Muncha *Na mostě* - na energeticky citlivém MRXR snímku můžeme vidět distribuci jednotlivých pigmentů v odhalené malbě. Zdroj: InsightArt



- Obr. 45 - Kopie obrazu Edvarda Muncha *Na mostě* - na energeticky citlivém MRXR snímku můžeme vidět distribuci jednotlivých pigmentů v odhalené malbě - detaily. Zdroj: InsightArt



- Obr. 45 - Kopie obrazu Edvarda Muncha *Na mostě* - na energeticky citlivém MRXR snímku můžeme vidět distribuci jednotlivých pigmentů v odhalené malbě - detaily. Zdroj: InsightArt

11.1.3 La Crau s pohledem na Montmajour



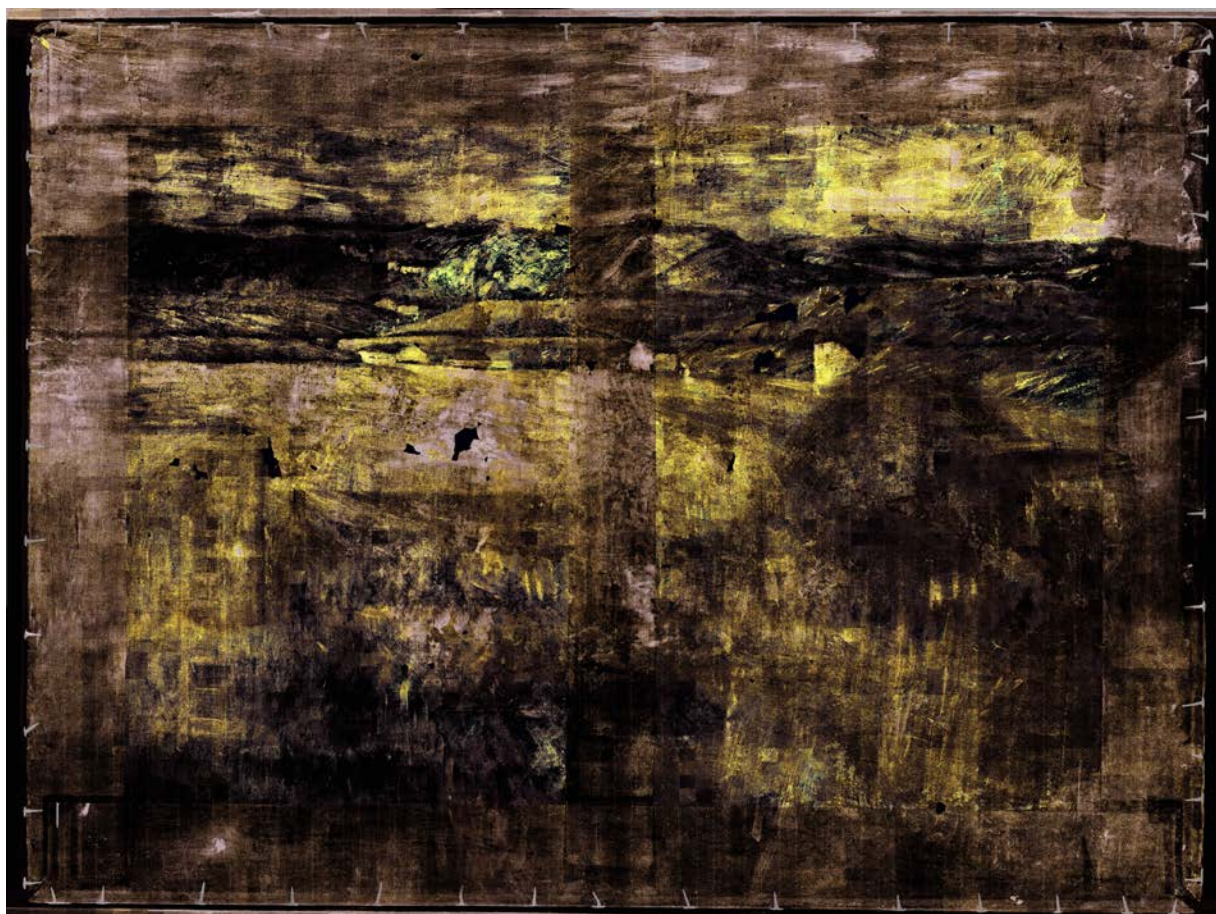
- Obr. 47 a 96 - HRXR snímek zobrazující veškeré naměřené energie. Zdroj InsightArt



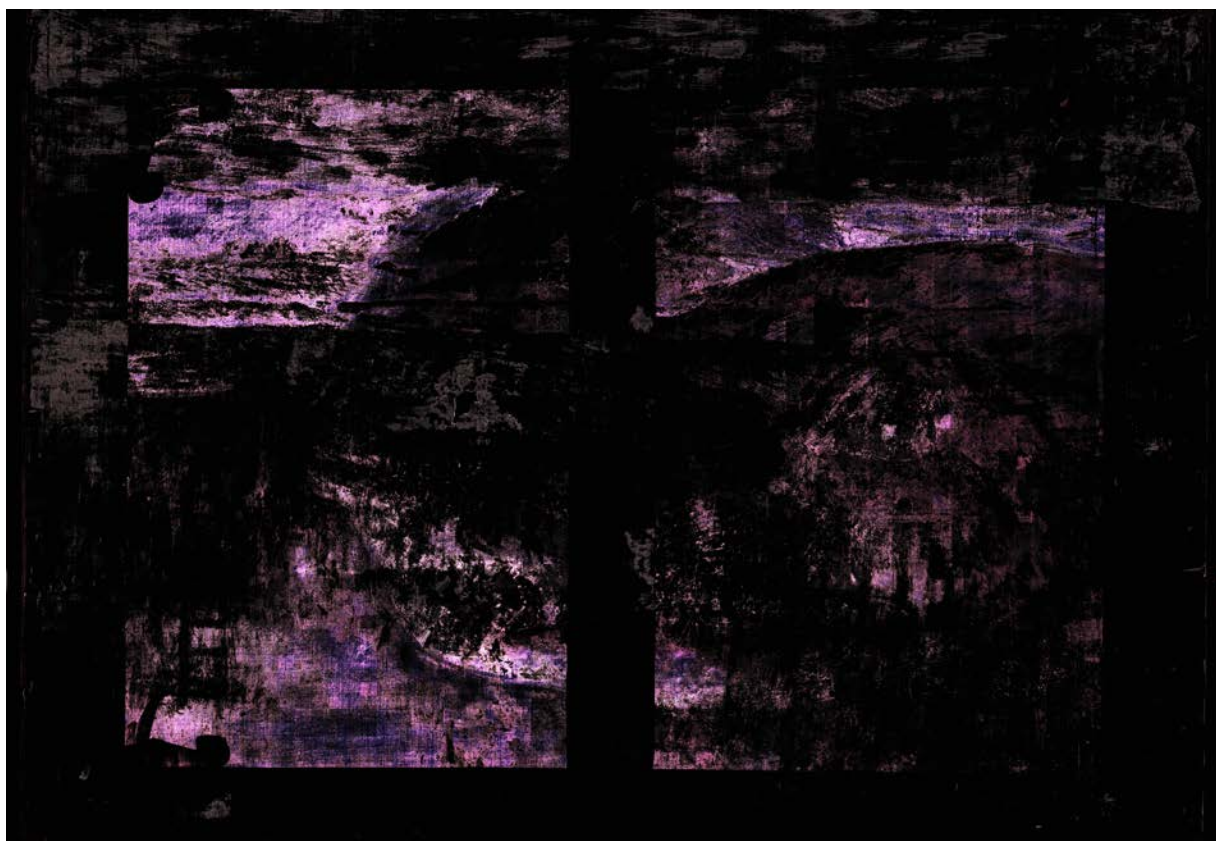
• Obr. 48 - La Crau s pohledem na Montmajour - MRXR. Zdroj: InsightArt



- Obr. 49 a 97 - La Crau s pohledem na Montmojour - zobrazení původní malby ženského aktu pomocí nástroje multispektrálního zobrazování v MRXR. Zdroj: InsightArt

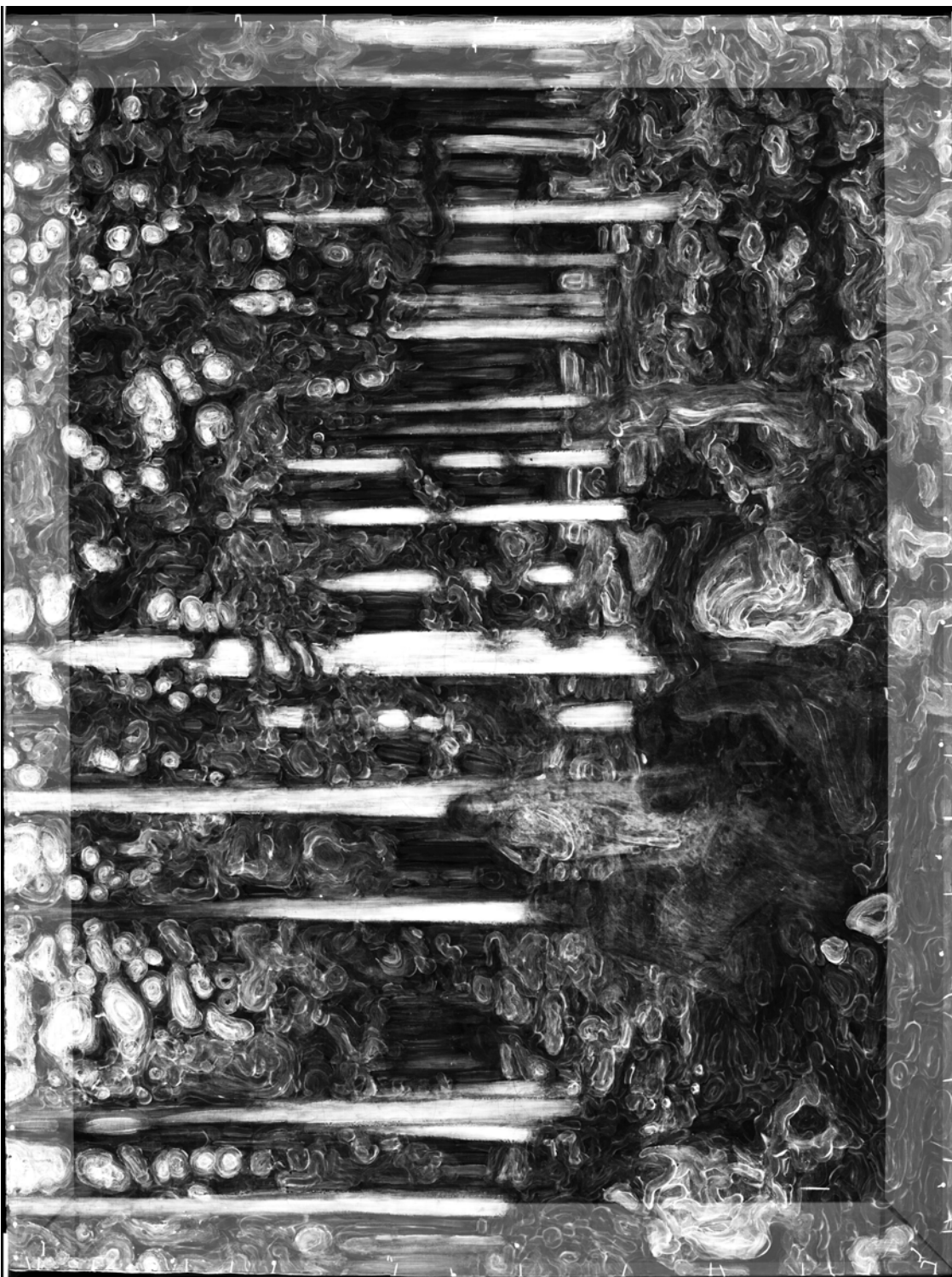


- Obr. 51 - La Crau s pohledem na Montmajour - MRXR- vizualizace pigmentů s dominancí zinku, chromu a kadmia. Zdroj: InsightArt

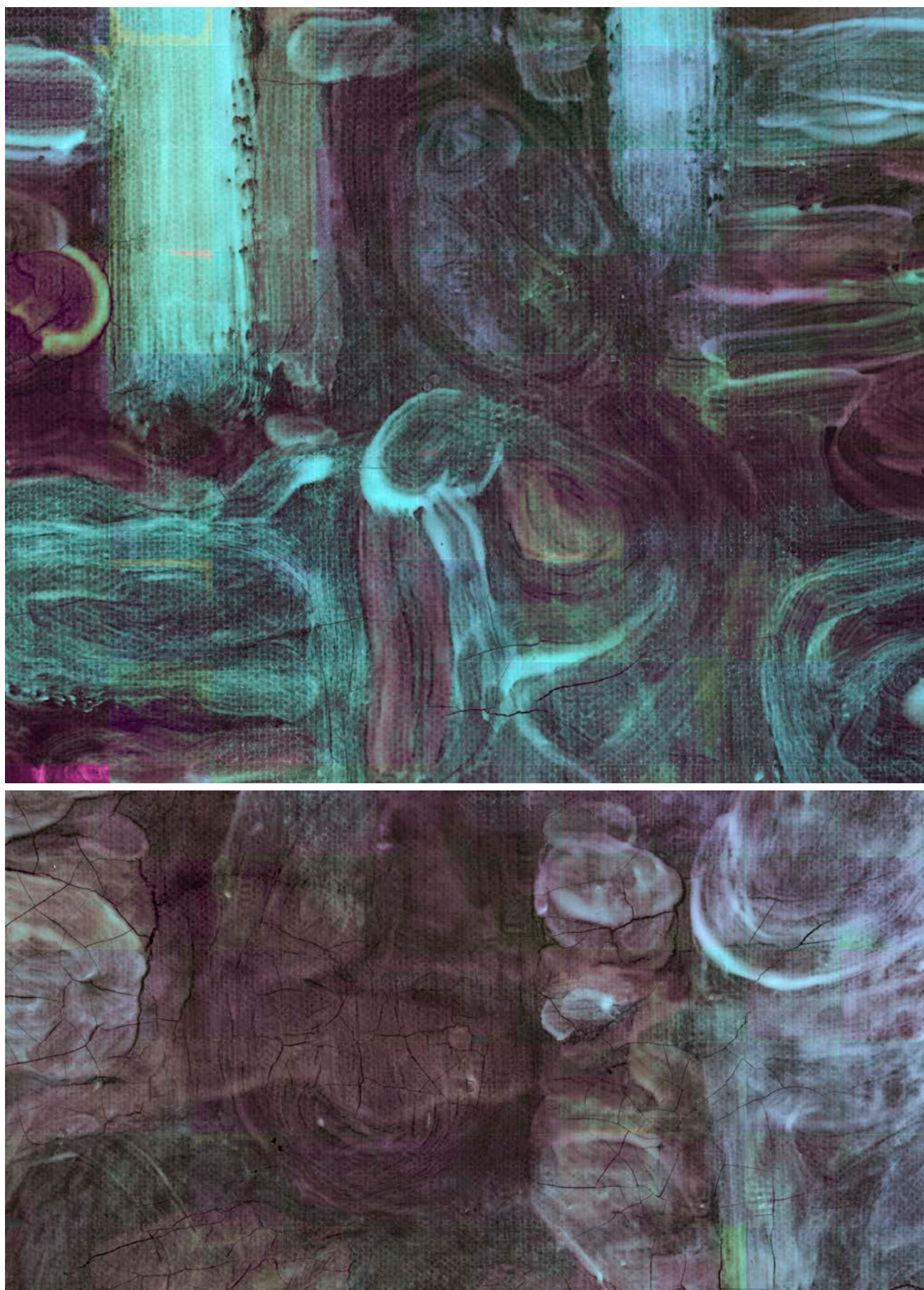


- Obr. 51a - La Crau s pohledem na Montmajour - MRXR - vizualizace pigmentů s dominancí olova. Zdroj: InsightArt

11.1.4 Horký letní večer v lese

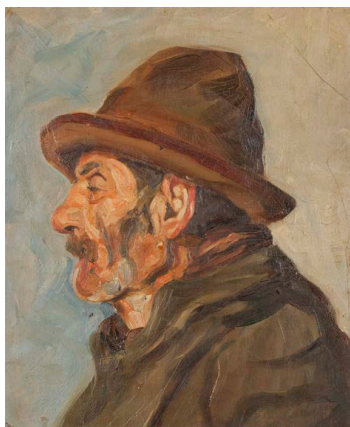


• Obr. 85 - Výsledný radiografický snímek ve vysokém rozlišení 25 000 x 20 000 pixelů- 500 megapixelů. Zdroj: ÚTEF



• Obr. 88 - Vybrané detaily malby zobrazené pomocí materiálově citlivé radiografie MRXR. Zdroj: ÚTEF

11.1.4 Portrét muže v klobouku (2)



• Obr. 112 - radiografie ve vysokém rozlišení s detektorem Widepix - detail. Zdroj: AVU a InsightArt



• Obr. 113 - radiografie ve vysokém rozlišení s detektorem Widepix - detail. Zdroj: AVU a InsightArt

11.1.5 Madona s Ježíškem



• Obr. 117 - Madona s Ježíškem - HRXR radiografie ve vysokém rozlišení. Zdroj: InsightArt

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY, INTERNETOVÝCH ZDROJŮ A POZNÁMEK POD ČAROU

1 EINSTEIN, Albert. *O ponižování vědeckého člověka*. Jak vidím svět. Přeložil Hanuš KARLACH. Praha: NLN, Nakladatelství Lidové noviny, 1993. ISBN 807106078x. s. 143

2 Články. artprice.com. *Price evolution of a Polynesian painting by Paul Gauguin, since 1895*. [online]. ©2017. Dostupné z: <https://www.artprice.com/artmarketinsight/price-evolution-of-a-polynesian-painting-by-paul-gauguin-since-1895>

3 CHARNEY, Noah. *Umění falzifikace: myšlení, motivy a metody padělatelských mistrů*. Přeložil Filip HANZLÍK. Zlín: Kniha Zlin, [2015]. ISBN 978-80-7473-305-5. s. 26

4 Ibid.

5 LYU, Siwei a ROCKMORE, Daniel a FARID, Hany. A digital technique for art authentication. PNAS December 7, 2004 101 (49) 17006-17010. Dostupné z: <https://doi.org/10.1073/pnas.0406398101>

6 ŽEMLIČKA, Jan., JAKŮBEK, Jan., KROUPA, Martin., HRADIL, David., HRADILOVÁ, Janka., MISLEROVÁ, Hana. *Energeticky citlivá rentgenová radiografie pro účely nedestruktivního průzkumu historických maleb*. Acta Artis Academica: sborník mezioborové konference ALMA. Praha: Akademie výtvarných umění v Praze, 2010-. ISBN 978-80-87108-14-7. s. 340

7 Články. Labguide.cz: Fluorochromy [online]. ©2014. Dostupné z: <http://labguide.cz/fluorochromy/>

8 KOUŘILOVÁ, Lucie. Diplomová práce: Metody průzkumu výtvarných děl. AVU Praha, 2016

9 DEN LEEUW, Milko. Day Light Photography. Authentication in Art. Authentication in Art Foundation. 2018. ISBN 978-90-9031032-9

10 ROSINA, Josef. *Biofyzika pro zdravotnické a biomedicínské obory*. Praha: Grada, 2013. ISBN 978-80-247-4237-3

11 FIŠAR, Zdeněk. Principy fluorescenční spektroskopie. *Fluorescenční spektroskopie v neurověděch*. [online]. Červenec 2009. Dostupné z: <http://psych.lf1.cuni.cz/fluorescence/Default.htm>

12 op.pozn. "7"

13 LUCAS, Jim. What is Infrared, *Planet Earth*. [online]. 2015. Dostupné z: <https://www.livescience.com/50260-infrared-radiation.html>

14 op.pozn."8", str. 28

15 DEN LEEUW, Milko. Infrared Reflectography. Authentication in Art. Authentication in Art Foundation. 2018. ISBN 978-90-9031032-9

16 op.pozn. "8"

17 KUSALA, Jaroslav. Rentgenové záření. *Rentgenové záření*[online]. 2004. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/rtg/fyzika.htm>

18 WATERS, Hanah. The First X-ray, 1895. *The discovery of a new and mysterious form of radiation in the late 19th*

century led to a revolution in medical imaging. [online]. 2011. Dostupné z: <https://www.the-scientist.com/foundations/the-first-x-ray-1895-42279>

19 Ibid.

20 JAKŮBEK, Jan., DAMMER, Jiří., HOLÝ, Tomáš., PLATKEVIČ, Michal., UHER, Josef., VYKYDAL, Zdeněk.: Digitální transmisní radiografie s pixelovými detektory Medipix. Československý časopis pro fyziku: Czechoslovak Journal of Physics. Praha: Ústřední ústav fyzikální, 1951-. ISSN doi:0009-0700

21 CHARNEY, Noah. *Umění falzifikace: myšlení, motivy a metody padělatelských mistrů*. Slovníček vědeckých metod autentizace. Přeložil Filip HANZLÍK. Zlín: Kniha Zlin, [2015]. ISBN 978-80-7473-305-5

22 DE JONG, Indeborg. DEN LEEUW, Milko. MASS, Jennifer. PINNA, Daniela. SHINDELL, Lawrence. SPAPENS, Oliver. *Authentication in Art*. Authentication in Art Foundation. 2018. ISBN 978-90-9031032-9

23 ULMANN, Vojtěch. *Vznik a vlastnosti rentgenového obrazu*, AstroNuklFyzika. [online]. Dostupné z: <http://astronuklfyzika.cz/strana2.htm>

24 JAKŮBEK, Jan., DAMMER, Jiří., HOLÝ, Tomáš., PLATKEVIČ, Michal., UHER, Josef., VYKYDAL, Zdeněk.: Digitální transmisní radiografie s pixelovými detektory Medipix. Československý časopis pro fyziku: Czechoslovak Journal of Physics. Praha: Ústřední ústav fyzikální, 1951-. ISSN doi:0009-0700

25 op. pozn. "23"

26 op. pozn. "23"

27 MARTÍNEK, J. *Digitalizace rentgenového obrazu*. Použití v medicíně a defektoskopii. 3., doplněné a upravené vydání, 2004

28 K-edge imaging je neinvazivní metoda průzkumu založená na radiačním záření produkovaném synchrotrony. S pomocí využití K-hran elektronů lze zobrazit specifické vlnové délky polychromatického radiačního záření, které představují jednotlivé energie materiálů zkoumaného vzorku. Konkrétně v případě průzkumu obrazů na plátně či dřevěných deskách je možné vizualizovat distribuci jednotlivých pigmentů v celé ploše malby. Díky specifickým vlastnostem nových PCC detektorů je v současnosti možné používat K-edge imaging i v běžných studiových či laboratorních podmínkách.

29 IWANCZYK, Jan S. a Krzysztof INIEWSKI. *Radiation detectors for medical imaging*. Medipix detectors. Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, [2016]. Devices, circuits, and systems. ISBN 9781498704359

30 Advacam: <http://advacam.com>

31 InsightArt: <https://insightart.eu>

32 The Medipix Collaborations. Our story. Dostupné z: <https://medipix.web.cern.ch/about-medipix-collaborations>

33 JAKŮBEK, Jan. *Pixel Device TimePix*. Dostupné z: <http://aladdin.utef.cvut.cz/ofat/others/Timepix/index.htm>

34 DAMMER, Jiří. Diplomová práce: *Možnosti použití obrazových detektorů Medipix2 v RTG mamografii*. Medipix2. 1. LF UK, Praha. 2005. s. 30

35 WidePix 10x10. Custom Large Area Camera. Dostupné z: <http://advacam.com/camera/widepix-10x10>

- 36 WidePix 2(1)x5. Industrial Scanning Camera. Dostupné z: <http://advacam.com/widepix>
- 37 RAGAI, Jehane. *The scientist and the forger: probing a turbulent art world*. Second edition. New Jersey: World Scientific, [2018]. ISBN 9781786344205. s. 156
- 38 Analytical chemistry for cultural heritage. New York, NY: Springer Berlin Heidelberg, 2017. ISBN 9783319528021. s. 67-68
- 39 IAFRATE, Fernando. *Artificial intelligence and big data*. Hoboken, NJ: ISTE Ltd/John Wiley and Sons, 2017. ISBN 9781786300836
- 40 LAUTERKRANC, Jiří., UHER, Josef. *Nové možnosti průzkumu uměleckých děl pomocí rentgenové transmisní radiografie s využitím nejnovější generace pixelových detektorů*. Fórum pro konzervátory-restaurátory: konference konzervátorů-restaurátorů .. Brno: Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace, 2011-. ISBN 978-80-87896-58-7. ISSN 1805-0050. 2018. s. 104
- 41 KLOUZA, Radomil. *Pohled do obrazu: technologická kopie obrazu jako tvůrčí studijní proces*. Předmluva. Prof. Karel Stretti, ak. Mal., RŠM AVU. Boskovice: Albert, 2014. ISBN 9788073262457. s. 6
- 42 Součástí praktické části této práce je také průzkum díla La Crau s pohledem na Montmajour signovaného Vincent. S využitím materiálově citlivé radiografie byla pod vrstvou malby objevena malba nahé ženské postavy, kterou se díky filtraci jednotlivých energetických kanálů podařilo v plné míře vizualizovat jak je vidět na obrázcích č. 46, 47, 48 a 49. Obrázky 50, 51 a 52 pak představují možnosti vizualizace jednotlivých energetických kanálů na stejném obraze.
- 43 LAUTERKRANC, Jiří., UHER, Josef. *Nové možnosti průzkumu uměleckých děl pomocí rentgenové transmisní radiografie s využitím nejnovější generace pixelových detektorů*. Fórum pro konzervátory-restaurátory: konference konzervátorů-restaurátorů .. Brno: Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace, 2011-. ISBN 978-80-87896-58-7. ISSN 1805-0050. 2018. s. 105
- 44 Insightart.eu. *Technology. Development*. 2018. Dostupné z: <https://insightart.eu/technology/developemnt/>
- 45 Insightart.eu. *Technology. Development. X-ray Spyglass 2018*. Dostupné z: <https://insightart.eu/technology/developemnt/>
- 46 Minipix. *Portable Small USB Camera*. Dostupné z: <http://advacam.com/camera/minipix>
- 47 SUH, Sang C. *Big data and visual analytics*. New York, NY: Springer Science+Business Media, 2017. ISBN 978-3-319-63915-4
- 48 COSTA, Vincent., DELLUNDE, Pilar., FALOMIR, Zoe. *Artificial intelligence research and development: current challenges, new trends and applications*. Washington, DC: IOS Press, 2018. ISBN 9781614999171. s. 37-46
- 49 TUREČEK, Daniel., Holý, T., JAKŮBEK, Jan., POSPÍŠIL, Stanislav., VYKYDAL, Zdeněk. (2011). *Pixelman a multi-platform data acquisition and processing software package for Medipix2, Timepix and Medipix3 detectors*. Journal of Instrumentation. 6. C01046. 10.1088/1748-0221/6/01/C01046
- 50 MIHELJ, Matjaž a J. PODOBNIK. *Haptics for virtual reality and teleoperation*. New York: Springer, [2012]. International series on intelligent systems, control and automation--science and engineering, v.64. ISBN 978940075
- 51 Zdroj: InsightArt, *RToo 3D, Advanced Robotic X-ray Scanner for Art*, Technical description
- 52 Zdroj: InsightArt, *RToo 3D, Advanced Robotic X-ray Scanner for Art*, Technical description
- 53 Výsledná zpráva: ADVACAM, Josef Uher, *Souhrn spektrometrického zobrazovacího rentgenového měření vzorků pigmentů*
- 54 Dle dostupných informací bylo dílo vystaveno na 65. výroční výstavě Krasoumné jednoty pro Čechy v Praze roku 1904 pod názvem "Les" s katalogovým číslem 236 a uvedeným autorem- Edvard Munch. Autorství tohoto díla je některými odborníky podporováno, ale má i své odpůrce. Provedená měření, analýzy a komparativní průzkumy byly vyhotoveny na základě požadavku majitele díla se zaměřením na objasnění jeho technologické struktury a historických souvislostí, které by přispěly k debatě o jeho autorství .
- 55 TOPALOVA-CASADIEGO, Biljana., WOLL, Gerd . *Technical Aspects of Edvard Munch's Paintings. Edvard Munch: complete paintings : catalogue raisonné*. New York: Thames & Hudson, 2009. ISBN 9780500093450.
- 56 USTVEDT, Øystein a Trond ASLAKSBY. *Edvard Munch: det syke barn : historien om et mesterverk = the sick child : the story of a masterpiece*. Oslo: Nasjonalmuseet, c2009. ISBN 9788281540361
- 57 SINGER, Brian., ASLAKSBY, Tront., TOPALOVA-CASADIEGO, Biljana., & STOREVIK TVEIT, Eva. (2010). Investigation of Materials Used by Edvard Munch. *Studies in Conservation*, 55(4), 274-292. Retrieved from <http://www.jstor.org/stable/42751727>
- 58 Výsledná zpráva popisující metodiku radiografického měření díla byla vyhotovena ve spolupráci s Danielem Vavříkem a Zdeňkem Vykydalem z ÚTEF a Janem Jakůbkem z Advacam.
- 59 GOGH, Vincent van. *Dopisy přátelům*. 1. vyd. Praha: Odeon, 1977. 262 s., [64] s. obr. a barev. obr. příl. Paměti, korespondence, dokumenty, sv. 59.
- 60 NIENKE, Wite. *The Atelier Cormon*, 1885-1886. 2011. Dostupné z: <http://www.vangoghstudiopractice.com/2011/04/spend-another-year-practising-drawing-first-/atelier-cormon-2/>
- 61 LAUTERKRANC, Jiří., UHER, Josef. *Nové možnosti průzkumu uměleckých děl pomocí rentgenové transmisní radiografie s využitím nejnovější generace pixelových detektorů*. Fórum pro konzervátory-restaurátory: konference konzervátorů-restaurátorů .. Brno: Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace, 2011-. ISBN 978-80-87896-58-7. ISSN 1805-0050. 2018. s. 107
- 62 Vincent van Gogh Letters. Dostupné z: <http://vangoghletters.org/vg/>
- 63 LAUTERKRANC, Jiří. *La Crau with a View of Montmajour, Technological and Historical Restoration Research of the Painting*. 2015-2017 LAUTERKRANC, Jiří. *La Crau with a View of Montmajour, Technological*

and Historical Restoration Research of the Painting. 2015-2017

64 LAUTERKRANC, Jiří., UHER, Josef. Nové možnosti průzkumu uměleckých děl pomocí rentgenové transmisní radiografie s využitím nejnovější generace pixelových detektorů. Fórum pro konzervátory-restaurátory: konference konzervátorů-restaurátorů .. Brno: Technické muzeum v Brně, Metodické centrum konzervace, 2011-. ISBN 978-80-87896-58-7. ISSN 1805-0050. 2018. s. 107

SEZNAM POUŽITÝCH OBRAZOVÝCH PŘÍLOH

- Obr. 0 - Titulní strana, *Portrét muže v klobouku*, fotografie v rozptýleném světle, snímek z HRXR a MRXR. Zdroj: Jiří Lauterkranc, ÚTEF
- Obr. 1 - Paul Gauguin, *Te Fare*, 1892. Zdroj: <https://www.wikiart.org>
- Obr. 2 - Historický vývoj nárůstu ceny obrazu *Te Fare* od Paula Gauguina. Zdroj: artprice.com
- Obr. 3 - Otto Wacker (zcela vpravo) před soudem, 1932.
- Obr. 4 - Soudní proces s Han van Meegerenem roku 1947.
- Obr. 5 - Han van Meegeren při práci na obraze *Christ in the Temple*.
- Obr. 6 - Elektromagnetické spektrum zobrazující frekvence záření s barvami viditelného světla. Zdroj: labguide.cz/fluorochromy/
- Obr. 7 - RTG snímek- Desková malba ze 16. století. Zdroj: InsightArt
- Obr. 8 - RTG snímek obrazu Pabla Picassa *Modrý pokoj* z roku 1901.
- Obr. 9 - Rozsah oblastí viditelného světla. Zdroj: techniled.cz
- Obr. 10,11,12 - Portrét muže v klobouku, kolem roku 1870, soukromá sbírka. Nahoře fotografie v rozptýleném denním světle, uprostřed tangenciální osvětlení pravé a dole tangenciální osvětlení levé. Zdroj: Jiří Lauterkranc
- Obr. 13,14 - Josef Navrátil, Portrét generála Trčky, malba na dřevěné desce / nahoře fotografie v rozptýleném světle, dole UV fluorescence. Zdroj: Jiří Lauterkranc
- Obr. 15 - Herrschelova metoda měření teploty rozložených paprsků viditelného spektra pomocí skleněného hranolu. Zdroj:
- Obr. 16,17 - Hubert a Jan Van Eyck, detail z Ghentského oltáře, vlevo fotografie v rozptýleném světle, vpravo infračervený reflektogram. Zdroj: Closer to Van Eyck: Rediscovering the Ghent Altarpiece. Top of page: The Adoration of the Mystic Lamb (The Ghent Altarpiece), Hubert and Jan van Eyck. Image courtesy Cathedral of Saint Bavo © Lukas - Art in Flanders
- Obr. 18 - První zachycený rentgenový snímek zobrazuje ruku s prstenem Anny Röntgen.
- Obr. 19 - Obrázek představuje schéma se zdrojem rentgenového záření (rentgenka), měřeným vzorkem

(uprostřed), který záření absorbuje a detekční plochou.

Toto schéma vysvětluje způsob vzniku radiografického obrazu v závislosti na mocnosti a hustotě zkoumaného obrazu. Zdroj: InsightArt

- Obr. 20 - Rentgenový snímek dřevěné polychromované plastiky z 18. století.
- Obr. 21 - Tabulka aplikovaných průzkumných metod užívaných k analýze uměleckých děl.
- Obr. 22,23 - Charakteristické RTG záření vzniká při srážce letícího elektronu a elektronu z elektronového obalu atomu. Původní elektron je vyražen ven z atomu s nižší rychlostí. Vznikne "díra", která je ale následně zaplněna elektronem z jedné z hladin vzdálenějších od jádra. Při tomto přeskočení se uvolní značné množství energie ve formě fotonu RTG záření. Energie záření je rovna energetickému rozdílu mezi elektronovými hladinami, mezi kterými došlo k přeskočení elektronu. Zdroj: <http://www.rtg.fbmi.cvut.cz/>
- Obr. 24 - Schéma rentgenové trubice s pevnou anodou. Zdroj: <http://www.rtg.fbmi.cvut.cz/>
- Obr. 25 - Princip fotochemické reakce AgBr emulze. Zdroj: <http://canov.jergym.cz/barva/a/f.html>
- Obr. 26 - Rozdíl mezi záznamem rentgenového záření na klasický fotocitlivý materiál (A) a detektorem integrujícím náboj (B). Zdroj: http://www.symma.cz/jarni16/sbornik/prezentace/02_bouskova.pdf
- Obr. 27 - K-edge reprezentuje náhlý nárůst absorpce rentgenového záření pro charakteristické energie jednotlivých prvků. Zdroj: Josef Uher, InsightArt, 2018
- Obr. 28 - Schématické zobrazení synchrotronu. Zdroj: <http://archive.synchrotron.org.au/synchrotron-science/what-is-a-synchrotron>
- Obr. 29 - Detektor Medipix1. Zdroj: <https://medipix.web.cern.ch/medipix/index.php>
- Obr. 30 - Detektor Medipix2. Zdroj: <https://medipix.web.cern.ch/medipix/index.php>
- Obr. 31 - Schématické řešení pixelového detektoru. Zdroj: <https://medipix.web.cern.ch/medipix/index.php>
- Obr. 32 - Velkoformátový detektor Widepix 10x10. Zdroj: <http://www.widepix.cz>, <http://www.advacam.com/en/>
- Obr. 33 - Detektor Widepix 1x5. Zdroj: <http://www.widepix.cz>, <http://www.advacam.com/en/>
- Obr. 34,35 - Ukázka počítačové analýzy plátěné podložky malby s využitím RTG snímku. Zdroj: <https://www.ece.rice.edu/~dhj/Workshop/>
- Obr. 36 - Energetické zobrazení distribuce pigmentů v malbě. Zdroj: InsightArt
- Obr. 37 - Zobrazení degradace vrstvy obrazu, rozvržení a úroveň krakeláže, různé mechanické stopy a autorské i druhotné opravy a přemalby. Zdroj: InsightArt
- Obr. 38 - Porovnání radiografických snímků, nahoře RTG snímek naměřený s pomocí nepřímé digitalizace na fotografickou fólii, dole mikroradiografie ve vysokém rozlišení s využitím detektoru Widepix. Zdroj: InsightArt a ÚTEF
- Obr. 39 - Rozlišení 150µm vs. 50µm. Zdroj: InsightArt

- Obr. 40 - Malý vs. velký dynamický rozsah. Zdroj: InsightArt
- Obr. 41 - Vysoký šum vs. nízký šum. Zdroj: InsightArt
- Obr. 42 - Z porovnání černobílé a barevné fotografie skleněné vitráže je velmi dobře patrné, jak významný objem informací zprostředkovává lidskému vnímání zobrazení na úrovni spektra RGB. Podobným způsobem se rozšiřují naše rozeznávací schopnosti s využitím barevně / energeticky citlivé RTG radiografie. Zdroj: Josef Uher- InsightArt
- Obr. 43,44,45 - Fotografie kopie obrazu Edvarda Muncha *Na mostě* (vlevo nahoře), černobílý RTG snímek odhaluje malbu krajiny ukrytou pod svrchním obrazem (vlevo dole) a na barevném RTG snímku (vpravo nahoře) můžeme vidět distribuci jednotlivých pigmentů v odhalené malbě. Zdroj: InsightArt
- Obr. 46 - La Crau s pohledem na Montmajour- fotografie v rozptýleném světle. Zdroj: Jiří Lauterkranc
- Obr. 47 - La Crau s pohledem na Montmajour- HRXR. Zdroj: InsightArt
- Obr. 48 - La Crau s pohledem na Montmajour- MRXR. Zdroj: InsightArt
- Obr. 49 - La Crau s pohledem na Montmajour- zobrazení primární malby pomocí nástroje multispektrálního zobrazování v MRXR. Zdroj: InsightArt
- Obr. 50 - La Crau s pohledem na Montmajour- využití spektrálního zobrazování pro vizualizaci původní malby. Zdroj: InsightArt
- Obr. 51 - La Crau s pohledem na Montmajour- MRXR- vizualizace pigmentů s dominancí zinku, chromu a kadmia. Zdroj: InsightArt
- Obr. 51a - La Crau s pohledem na Montmajour- MRXR- vizualizace pigmentů s dominancí olova. Zdroj: InsightArt
- Obr. 52 - Ilustrační foto - *Big Data*. Zdroj: Insane Lab
- Obr. 53 - Systém učení Neuronových sítí k rozpoznávání materiálů. Zdroj: Josef Uher- InsightArt
- Obr. 54 - Soubor různých metalických plíšků naskenovaných pomocí MRXR a definovaných pomocí neuronových sítí. Zdroj: Josef Uher- InsightArt
- Obr. 55 - První prototyp modulární skenovací aparatury instalovaný v RTG místnosti na AVU. Zdroj: InsightArt, 2016
- Obr. 56 - Modulární skenovací systém RToo 2D. Zdroj: InsightArt, foto: Rudy Kovář, 2018
- Obr. 57 - Ovládací software Pixelman. Zdroj: <http://aladdin.utef.cvut.cz/ofat/others/Pixelman/Pixelman.html>
- Obr. 58 - Rentgenka Oxford Instruments Apogee. Zdroj: <https://xray.oxinst.com/products/x-ray-tubes/apogee-5500-series-radiation-shielded-x-ray-tube>
- Obr. 59 - Detektor WidePix 2(1)x5. Zdroj: Advacam
- Obr. 60 - Chladič detektoru 1-Cube- Colourtube
- Obr. 61 - RToo Shielded Box- Interlock. Zdroj: InsightArt, 2018
- Obr. 62 - RToo 3D robotický systém. Zdroj: InsightArt, foto: Rudy Kovář, 2018
- Obr. 64 - RToo 3D umožňuje tomografické skenování archeologických nálezů a předmětů užitého umění. Zdroj: InsightArt, foto: Rudy Kovář, 2018
- Obr. 65 - Nástroj pro virtuální realitu umožní zcela nové možnosti inspekce vnitřní struktury zkoumaného díla. Ilustrační foto. Zdroj: <https://www.eschoolnews.com/2018/07/17/virtual-reality-research-remember/>
- Obr. 66 - Technické řešení ochranného stíněného boxu se systémem RToo 2D uvnitř. Zdroj: InsightArt
- Obr. 67 - Pracovní plocha softwarového nástroje RadalyX Studio.
- Obr. 68-71 - příprava nosičů pro testovací vzorky.
- Obr. 72 - výsledná databáze testovacích vzorků.
- Obr. 73 - výsledná databáze testovacích vzorků. Obr. 74- Kontrolní měření prvkového složení kalibračních vzorků pomocí XRF.
- Obr. 75 - Referenční škála testovacích vzorků na plátěné podložce. Zdroj: InsightArt
- Obr. 76 - Výsledný snímek-1 kalibračního měření testovacích vzorků pigmentů na plátěné podložce. Zdroj: InsightArt
- Obr. 77 - Výsledný snímek-2 kalibračního měření testovacích vzorků pigmentů na plátěné podložce. Zdroj: InsightAr
- Obr. 78,79 - Testovací škála kalibračních plíšků. Nahoře zobrazení pomocí HRXR a dole snímek naměřený pomocí MRXR s patrnou diferenciací jednotlivých kovů. Zdroj: InsightArt
- Obr. 80 - Horký letní večer v lese
- Obr. 81 - Rtg transmisní mikroradiografie HRXR- Horký letní večer v lese. Zdroj: ÚTEF a Centrum EXCELENCE v Telči
- Obr. 82 - Ilustrační zobrazení aplikovaných průzkumných metod.
- Obr. 83,84 - Skenovací aparatura v centru EXCELENCE v Telči- Průběh měření obrazu.
- Obr. 85 - Výsledný radiografický snímek ve vysokém rozlišení 25 000 x 20 000 pixelů- 500 megapixelů. Zdroj: ÚTEF
- Obr. 86 - Komparace RTG snímku pořízeného na fotocitlivý materiál a radiografie HRXR.
- Obr. 87 - Zobrazení jednotlivých úseků malby pomocí materiálově citlivé radiografie MRXR.
- Obr. 88 - Vybrané detaily malby zobrazené pomocí materiálově citlivé radiografie MRXR. Zdroj: ÚTEF
- Obr. 89 - La Crau s pohledem na Montmajour.
- Obr. 90 - Harvest at La Crau with Montmajour in the Background. Zdroj: <https://www.wikiart.org>
- Obr. 91 - Analýza MRXR se zákresem ženské figury ve spodní vrstvě malby. Zdroj: InsightArt
- Obr. 92 - UV luminiscence zadní strany díla odhaluje zřetelně původní malbu ženského aktu. V rozptýleném denním světle není figura vůbec viditelná.
- Obr. 93 - Vincent van Gogh- studie ženského aktu ze zadu. Zdroj: <https://www.wikiart.org>
- Obr. 94 - Separace jednotlivých energetických / materiálových kanálů v ploše malby. Zdroj: InsightArt
- Obr. 95 - Separace jednotlivých energetických / materiálových kanálů v ploše malby. Zdroj: InsightArt
- Obr. 96 - HRXR snímek zobrazující veškeré naměřené energie. Zdroj: InsightArt
- Obr. 97 - Výsledný snímek MRXR odhalující původní malbu ženského aktu díky filtraci jednotlivých

- energetických kanálů. Tento unikátní radiografický obraz zobrazuje veškeré detaily původní malby, čímž umožňuje dokonalou komparaci malířského stylu autora. Zdroj: InsightArt
- Obr. 98 - La Crau s pohledem na Montmajour- rozvržení budov v krajině.
 - Obr. 99 - Harvest at La Crau with Montmajour in the Background- rozvržení budov v krajině. Obr. 1.10- Portrét muže v klobouku- kombinace fotografie a radiografie HRXR znázorňující autorskou změnu v malbě klobouku. Zdroj: InsightArt
 - Obr. 100 - Studie k obrazu Harvest at La Crau with Montmajour in the Background- rozvržení budov v krajině. Zdroj: <https://www.wikiart.org>
 - Obr. 101 - Rozvržení stavení na planině La Crau na dobové mapě.
 - Obr. 102 - Signatura obrazu Harvest at La Crau with Montmajour in the Background.
 - Obr. 103 - Signatura obrazu La Crau s pohledem na Montmajour.
 - Obr. 104 - Signatura obrazu Harvest at La Crau with Montmajour in the Background.
 - Obr. 105 - Signatura obrazu La Crau s pohledem na Montmajour.
 - Obr. 106 - Díky použití materiálově citlivé radiografie (d) rozeznáváme jednotlivé pigmenty, a dokážeme tak určit, které struktury jsou součástí původní malby ženského aktu. Zdroj: LAUTERKRANC, Jiří. La Crau with a View of Montmajour, *Technological and Historical Restoration Research of the Painting*. 2015-2017. RTG snímky: Centrum EXCELENCE a ÚTEF
 - Obr. 107 - Díky použití materiálově citlivé radiografie (d) rozeznáváme jednotlivé pigmenty, a dokážeme tak určit, které struktury jsou součástí původní malby ženského aktu. Zdroj: LAUTERKRANC, Jiří. La Crau with a View of Montmajour, *Technological and Historical Restoration Research of the Painting*. 2015-2017. RTG snímky: Centrum EXCELENCE a ÚTEF
 - Obr. 108 - Mont Majour- MRXR
 - Obr. 109 - Portrét muže v klobouku- fotografie v rozptýleném světle.
 - Obr. 110 - Portrét muže v klobouku- kombinace fotografie a radiografie HRXR znázorňující autorskou změnu v malbě klobouku. Zdroj: InsightArt
 - Obr. 111 nahoře a 112 dole- Porovnání kvality neměřených radiogramů. Nahoře je snímek provedený na klasickou fotografickou fólii, dole radiografie ve vysokém rozlišení s detektorem Widepix. Zdroj: AVU a InsightArt
 - Obr. 113, 114, 115 - Zdroj: InsightArt
 - Obr. 116 - Madona s Ježíškem, fotografie v rozptýleném světle před restaurováním.
 - Obr. 117 - Radiografie ve vysokém rozlišení pomohla přesně lokalizovat místa destrukce vrstvy malby a dřevěné nosné desky, díky tomu bylo možné šetrně odstranit nevhodné výplně a přemalby bez rizika dalšího poškození originální malby. Zdroj: InsightArt
 - Obr. 118, 119, 120 - Přesná detekce poškození malby pomocí HRXR. Zdroj: InsightArt
 - Obr. 121 - Detail Poškození malby v průběhu restaurování.
 - Obr. 122 - Průběh snímání lakových vrstev, nepůvodních přemaleb a nevhodných tmelů.
 - Obr. 123 - Dílo po ukončení restaurátorských prací.
 - Obr. 124 - Madona s Ježíškem- detail materiálově citlivé mikroradiografie. Zdroj: InsightArt
 - Obr. 125 - Madona s Ježíškem- detail materiálově citlivé mikroradiografie s vysokým kontrastem energií. Zdroj: InsightArt
 - Obr. 126 - Madona s Ježíškem- detail materiálově citlivé mikroradiografie s vysokým kontrastem energií. Zdroj: InsightArt
 - Obr. 127 - Madona s Ježíškem- detail materiálově citlivé mikroradiografie. Zdroj: Insignie
 - Obr. 128-131 — Zobrazení kvality zvětšení snímků z HRXR. Zdroj: ÚTEF
 - Obr. 132 - HRXR- detail malby. Zdroj: ÚTEF
 - Obr. 133 - MRXR- detail malby. Zdroj: ÚTEF