Testování materiálů 3D tisku pro restaurování sochařských děl

Šárka Vyhnánková

Univerzita Pardubice

Klíčová slova:

3D tisk, fotogrammetrie, restaurování, polychromovaná socha, PETG, doplněk, materiálový výzkum, etika

Keywords:

3D printing, photogrammetry, conservation, polychrome sculpture, PETG, reconstruction, material research, ethics

Téma využití aditivních technologií v oblasti památkové péče a restaurování je stále relativně nové a metodicky neukotvené. Zatímco 3D dokumentace kulturního dědictví pomocí fotogrammetrie a laserového skenování se již stala běžnou součástí konzervátorské praxe (REMONDINO 2011; SCOPIGNO et al. 2017), samotný 3D tisk zatím proniká do oboru spíše okrajově – formou edukačních replik, negativních forem nebo ochranných obalových struktur (SÁ et al. 2012, SÁNCHEZ-BELENGUER et al. 2015; BALLETTI et al. 2017). Použití aditivních technologií pro fyzickou integraci chybějících částí originálních objektů však představuje kvalitativně odlišnou úroveň intervence, která vyžaduje nové metodické rámce a interdisciplinární přístup.

Hlavními tématy, která s tímto vývojem souvisejí, jsou: (1) materiálová kompatibilita tiskových filamentů s historickými substráty, (2) dlouhodobá chemická stabilita polymerů v prostředí muzejní expozice, a (3) etická přijatelnost 3D tisku jako prostředku doplnění, při zachování zásad reverzibility a rozlišitelnosti (VYHNÁNKOVÁ 2025b). V posledním desetiletí se výrazně rozšířil počet výzkumných institucí, které se věnují testování filamentů z 3D tisku ve vztahu k restaurování a ochraně kulturního dědictví. Mezi hlavní patří např. Fraunhofer IFAM, BAM Berlin, Technická univerzita ve Valencii, Univerzita Ca' Foscari v Benátkách, Turínská univerzita, Univerzita aplikovaných věd v Berlíně nebo Univerzita v Sieně. V Evropě i mimo ni vznikla řada případových studií zaměřených na testování chemické stálosti, emisí těkavých látek či mechanických vlastností polymerů ve vztahu k různým substrátům (kámen, keramika, kov, sádra aj.), viz např. GREGGIO 2018, AURA-CASTRO 2021, HEJNA et al. 2024, BARBIERI 2022, VYHNÁNKOVÁ 2023.

Tento příspěvek přímo navazuje na autorčinu diplomovou práci z Fakulty restaurování Univerzity Pardubice (VYHNÁNKOVÁ 2025a), která se věnovala testování čtyř filamentů (PLA, PETG, ABS, PMMA) z hlediska jejich chemické kompatibility se sádrou a jejich využití v praxi. Paralelně vznikala i druhá diplomová práce zaměřená na etické aspekty použití 3D technologií v památkové péči a restaurování sochařských děl, obhájená na die Angewandte ve Vídni (VYHNÁNKOVÁ 2025b). Obě práce spolu tematicky souvisejí a poskytují metodologický i etický rámec pro zodpovědnou aplikaci digitálních metod v konzervaci kulturního dědictví.

Prezentovaná případová studie vznikla v rámci restaurování sádrového modelu *Touha* od Stanislava Suchardy, vytvořeného v rámci příprav na realizaci pomníku Františka Palackého v Praze (VYHNÁNKOVÁ 2023). Model, dochovaný v původní povrchové úpravě, vykazoval rozsáhlé poškození v dolní části těla – chyběly obě nohy od oblasti lýtek (Obr. 1). Díky dochovanému bronzovému odlitku ve veřejném prostoru bylo možné přistoupit k tzv. analogické rekonstrukci pomocí fotogrammetrie a následného 3D tisku doplňku, který byl adaptován na menší měřítko originálu.

Fotogrammetrické snímkování proběhlo přímo na bronzové verzi in situ, s důrazem na zajištění difuzního světla a eliminaci reflexních odlesků. Pro tvorbu modelu byl využit software Agisoft Metashape, následné opravy a retopologie byly provedeny v prostředí ZBrush (Obr. 2, Obr. 3). Konečný model byl exportován ve formátu STL a následně upraven v prostředí tiskového softwaru PrusaSlicer. Doplněk byl vytisknut na tiskárně Original Prusa i3 MK3S+ (Obr. 4).

Paralelně s touto případovou studií vznikala rešerše a metodický návrh navazujícího výzkumu, zaměřeného na hodnocení fyzikálně-chemických vlastností filamentových materiálů pro restaurování. Byly vytipovány čtyři běžně dostupné termoplasty (PLA, ABS, PETG a PMMA), které měly být v dalším kroku testovány v kombinaci se sádrovým podkladem. Příprava metodiky zahrnovala návrh Oddyho testu, FTIR spektroskopie, plynové chromatografie (GC-MS), UV stárnutí, kolorimetrického měření a sandwich testu. Tyto experimenty však v době prezentace příspěvku ještě nebyly zahájeny – nacházely se ve fázi návrhu a přípravného pilotního testování.

Vzhledem k tomu, že laboratorní testování filamentových materiálů v době prezentace příspěvku ještě neproběhlo, nelze uvádět konkrétní výsledky fyzikálně-chemických analýz. Praktická část případové studie nicméně ukázala, že filament PETG je tiskově stabilní, vizuálně přiměřený a snadno zpracovatelný pro tvorbu doplňků, aniž by vyžadoval přímý kontakt s originálem během modelace. Jeho výběr byl založen na rešerši dostupné literatury a předchozí zkušenosti s tiskem funkčních dílů (Obr. 6).

Aplikovaný doplněk byl k modelu připojen bez mechanického kotvení, pomocí reverzibilního spojovacího systému na neodymové magnety (Obr. 5). Vizuální integrita díla zůstala respektována, přičemž zásah byl navržen jako dočasný a snadno oddělitelný.

Případová studie ilustruje možnosti využití digitálních technologií v restaurování, aniž by docházelo k zásahu do původní materie díla. Klíčovým přínosem metody je především bezkontaktní přenos tvarových dat, jejich následná modifikace a možnost přesného doplnění fragmentů bez fyzického zásahu do historického originálu. Digitální charakter zásahu navíc umožňuje detailní dokumentaci celého procesu, jeho opakovatelnost a případnou budoucí revizi.

Přesto zůstává otázka etické přijatelnosti takového doplnění otevřená. Zatímco estetická čitelnost díla může být doplňkem posílena, riziko „přepisování“ autenticity stále existuje. Rozhodující je kontext: míra ztráty, dostupnost analogií a úroveň dokumentace. V daném případě byly zohledněny zásady reverzibility a rozlišitelnosti, a zásah byl chápán jako funkční, nikoli imitativní. Budoucí výzkum by měl tuto praxi ukotvit pomocí standardizovaných kritérií a mezioborového dialogu.

Je však třeba upozornit na omezení: stabilita polymerních filamentů nebyla dosud testována v dlouhodobém horizontu (desítky let) a zatím chybí i standardizace jejich použití ve specifických typech prostředí (např. vysoká vlhkost, proměnlivé teploty, přímé sluneční záření). Současné poznatky je proto nutné chápat jako základ pro další výzkum a praxi, nikoli jako univerzální řešení.

Zároveň je třeba mít na paměti, že i dobře míněný zásah může ve výsledku přehlušit fragmentárnost díla, zejména pokud není doplněk jednoznačně identifikovatelný. Právě 3D tisk – ač technologicky neutrální – v sobě nese riziko příliš „čistého“ a dokonalého zásahu, který může působit dominantně vůči poškozenému originálu. Rozhodnutí o jeho použití proto musí být vždy výsledkem mezioborové úvahy, nikoli pouze technologické dostupnosti (VYHNÁNKOVÁ 2025b).

Představená případová studie ukazuje, že 3D tisk může být za určitých okolností využit jako efektivní doplňkový nástroj při restaurování sochařských děl. Přínos spočívá zejména v možnosti bezkontaktního získání a úpravy tvarových dat a ve schopnosti vytvářet přesné, kontrolovatelné a potenciálně reverzibilní zásahy. V daném případě byl použit filament PETG, jehož výběr se opíral o rešerši technických parametrů a praktickou zkušenost z konzervátorské praxe.

Zásah byl navržen s ohledem na základní principy oboru – tedy s důrazem na rozlišitelnost, minimální invazivnost a s možností snadného odstranění doplňku v budoucnu. Digitální metody přitom umožnily transparentní dokumentaci celého procesu, včetně archivace podkladových dat a kontrolovatelného rozhodovacího postupu. Výsledky této práce tak nepředstavují univerzální metodický návod, ale příklad aplikace 3D tisku ve specifickém kontextu fragmentárního díla s dobře doloženou analogií.

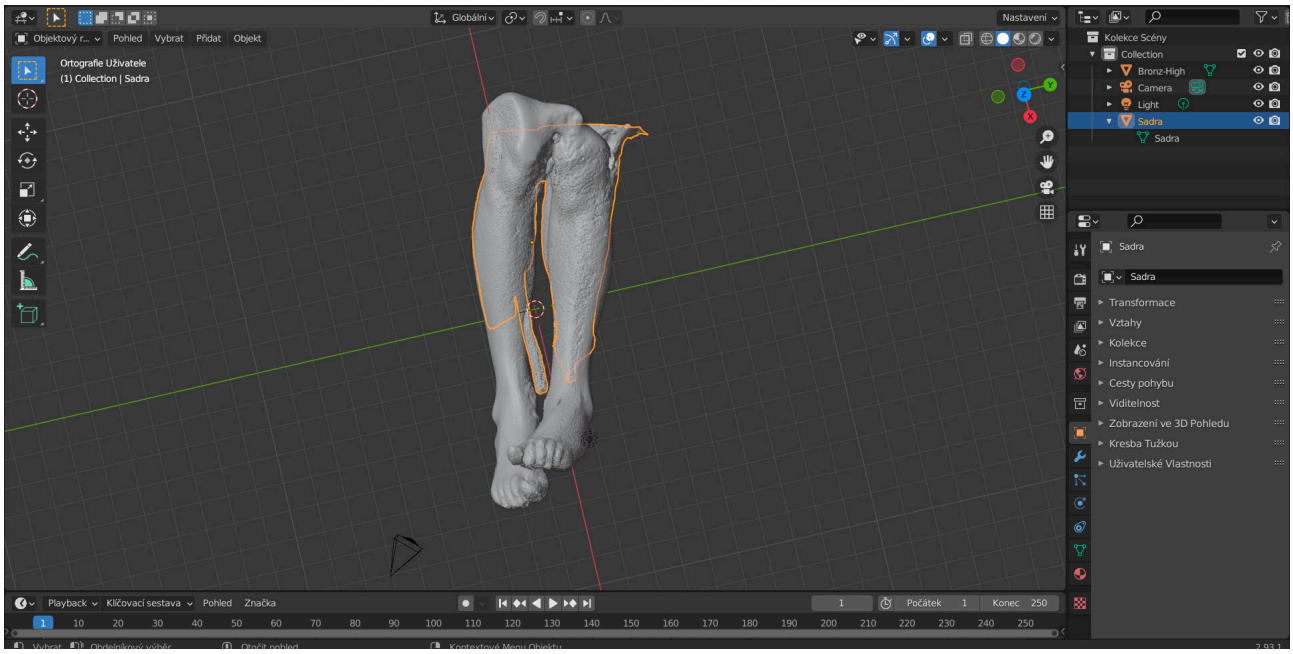
V době konání konference byl započat navazující materiálový výzkum, jehož cílem je ověřit chemickou a fyzikální kompatibilitu filamentových materiálů s vybranými historickými substráty. Výsledky tohoto výzkumu v budoucnu umožní formulovat fundovaná doporučení pro jejich aplikaci v památkové péči. Zároveň bude možné lépe posoudit vhodnost jednotlivých filamentů nejen podle vizuálního dojmu či technických listů výrobce, ale na základě systematických testů a mezioborové spolupráce.

Tento výzkumný směr ukazuje širší potřebu tvorby otevřených databází a metodických rámců, které by napomohly zpřehlednění současného využívání aditivních technologií v restaurování. Je nezbytné podpořit vznik sdílených znalostních platforem, kde budou zastoupeni nejen restaurátoři, ale také chemici, technologové, výrobci filamentů a kurátoři. Teprve tak může být budoucí použití 3D tisku v památkové péči skutečně odpovědné, udržitelné a eticky zakotvené.

Příspěvek vznikl jako součást bakalářské a magisterské práce autorky realizované na Fakultě restaurování Univerzity Pardubice v letech 2023–2025 pod vedením doc. Jakuba Ďoubala, Ph.D. a ve spolupráci s Ing. Karolem Bayerem.

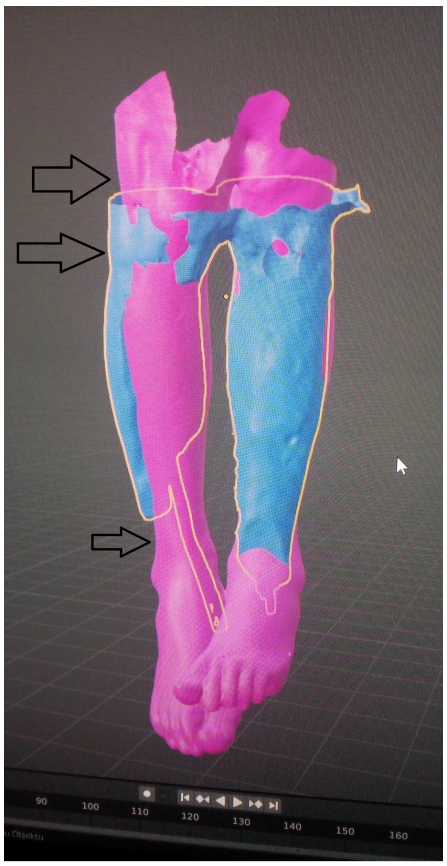


Obr. 1 *Sádrový model Touha před restaurováním - dokumentace rozsahu poškození v oblasti dolních končetin*



Obr. 2 *Digitální model bronzového originálu pomníku Františka Palackého vytvořený metodou fotogrammetrie, zpracováno v softwaru Blender. Autor modelu: Vojtěch Krajíček*

ISSN 1805-1944 (Online), 2695-1622 (Print), article DOI 10.46585/em.2024.1-2.2772



Obr. 3 *Digitální modelace a přizpůsobení měřítka v prostředí ZBrush. Dokumentace pracovní plochy: Jan Zigáček*



Obr. 4 *Finální výtisk doplňku z materiálu PETG a jeho instalace pomocí reverzibilního systému s neodymovými magnety, tisková teplota: 235 °C*



Obr. 5 *Stav sádrového modelu Touha po tmelení (vlevo) a po restaurování (vpravo), na levém snímku je zachycen model po instalaci na podpůrnou konstrukci, doplnění chybějící hmoty a před retuší. Pravý snímek ukazuje finální stav po dokončení restaurátorského zásahu*

Zdroje:

AURA-CASTRO et al. 2021
Elvira Aura-Castro et al., Automatic production of tailored packaging for fragile archaeological artifacts, *Journal on Computing and Cultural Heritage* 14, 2021, s. 1–15. https://doi.org/10.1145/3422340

BALETTI – BALLARIN – GUERRA 2017
Caterina Baletti – Martina Ballarin – Francesco Guerra, 3D printing: State of the art and future perspectives, *Journal of Cultural Heritage* 26, 2017, s. 172–182. DOI: 10.1016/j.culher.2017.02.010

BARBIERI – FUOCO – BRUNO – MUZZUPAPPA 2022
Loris Barbieri – Fabrizio Fuoco – Fabio Bruno – Maurizio Muzzupappa, Exhibit supports for sandstone artifacts designed through topology optimization and additive manufacturing techniques, *Journal of Cultural Heritage* 55, 2022, s. 329–338. DOI: 10.1016/j.culher.2022.04.008

GREGGIO 2018
Irene Greggio, *La stampa 3D nei Beni Culturali Analisi e caratterizzazione di materiali per la fabbricazione digitale di Beni Culturali* (diplomová práce), Università Ca' Foscari, Venezia 2018.

HEJNA et al. 2024
Aleksander Hejna – Mariusz Marć – Paweł Szymański – Kamila Mizera – Mateusz Barczewski, Analysis of emission of volatile organic compounds and thermal degradation in investment casting using fused deposition modeling (FDM) and three-dimensional printing (3DP) made of various thermoplastic polymers, *Environmental Science and Pollution Research* 31, 2024, s. 60371–60388. DOI: 10.1007/s11356-024-35200-x

SÁ et al. 2012
Asla M. Sá – Karina Rodriguez Echavarria – Martin Griffin – Derek Covill – Jaime Kaminski – David Arnold, Parametric 3D-fitted frames for packaging heritage artefacts, in: V*AST: International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*, 2012, s. 105–112. DOI: 10.2312/VAST/VAST12/105-112

SÁNCHEZ-BELENGUER et al. 2015
Carlos Sánchez-Belenguer – Eduardo Vendrell-Vidal – Miguel Sánchez-López – Carmen Díaz-Marín – Elvira Aura-Castr, Automatic production of tailored packaging for fragile archaeological artifacts, *Journal on Computing and Cultural Heritage* 8, art. no. 17, 2015. https://doi.org/10.1145/2716324

SCOPIGNO – CIGNONI – PIETRONI – CALLIERI – DELLEPIANE 2017
Roberto Scopigno – Paolo Cignoni – Nico Pietroni – Marco Callieri – Matteo Dellepiane, Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey, *Computer Graphics Forum* 36, 2017 s. 6–21. https://doi.org/10.1111/cgf.12781

VYHNÁNKOVÁ 2023
Šárka Vyhnánková, *Restaurování sádrového modelu Touha k pomníku Františka Palackého v Praze od Stanislava Suchardy* (bakalářská práce), Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice, Litomyšl 2023.

ĎOUBAL – VYHNÁNKOVÁ – REJMAN 2024
Jakub Ďoubal – Šárka Vyhnánková – Petr Rejman, Využití možností fotogrammetrie a 3D tisku při restaurování sádrového modelu, *Journal of American Institute for Conservation*, v tisku.

VYHNÁNKOVÁ 2025a
Šárka Vyhnánková, *Suitability Of Selected 3D Printing Materials For Conservation Purposes Using FDM Technology* (diplomová práce), Fakulta restaurování, Univerzita Pardubice, Litomyšl 2025.

VYHNÁNKOVÁ 2025b
Šárka Vyhnánková, *Ethical Aspects of 3D Technologies in Sculpture Conservation and Cultural Heritage* (diplomová práce), University of Applied Arts, Vienna 2025.