

ARCHEOLOGICKÝ ÚSTAV AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY V BRNĚ

PŘEHLED VÝZKUMŮ

60-2



Brno 2019

ARCHEOLOGICKÝ ÚSTAV AKADEMIE VĚD ČESKÉ REPUBLIKY V BRNĚ

PŘEHLED VÝZKUMŮ

60-2



100 Státní archeologický ústav 100 let moderní archeologie v českých zemích

BRNO 2019

PŘEHLED VÝZKUMŮ

Recenzovaný časopis
Peer-reviewed journal

Ročník 60
Volume 60

Číslo 2
Issue 2

Předseda redakční rady
Head of editorial board

Lumír Poláček

Redakční rada
Editorial board

Herwig Friesinger, Václav Furmánek, Janusz K. Kozłowski,
Alexander Ruttikay, Jiří A. Svoboda, Jaroslav Tejral, Ladislav Veliačik

Odpovědný redaktor
Editor in chief

Rudolf Procházka, Petr Škrdla

Výkonná redakce
Assistant Editors

Hedvika Břínková, Zdenka Kosarová, Šárka Krupičková, Olga Lečbychová,
Zuzana Loskotová, Ladislav Nejman, Zdeňka Pavková, Rudolf Procházka,
Stanislav Stuchlík, Lubomír Šebela, Šimon Ungerman

Technická redakce, sazba
Executive Editors, Typography

Azu design, s. r. o.

Software
Software

Adobe InDesign CC

Fotografie na obálce
Cover Photography

Litovel, Masarykova ulice. Keramická plastika koníčka (obr. 67, str. 282).
Litovel, Masarykova Street. Ceramic sculpture of a horse (Fig. 67, Pg. 282).

Adresa redakce
Address

Archeologický ústav AV ČR, Brno, v. v. i.
Čechyňská 363/19
602 00 Brno
IČ: 68081758
E-mail: pv@arub.cz
Internet: <http://www.arub.cz/prehled-vyzkumu.html>

Tisk
Print

Azu design, s. r. o.
Bayerova 805/40
602 00 Brno

ISSN 1211-7250 (Print)
ISSN 2571-0605 (Online)
MK ČR E 18648
Vychází dvakrát ročně
Vydáno v Brně roku 2019
Náklad 400 ks

Časopis je uveden na Seznamu neimpaktovaných recenzovaných periodik vydávaných v ČR.
Časopis je uveden v citační databázi SCOPUS a na seznamu vědeckých časopisů ERIH PLUS.
Copyright ©2019 Archeologický ústav AV ČR, Brno, v. v. i., and the authors.

Obsah

Studie a krátké články Case Studies and Short Articles Studien und kurze Artikel	7
<i>Balázs Komoróczy, Marek Vlach, Michaela Zelíková, Jozef Sedláček, Pavla Růžičková</i> Revize stavu archeologických komponent v trati Drnholec „Holenická pole“ pomocí prospekčních a málo invazivních výzkumných metod	9
<i>Šárka Krupičková, Estelle Ottenwelter, Helena Březinová</i> Exact evidences of the use of spherical buttons (gombíky): two case studies from Moravian finds	57
<i>Michaela Látková, Mária Hajnalová, Miroslav Havlík</i> Grape vine and viticulture tradition in Mikulčice	79
<i>Pavel Kouřil, Jana Gryc</i> Czech Silesia in the Early Middle Ages	93
<i>Aleksandra Pankiewicz</i> An attempt to identify places associated with trade and exchange in early medieval strongholds in the example of Ostrów Tumski in Wrocław	145
<i>Pavel Šlězár, Karel Faltýnek</i> Románský kostel sv. Prokopa v Lošticích. Příspěvek k počátkům moravské šlechty	161
<i>Jiří Šindelář, Lumír Poláček, Šárka Krupičková</i> Doporučená metodika fotodokumentace v archeologii pro následné metrické analýzy obrazu	201
Přehled výzkumů na Moravě a ve Slezsku 2018 Overview of Excavations in Moravia and Silesia 2018 Übersicht den Grabungen in Mähren und Schlesien 2018	225
Středověk a novověk, Middle Ages and Modern Times, Mittelalter und Neuzeit	
Adamov (okr. Blansko)	227
Bítov (okr. Znojmo)	227
Blansko (k. ú. Hořice u Blanska, okr. Blansko)	228
Blučina (okr. Brno-venkov)	230
Brno (okr. Brno-město)	230
Brno (k. ú. Město Brno, okr. Brno-město)	231
Brno (k. ú. Staré Brno, okr. Brno-město)	238
Brno (k. ú. Štýřice, okr. Brno-město)	241
Brno (k. ú. Trnitá, okr. Brno-město)	241
Brno (k. ú. Líšeň, okr. Brno-město)	249
Brno (k. ú. Maloměřice, okr. Brno-město)	250
Brno (k. ú. Trnitá, okr. Brno-město)	251
Brno (k. ú. Útěchov u Brna, okr. Brno-město)	254
Brtnice (okr. Jihlava)	255
Brumovice (okr. Břeclav)	255
Břest (okr. Kroměříž)	255
Březina (k. ú. Březina u Křtin, okr. Brno-venkov)	256
Březolupy (okr. Uherské Hradiště)	256
Bučovice (okr. Vyškov)	257

Bystřice pod Hostýnem (okr. Kroměříž)	258
Dobroslavice (okr. Opava)	258
Dolní Bečva (okr. Vsetín)	259
Drnholec (okr. Břeclav)	259
Drnholec (okr. Břeclav)	260
Dukovany (okr. Třebíč)	260
Hluboké Dvory (okr. Brno-venkov)	261
Hlučín (okr. Opava)	261
Hoštejn (okr. Šumperk)	262
Hradec nad Moravicí (okr. Opava)	264
Hustopeče (k. ú. Hustopeče u Brna, okr. Břeclav)	265
Chotěbuz (okr. Karviná)	265
Ivančice (okr. Brno-venkov)	266
Ivančice (okr. Brno-venkov)	266
Jamolice (okr. Znojmo)	267
Jedovnice (okr. Blansko)	269
Jihlava (okr. Jihlava)	269
Jimramov (okres Žďár nad Sázavou)	273
Jiříkov (k. ú. Sovinec, okr. Bruntál)	274
Klentnice (okr. Břeclav)	277
Kralice na Hané (okr. Prostějov)	277
Kralice nad Oslavou (okr. Třebíč)	277
Krnov (k. ú. Krnov-Horní Předměstí, okr. Bruntál)	277
Kuřim (okr. Brno-venkov)	279
Kyjovice (k. ú. Kyjovice ve Slezsku, okr. Opava)	279
Lažánky (okr. Brno-venkov)	280
Lichnov (k. ú. Lichnov u Bruntálu, okr. Bruntál)	281
Litovel (okr. Olomouc)	281
Loštice (okr. Šumperk)	282
Loučka (k. ú. Loučka u Valašského Meziříčí, okr. Vsetín)	283
Lysice (okr. Blansko)	284
Mikulčice (okr. Hodonín)	284
Mohelno (okr. Třebíč)	286
Mokrá-Horákov (k. ú. Mokrá u Brna, okr. Brno-venkov)	287
Mokrá-Horákov (k. ú. Horákov, okr. Brno-venkov)	287
Nový Šaldorf-Sedlešovice (k. ú. Sedlešovice, okr. Znojmo)	288
Olomouc (k. ú. Olomouc-město, okr. Olomouc)	289
Olomouc (k. ú. Olomouc-město, okr. Olomouc)	289
Olšany u Prostějova (okr. Prostějov)	293
Opava (k. ú. Kateřinky u Opavy, okr. Opava)	294
Ořechov (okr. Brno-venkov)	294
Oskava (k. ú. Bedřichov u Oskavy, okr. Šumperk)	295
Oslavany (okr. Brno-venkov)	295
Ostrava (k. ú. Moravská Ostrava, okr. Ostrava-město)	296
Ostrava (k. ú. Nová Ves u Ostravy, okr. Ostrava-město)	297
Prostějov (okr. Prostějov)	298
Prostějov (okr. Prostějov)	298
Rajhrad (okr. Brno-venkov)	299
Rosice (k. ú. Rosice u Brna, okr. Brno-venkov)	299
Rymice (okr. Kroměříž)	299
Senetářov (okr. Blansko)	299
Slatinice (okr. Olomouc)	300
Staré Město (k. ú. Staré Město u Uherského Hradiště, okr. Uherské Hradiště)	300
Syrovice (okr. Brno-venkov)	302
Tišnov (okr. Brno-venkov)	303
Tišnov (okr. Brno-venkov)	303
Tišnov (okr. Brno-venkov)	303
Uherské Hradiště (okr. Uherské Hradiště)	304
Uherský Brod (okr. Uherské Hradiště)	305

Uhřice (k. ú. Uhřice u Kyjova, okr. Hodonín)	306
Valašské Meziříčí (k. ú. Valašské Meziříčí-město, okr. Vsetín)	306
Valašské Meziříčí (k. ú. Valašské Meziříčí-město, okr. Vsetín)	306
Velehrad (okr. Uherské Hradiště)	307
Velká Bystřice (okr. Olomouc)	307
Velké Pavlovice (okr. Břeclav)	308
Velké Pavlovice (okr. Břeclav)	309
Veselí nad Moravou (okr. Hodonín)	311
Vranov (k. ú. Vranov u Brna, okr. Brno-venkov)	312
Vranov (k. ú. Vranov u Brna, okr. Brno-venkov)	313
Vyškov (okr. Vyškov)	313
Vyškov (okr. Vyškov)	313
Zlechov (okr. Uherské Hradiště)	314
Zlín (k. ú. Malenovice u Zlína, okr. Zlín)	315
Znojmo (k. ú. Znojmo-město, okr. Znojmo)	316
Znojmo (k. ú. Znojmo-město, okr. Znojmo)	316
Židlochovice (okr. Brno-venkov)	317
Zprávy o činnosti, Reports, Berichte	321

STUDIE A KRÁTKÉ ČLÁNKY
CASE STUDIES AND SHORT ARTICLES
STUDIEN UND KURZE ARTIKEL

Recenzovaná část

Peer-reviewed part

Rezensierter Teil

DOPORUČENÁ METODIKA FOTODOKUMENTACE V ARCHEOLOGII PRO NÁSLEDNÉ METRICKÉ ANALÝZY OBRAZU

RECOMMENDED PHOTOGRAPHIC DOCUMENTATION METHODOLOGY IN ARCHAEOLOGY FOR SUBSEQUENT METRIC IMAGE ANALYSIS

JIRÍ ŠINDELÁŘ, LUMÍR POLÁČEK, ŠÁRKA KRUPIČKOVÁ

Abstract

This study presents the recommended documentation methodology in archaeological practice, heritage conservation and other fields relating to historical and cultural heritage. It tests various methods of digital documentation, in terms of their accuracy, time required, technology operator requirements, etc. It formulates rules for the creation of 3D models using multi-image photogrammetry, as the most effective method of digital documentation in archaeological practice. It presents a series of criteria to compare this method with other digital documentation procedures used in archaeological situations, at heritage sites and on artefacts. The recommended methodology was developed based on experience from research at the Great Moravian hillfort of Mikulčice-Valy and has been verified at a number of other sites.

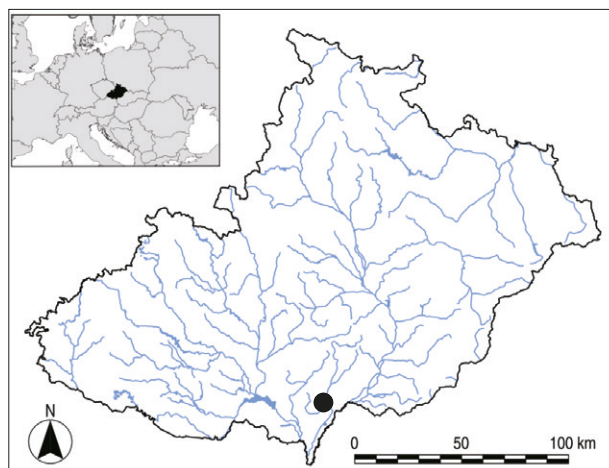
Keywords

shooting for photogrammetry – 3D modelling in archaeology – Mikulčice – geoinformatics – 3D methodology and results

1. Úvod

Velký rozmach výpočetní techniky a digitálních technologií ve světě v posledních letech zasáhl snad každý obor lidské činnosti. Proto dnes již není problém aplikovat nejnovější poznatky a technologické postupy i v rámci ochrany a obnovy kulturního dědictví a uplatnit efektivní nasazení digitalizačních postupů v praxi při dokumentaci objektů kulturní, historické a vědecké hodnoty (Bláha 2016; Brejcha et al. 2015). Během posledních čtyř let vzešly ze spolupráce matematiků a geodetů nová fotogrammetrická metodika a několik různých počítačových programů umožňujících formou tzv. obrazové korelace vytvářet 3D modely ze série fotografií dokumentovaného objektu. Pro tuto metodu, která si rychle našla cestu i do oborů archeologie a historie, se v negeodetických oborech vžilo označení „fotoskenování“. Poměrně dobrá cenová dostupnost a jednoduchost některých softwarů však nemusí při tvorbě přesné měřické dokumentace přinášet vždy potřebnou kvalitu. Ovládání nových počítačových programů a moderní přístrojové techniky bez pochopení teoretických základů oborů matematiky a geodézie se totiž může velmi negativně podepsat na výsledku pořizované plánové dokumentace. Za účelem eliminace dopadů nesprávného používání „3D fotogrammetrie a fotoskenování“ předkládají autoři této

studie metodický návod pro pořizování fotodokumentace v archeologické praxi a při dokumentaci historických nemovitých i movitých objektů (teoreticky k vlastní fotogrammetrické metodě viz např. Pavelka 2003a, 2003b, Hodač 2004). Důvodem je fakt, že podobný návod, resp. soupis pravidel pro správné postupy v této oblasti, v praktické archeologii chybí, a to nejen v českém prostředí. Aktuálnost potvrzuje celá řada odborných článků, domácích i zahraničních, zaměřených



Poloha studované lokality na mapě Moravy.
Location of the site on map of Moravia.

na problematiku aplikování „3D fotogrammetrie“ v archeologii a památkové péči (např. Khalaf et al. 2018; Santos et al. 2017; Pierdicca et al. 2016, De Luca et al. 2011, Borba et al. 2017, Zollhofer et al. 2016). Ovšem řada z těchto prací se omezuje na zjednodušený popis využití jednoho produktu aplikovaného v konkrétním případě: počítačového programu, případně výpočetní metody. Jednoznačné a dostatečně podrobné definování základních pravidel pro správný postup sběru dat využitelných v moderní digitální fotogrammetrii (i při jejich budoucím zpracování) se tedy i v mezinárodním kontextu ukazuje jako velmi potřebné.

Předkládaná metodika vznikala v posledních dvou letech na pracovišti Archeologického ústavu AV ČR, Brno v Mikulčicích v souvislosti s řešením projektu NAKI „Virtuální vědecký model velkomoravských Mikulčic jako systém interaktivní dokumentace, prezentace a archivace dlouholetého systematického archeologického výzkumu“. Jedním z cílů projektu je hledání nejefektivnějšího způsobu tvorby plánové dokumentace při terénním výzkumu, při jeho zpracování a archivaci dat. Pro potřeby projektu byly sumarizovány a dále rozvinuty mnohaleté zkušenosti s podrobnou 3D dokumentací různorodých archeologických situací, reliktních historických objektů i samostatných artefaktů. Přitom byla zformulována série pravidel a doporučení pro správné pořízení fotodokumentace v rámci archeologického výzkumu. Výsledky jsou shrnuty v této studii.

Principem takto pojaté fotodokumentace je možnost jejího využití k obrazovým analýzám a k vytvoření přesné měřické dokumentace. Veškeré představované technologické postupy a metodická doporučení byly opakovaně testovány při archeologických terénních výzkumech na lokalitě Mikulčice-Valy. Jednotlivé níže popisované postupy sběru měřických dat v terénu se ukázaly být nejen velmi efektivní (tj. přinášející maximálně přesné a dostatečně podrobné informace za výrazné úspory času a tím i vynaložených finančních prostředků), ale i nadčasové. Navržené terénní postupy dokumentace nejsou totiž vázány jen na aktuální softwarové produkty, ale přinášejí možnost aplikace nových dokonalejších měřických analýz v budoucnu. Téměř v každé odborné studii a certifikované metodice, které se zabývají otázkami moderních postupů dokumentace v archeologii, se objevuje názor, že se obor výpočetní techniky a možnosti 3D dokumentace rozvíjejí velmi rychle a uváděné postupy včetně použitého software rychle zastarávají (Sokol et al. 2017; Šindelář 2006). Naším cílem nebylo popisovat možnosti nějakého konkrétního počítačového programu dostupného například v roce 2019. Naopak, použitím nejmodernějších technologických postupů, různorodého přístrojového zařízení, ale také opakovaným zpracováním získaných dat v různých počítačových programech jsme hledali cestu k jednoduché formulaci těch základních principů a pravidel, které je vždy potřeba při terénní části dokumentace dodržet proto, aby byla

získaná data vhodná pro správné vytvoření maximálně věrné digitální kopie dokumentovaného objektu. S vědomím tohoto cíle byly hledány takové postupy, které nenesou velké nároky na pořízení drahé přístrojové techniky a které nemají vysoké požadavky na odbornost obsluhy. Tyto postupy by měly být dostupné široké archeologické obci pro nasazení při nejrůznějších akcích počínaje velkoplošným archeologickým výzkumem a konče drobným dohledem. Podmínkou úspěšné aplikace těchto postupů je zajištění výsledků výpočetní fáze projektu pomocí protokolárního doložení chybovosti, aby bylo možné tyto výsledky exaktně doložit a v případě jakýchkoliv pochyb opakovat (viz např. Šindelář 2016a, Šindelář 2016b, Šindelář 2016c, Šindelář, Krejča 2019).

Pro potřeby projektu jsme měli k dispozici nejmodernější geodetické zařízení, grafickou stanici pro náročné a obsáhlé výpočty a profesionální fotogrammetrický software (RTK GNSS stanici Trimble R6, totální stanici Trimble S7, laserový skener Faro Focus S150, bezpilotní letecké prostředky od firmy DJI, aplikace s podporou programů Geus, Microstation, Trimble RealWorks, Faro Scene, PointCab, PMSAG, Reality Capture, Pix4D, Agisoft Photoscan, PhotoModeler Scanner, Blender, Geomagic studio). Při 3D dokumentaci archeologických sond, reliktních historických objektů, uměleckých děl i artefaktů jsme testovali použití nejrůznějších technologií. Od konvenčního geodetického měření (trigonometrie, polární metoda, ortogonální metoda apod.) přes určování polohy metodou GNSS (globální navigační satelitní systémy) až po fotogrammetrii a další obrazové analýzy. Na základě provedených testů lze konstatovat, že za nejefektivnější formu podrobné 3D dokumentace v archeologické praxi můžeme považovat vícesnímkovou fotogrammetrii a možnosti digitálních obrazových analýz z pořízených fotografií (Tabulka 1, 2). Hlavním důvodem je dosažená přesnost výsledného modelu v kombinaci s cenovou dostupností a uživatelskou přístupností (bez speciálních nároků na odbornost obsluhy). Dalším argumentem je dostatečně rychlé použití v různých prostředích a při dokumentaci nejrůznějších objektů počínaje celou lokalitou, přes složitou stratigrafii v sondě až po jednotlivé artefakty.

Jestliže výše doporučenou vícesnímkovou fotografii považujeme za nejefektivnější formu podrobné 3D dokumentace v archeologické praxi, neznamená to, že jde o nejpřesnější použitelnou metodu. Vycházíme-li z hodnocení detailnosti a přesnosti výsledného modelu jako hlavního kritéria, jeví se jako absolutní „vítěz“ testovaných technologií kombinace laserového skenování a vícesnímkové fotogrammetrie. Pořizovací náklady laserového skeneru jsou však vysoké a pro běžnou archeologickou praxi tedy stěží dostupné. Zároveň nesou poměrně vysoké nároky na odbornost obsluhy. Laserové skenování má také jisté požadavky na správný postup práce v terénní části projektu, které vycházejí ze

základů geometrie. Neznalost teoretické části procesu má potom za následek degradaci výsledného produktu na úroveň lživé (internetové) animace, nikoliv přesné měřické dokumentace. Jako příklad lze uvést postprocesní zpracování dat z pozemního laserového skenování části Pražského hradu filmařským štábem z USA, u níž je prakticky nemožná geodeticky přesná registrace jednotlivých pořízených skenů (srov. Šindelář 2019a).

2. Fotogrammetrie v archeologické praxi

Jak bylo výše uvedeno, po několika letech a po provedení několika stovek 3D dokumentací archeologických situací, památkových objektů, uměleckých předmětů a historických artefaktů (např. Šindelář 2014, Šindelář 2016b, Šindelář 2016c, Šindelář 2018a) jsme dospěli k závěru (Tabulka 1), že nejefektivnějším postupem k vytvoření maximálně přesné 3D dokumentace je vícenímková fotogrammetrie s možností dalších digitálních analýz obrazu (z pořízených fotografií). Základním předpokladem zůstává, že si vstupní data v terénu obstarává sám archeolog, případně k tomu určená osoba (ideálně odborně zaškolený technik). Výpočetní fáze projektu nese již nároky na znalosti v oboru geodézie, teoretické fotogrammetrie, ale také potřebu vhodného programového vybavení a nadstandardně silný hardware. Touto druhou etapou (tedy výpočetní) se na tomto místě zabývat nechceme. Jde nám především o otázku pořízení prvotní dokumentace při terénní části archeologického výzkumu, tedy o vytvoření fotodokumentace, která jednoznačně popisuje a charakterizuje podobu archeologické situace

v jednotlivých fázích výkopových prací, případně zanikajícího stavu památky (tj. zakonzervování informací o stavu památkového objektu v čase). Pokud dokumentátor zajistí dodržení několika málo doporučených pravidel a postupů, je možné kdykoliv v budoucnu vytvořit digitální kopii stavu dokumentovaného předmětu k danému časovému období. Jinými slovy, správně pořízenou sadu fotografií dokáže v budoucnu odborník převést v přesnou měřickou 3D dokumentaci (např. Maříková-Kubková et al. 2009).

Po testování nejrůznějších fotogrammetrických postupů při dokumentaci v archeologické praxi jednoznačně vyplývá několik zásadních a neměnných skutečností. Kvalita výsledného produktu je přímo úměrná kvalitě použité fotografické techniky a ještě více praktickým fotografickým dovednostem obsluhy (viz např. metodiku Bezděk, Frouz 2014). Pro správnou fotodokumentaci (takovou, kterou bude možné využít pro měřické účely) je potřeba dodržet základní geometrická, fotografická a organizační pravidla. Dostupnost počítačových programů na tzv. 3D fotogrammetrii v posledních letech a jednoduchost jejich ovládání může kontraproduktivně navodit u uživatele dojem, že i při vytvoření a nahrání nelogické série několika fotografií vytvoří exaktní model. Skutečnost je zcela jiná: nahodilým způsobem fotodokumentace je možné vytvořit pouze nekvalitní digitální model, v němž fototextura zakryje sníženou kvalitu, a který nebude obsahovat přesné a exaktně doložitelné měřické údaje (tj. údaje o přesných rozměrech objektů a jejich vzájemném umístění v terénu) (obr. 1). Předpokladem kvalitní 3D fotogrammetrie pro vědecké účely je aplikace takových pravidel, která zajistí metricky správné výstupy.

metoda	výhody	nevýhody	příklady testovacího použití
polární metoda	vysoká přesnost, všestranné využití	rychlost sběru dat, nutnost znalosti teorie geodézie, omezené množství dat	Mikulčice-Valy, Kutná Hora – Kostnice, klášter Milevsko, Chýnovská jeskyně, Pražský hrad
ortogonální metoda	nízké nároky na odbornost obsluhy, rychlá kontrola hrubých chyb z měření, bez nároků na přístrojové vybavení	rychlost sběru dat, problematické určení výšek, nižší přesnost, omezené množství dat	Mikulčice-Valy, Kutná Hora – Kostnice, klášter Milevsko, Chýnovská jeskyně
GNSS (RTK)	rychlost sběru dat, nízké nároky na odbornost obsluhy, měření v souřadnicovém systému bez postprocesu	nižší přesnost, omezené množství dat, nevyužitelnost v interiérech, v lese apod., nutnost opakovaného měření	Mikulčice-Valy, Kutná Hora – Kostnice, Pražský hrad
laserové skenování	rychlost sběru dat, vysoká přesnost, bezkontaktní měření	omezení využití, nízký detail (model bez fotorealisticých povrchů), problém u vysoce kontrastních povrchů a průhledných materiálů, vysoká pořizovací cena, náročné zpracování dat	Mikulčice-Valy, Kutná Hora – Kostnice, klášter Milevsko, Chýnovská jeskyně, Pražský hrad
fotogrammetrie	velký detail, vysoká přesnost, fotorealisticý výstup, rychlost sběru dat, bezkontaktní měření, variabilita využití	chybovost metody na určitém povrchu, obtížně odečítané drobné objekty, nepřesnosti v hranách a liniích, nároky na odbornost ve výpočetní fázi	Mikulčice-Valy, Kutná Hora – Kostnice, klášter Milevsko, Chýnovská jeskyně, Pražský hrad
kombinace laserový skener a vícenímková fotogrammetrie	vysoká přesnost, vysoký detail, bez potřeby vličovacích bodů, všestranné využití, skenování všech povrchů, fotorealisticý výstup, bezkontaktní měření	cenová náročnost, požadavek na odbornost,	Mikulčice-Valy, klášter Milevsko, Chýnovská jeskyně, Pražský hrad

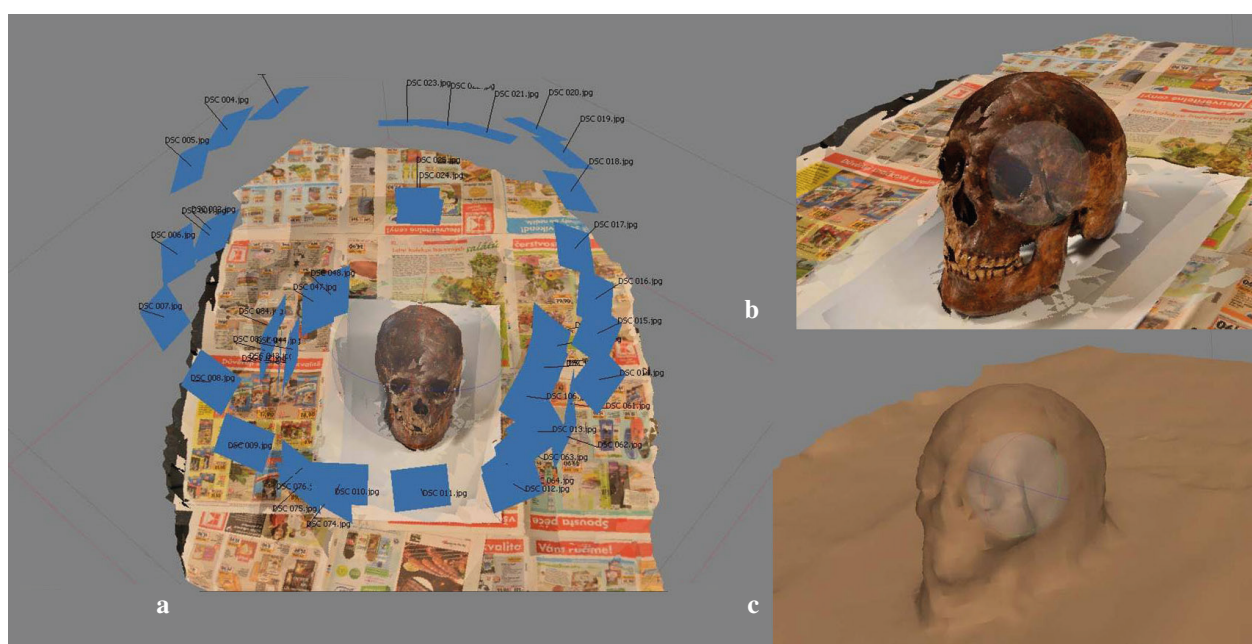
Tabulka 1. Porovnání testovaných metod.
Table 1. Comparison of tested methods.

Milevsko, klášter, profil č. 1		odchyly na kontrolních (signalizovaných bodech v profilu (m))		
číslo bodu	polární metoda	ortogonální metoda	laser sken	vícenímková fotogrammetrie
4001	0,000	0,020	0,000	0,003
4002	0,000	0,030	0,000	0,001
4003	0,000	0,050	0,001	0,001
4004	0,000	0,030	0,000	0,003
4005	0,000	0,020	0,000	0,000
4006	0,000	0,010	0,001	0,002
4007	0,000	0,040	0,000	0,000
4008	0,000	0,050	0,002	0,002
4009	0,000	0,050	0,003	0,003
4010	0,000	0,060	0,003	0,004

Pozn. k tabulce 2 – jako základní (tedy 0) jsou pro porovnání metod zvoleny data získaná polární metodou.

Tabulka 2. Odchyly na kontrolních bodech u jednotlivých metod.

Table 2. Divergences at checkpoints for each method.



Obr. 1. Ukázka překrytí nedostatků 3D modelu fototapetou: a – náhodně pořízená (chaotická) sada fotografií s úmyslným nedodržením geometrických a fotografických pravidel; b – vypočtený model lebky pokrytý fototapetou; c – stejný model bez fototapety.

Fig. 1. Example of deficiencies in a 3D model overlaid by photo wallpaper: a – a randomly taken (chaotic) set of photographs that intentionally do not follow the geometric and photographic rules; b – computed model of a skull overlaid by photo wallpaper; c – the same model without the photo wallpaper.

Při dodržení dále popsané fotografické metodiky a při pořízení dostatečného množství snímků vzniká vedle bohaté obrazové dokumentace silné informační pole, z něhož při vhodné metrické analýze můžeme vytvořit detailní a přesný 3D model, který se kvalitativně vyrovná výstupu z mnohem nákladnější technologie laserového skenování a dokonce ji v mnohém překonává. Jednoduchost a bezproblémová cenová dostupnost nejrozličnějších kamer umožňují nasazení této technologie do míst, které jsou pro laserový skener problematické (Bruno et al. 2015). Příkladem mohou být silně prašné prostředí, špatná dostupnost nebo jinak extrémní

podmínky (nepřístupné podzemí, objekty pod vodou, příliš velké rozměry dokumentovaného objektu nebo dlouhé profily v úzkém výkopu – viz např. Maříková-Kubková et al. 2005, Šindelář 2015a, 2015b; Hašek, Šindelář 2015). Upravená a doplněná pravidla pro pořizování fotodokumentace, kterou lze využít k tvorbě přesné geodetické dokumentace, vznikla v rámci zpracovávání fotoarchivu z historických výzkumů lokality Mikulčice-Valy a při hledání rychlé, dostupné a přesné technologie v rámci dokumentace nových archeologických odkryvů na lokalitě. Z poslední doby můžeme uvést další příklady úspěšného použití fotogrammetrie

rie. Jedním z nich je průzkum a geodetické zaměření kostnice pod kostelem Všech svatých v Sedlci u Kutné Hory (Frolík 2016). Dalším příkladem využití nově definovaných postupů videogrammetrie je záznam z bezpilotních prostředků dokumentující stav chrámu Notre Dame v Paříži před ničivým požárem (stav vnějšího pláště chrámu k roku 2017). Asi nejmarkantnější příklad úspěšné aplikace v extrémních podmínkách reprezentuje dokumentace zatopené části Chýnovské jeskyně jako vůbec první 3D skenování zatopené jeskyně v Evropě (Šindelář, Krejča 2019).

Vhodným východiskem pro fotogrammetrii v archeologické praxi i pro tuto studii je koncept představený na sympoziu Mezinárodní společnosti pro fotogrammetrii a dálkový průzkum Země v Melbourne v roce 1994 (Waldhäusl, Ogleby 1994). Zde byla definována základní pravidla, při jejichž dodržení je možné vytvářet přesnou měřickou dokumentaci z fotografií pořízených běžnými amatérskými kamerami. Ačkoli od zformulování těchto pravidel uplynulo již 25 let, jsou tato stále platná (teoretické základy geometrie se nemění ani s příchodem nejmodernějších technologií). V rámci předkládané studie jsou tato pravidla aktualizována a doplněna o nové zkušenosti s ohledem na aktuální možnosti fotogrammetrického vyhodnocení.



Obr. 2. Optimální a doporučené rozvržení zaměřených délek (černé úsečky a body), určení horizontál (modře) a svislic (červeně) na objektu zájmu.

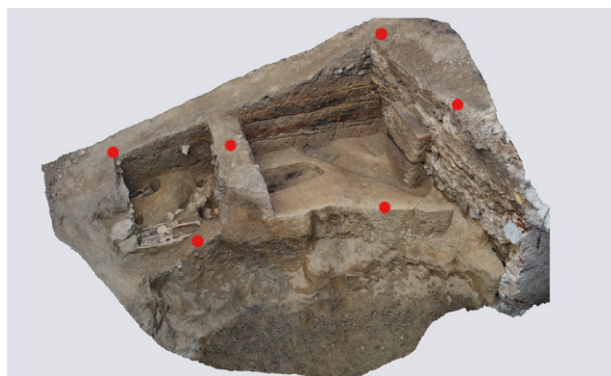
Fig. 2. Optimal and recommended focusing length distribution (black lines and points), determining the horizontal (blue) and verticals (red) on the object of interest.

3. Metodika fotogrammetrické dokumentace archeologických objektů a artefaktů

3.1. Geometrická pravidla pro fotogrammetrii

Dodržením uvedených geometrických pravidel při pořizování fotodokumentace je možné velmi výrazně ovlivnit přesnost budoucích měřických výstupů. Tato pravidla určují správný postup při fotografování, tedy to, jak budeme objekt našeho zájmu fotografovat a co je nutné na objektu fyzicky změřit.

Na každém objektu, který jsme se rozhodli fotogrammetricky dokumentovat, je potřeba jednoznačně definovat alespoň jednu dostatečně dlouhou vzdálenost mezi dvěma dobře viditelnými body (tyto body musejí být dobře a jednoznačně identifikovatelné v terénu i na pořízených fotografiích). Tato délka nám udává při



Obr. 3. Optimální a doporučené rozmištění vřicovacích bodů pro 3D dokumentaci dvou archeologických sond (vřicovací body zvýrazněné červeně na snímku výsledného modelu). Pro tento konkrétní případ bylo v terénu pořízeno 225 snímků podle všech doporučených pravidel a zaměřeno 6 vřicovacích bodů metodou GNSS; čas strávený dokumentací byl 22 minut; výpočetní fáze trvala 2 hodiny; výsledkem je digitální model s max. střední chybou 1 cm, který v detailu a komplexnosti předčí výstup z terestického laserového skenování.

Fig. 3. Optimal and recommended distribution of ground control points for 3D documentation of two archaeological probes (the ground control points are highlighted in red on the image of the resulting model). For this particular case 225 photographs were taken in the field according to all the recommended rules and 6 ground control points were measured using GNSS; the time spent documenting the site was 22 minutes; the computing phase took 2 hours; the result is a digital model with a max. medium error of 1 cm, which is better than the result from the theoretical laser model in terms of detail and complexity.

následném vyhodnocení měření rozměr objektu. Body mohou být voleny jako body přirozené signalizace (tj. body jednoznačně charakterizované na dokumentovaném objektu, např. výrazné výstupky na kamení či reliéfu, body na malbě apod.), případně můžeme volit body uměle signalizované (křídou nakreslené křížky či papírové značky apod.). V praxi se nám velmi osvědčily výrazné barevné signální samolepky nebo jasné černobílé křížky, tedy značky, které jsou na fotografiích velmi snadno a dobře identifikovatelné, neboť se v přirozeném prostředí nevyskytují. Tím je eliminováno nebezpečí záměny signalizačních bodů ve výpočetní fázi projektu. Pro správné vyhodnocení dokumentace v budoucnu doporučujeme, aby základní určovaná délka na objektu byla dostatečně dlouhá, minimálně

$\frac{2}{3}$ nejdelšího rozměru objektu zájmu. Je nevhodné brát za základní linii pro určení měřítka 20 m dlouhé sondy metrovou trasírku. Vezme-li se totiž v úvahu nepřesnost určení délky měřením nebo následně určením signalizačních bodů na fotografiích, bude se následně chyba u objektu výrazně větší, než je zaměřená linie, mnohonásobně zvětšovat. Vedle určení délky je potřeba na dokumentovaném objektu také jednoznačně definovat horizontálu nebo svislici. Délku svislice nebo horizontály měřit nemusíme. Při vyhodnocení nám tyto informace slouží ke správné orientaci vzniklého modelu (správné natočení v osách X, Y a Z). Vedle těchto dvou základních měřických informací je dobré naměřit ještě nějaká doplňková data pro následné kontroly finálních výstupů. Jako optimální doporučujeme

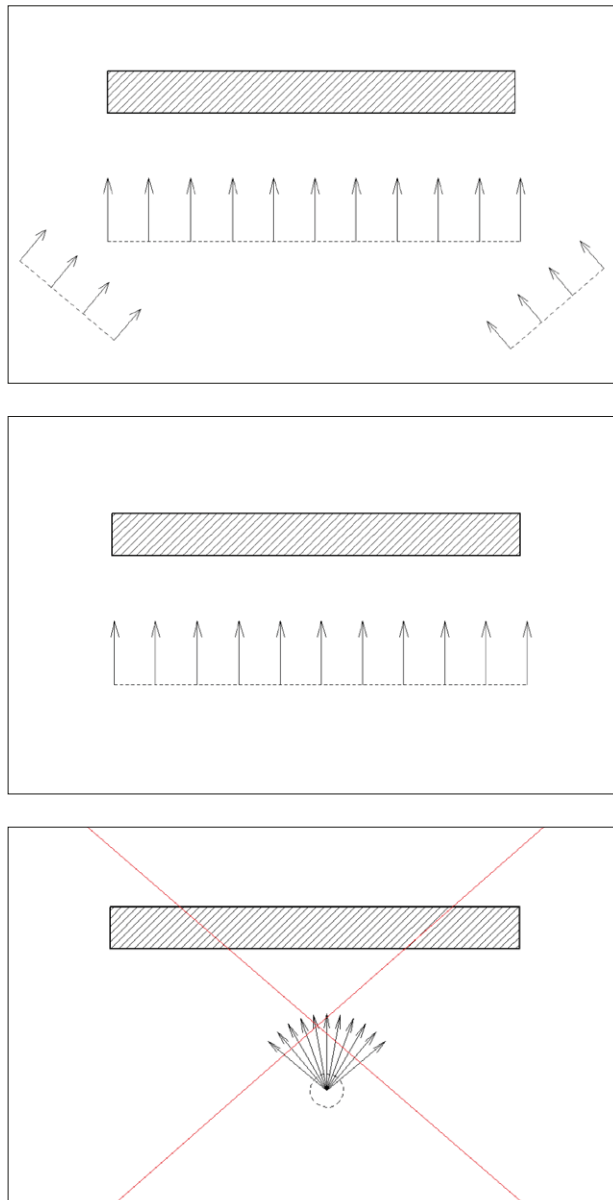


a **Obr. 4.** Rozmístění vličovacích bodů pro fotogrammetrickou dokumentaci plochy (fasáda, líc zdi, rovná plocha, rovný profil v sondě, apod.), která je na fotografii vyznačena modrým obdélníkem: a – správné rozmístění, možno vyhodnotit jednosnímkovou metodou a v případě pořízení několika fotografií (minimálně stereo-páru) i ve 3D; b – chybné rozmístění, jednoznačně metricky definovaná plocha nepokrývá dostatečnou část zájmové oblasti, při nárůstu střední chyby však matematicky stále řešitelná úloha; c – absolutně chybné rozmístění, sice jsou použity 4 body, ale jejich umístění v jedné linii znemožňuje správný výpočet.



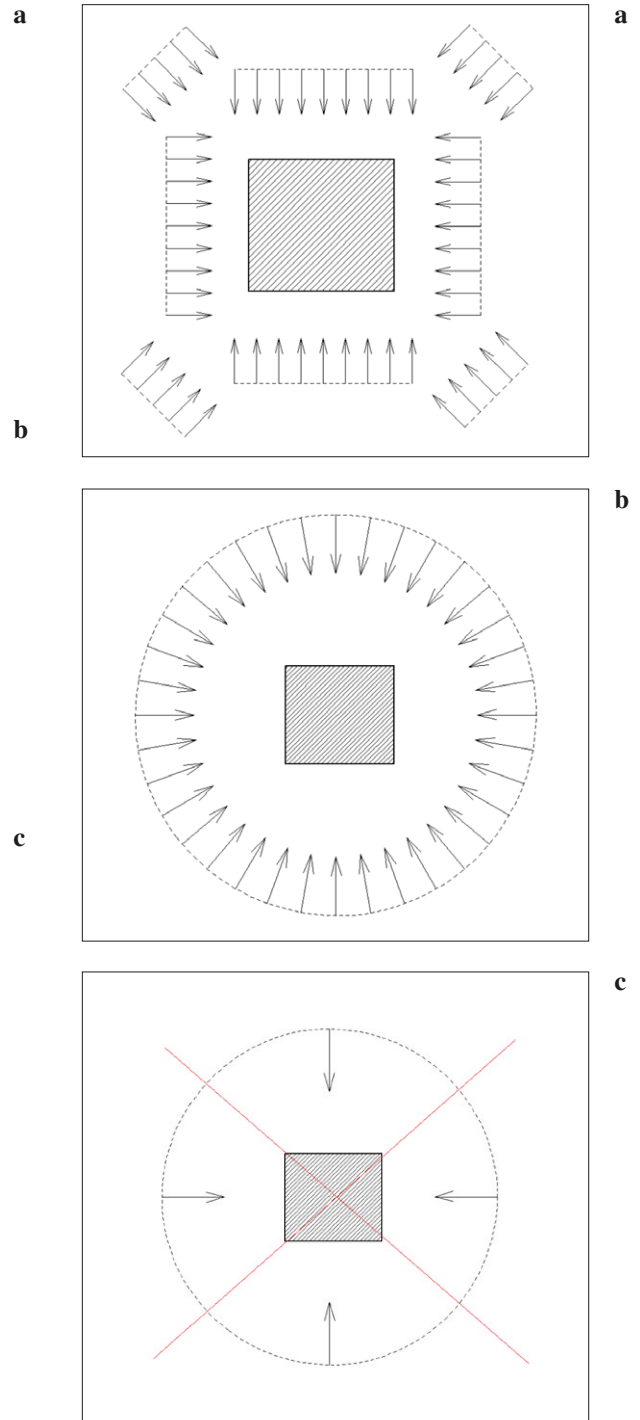
b **Fig. 4.** Distribution of ground control points for the photogrammetric documentation of the area (facade, face of the wall, flat area, straight profile in the probe, etc.) marked on the photograph with a blue rectangle: a – correct distribution, option to evaluate using the single-image method and, if several photographs are taken (at least stereopairs) also in 3D; b – incorrect distribution, the clearly metrically defined area does not cover enough of the area of interest; however, if the medium error is increased this is still a mathematically solvable problem; c – absolutely incorrect distribution; although 4 points are used, as they are situated in a single line it is not possible to make the correct calculation.





Obr. 5. Rozmístění fotografických stanovisek (šipky) pro dokumentaci rovného objektu (např. líc zdi, odlámaná stěna, profil apod.), vedle série snímků s kolmou osou záběru na dokumentovanou rovinu ještě šikmé stereopáry: a – optimální rozmístění; b – většinou doporučované rozmístění, řešitelná úloha s dobrým výsledkem, ale s nižší přesností v hloubkové mapě a bez kontrol; c – nevhodné rozmístění, natáčení objektivu bez změny polohy kamery znemožňuje prostorové vyhodnocení.

Fig. 5. Distribution of photographic viewpoints (arrows) for documenting a flat object (e.g. the face of a wall, part of a broken wall, a profile, etc.), next to a series of shots with a perpendicular axis of view of the documented plane there are oblique stereopairs: a – optimal distribution; b – mostly recommended distribution, solvable problem with a good result, although with lower accuracy in the depth map and with no controls; c – unsuitable distribution, the fact that the lens turns without the camera changing position ends any spatial assessment impossible.



Obr. 6. Dokumentace prostorového objektu (z exteriéru): a – optimální a doporučený způsob; b – doporučovaná metoda snímání, řešitelná úloha většinou s uspokojivým výsledkem, ovšem s nižší přesností v hloubkové mapě a bez kontrol; c – nevhodné snímání objektu pro metrické vyhodnocení.

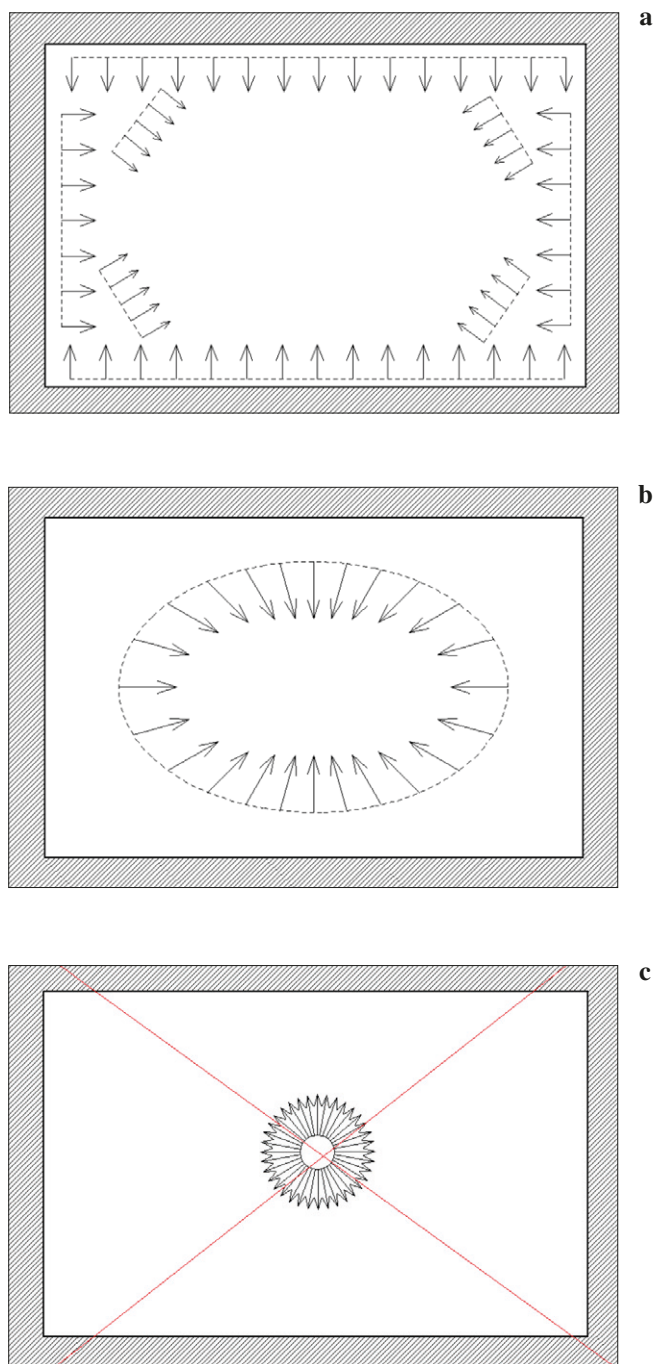
Fig. 6. Documentation of a spatial object (from the exterior): a – optimal and recommended method; b – recommended method of taking photographs, a solvable problem mostly with a satisfactory result, although with lower accuracy in the depth map and with no controls; c – unsuitable method used to take photographs of a building for metric evaluation.

stanovit nějaké další délky a také další svislice či horizontály. Tyto doplňkové informace umožní v budoucnu rychlou kontrolu a vyloučí případné hrubé chyby z měření či zápisu v terénním deníku. Zároveň jsou dokladem kvality a pečlivosti provedené práce (obr. 2).

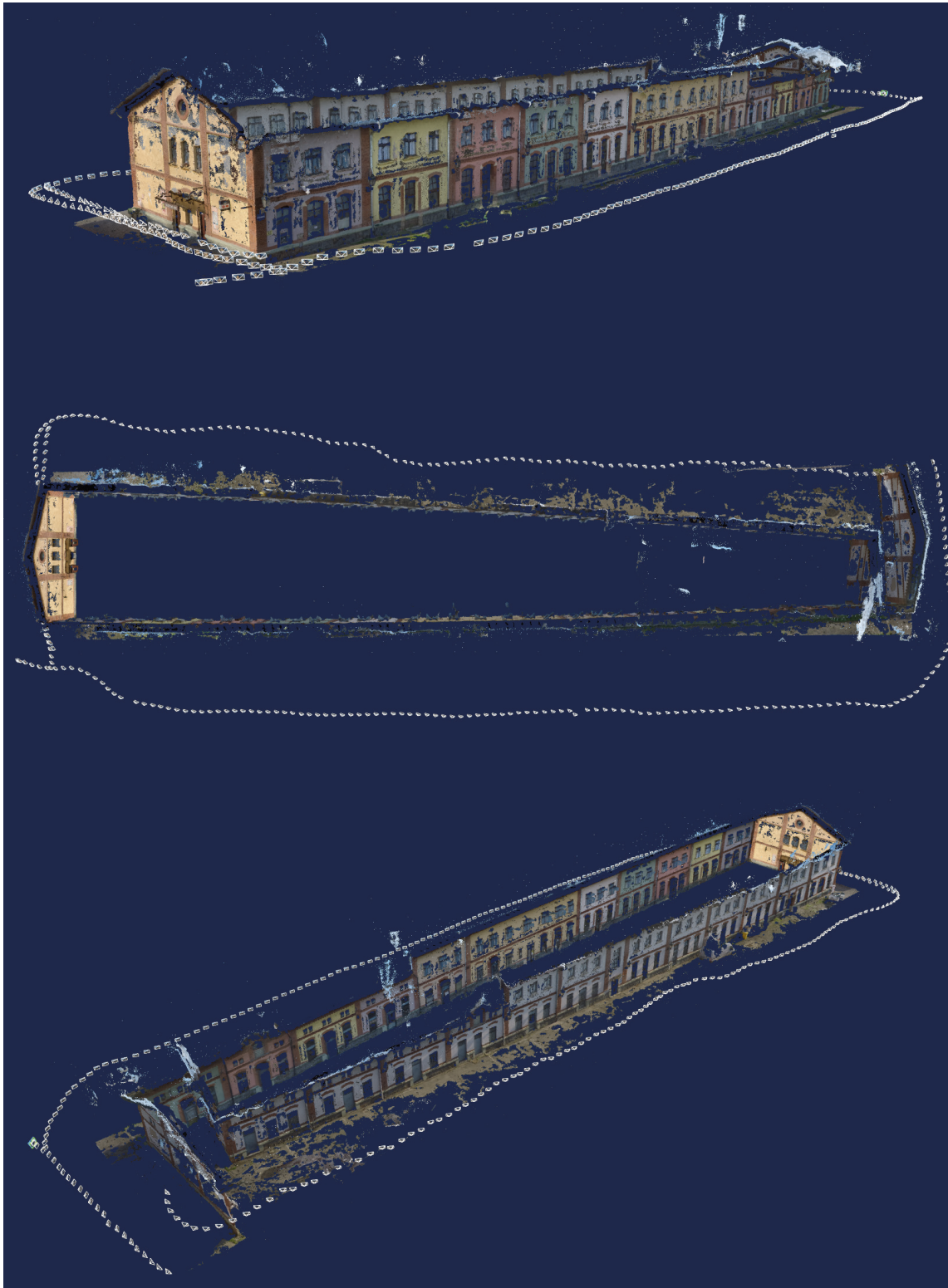
Pokud má dokumentátor při realizaci fotogrammetrického projektu k dispozici geodetickou techniku, může se vyhnout oměřování délek a určování horizontál zaměřením vlčivacích bodů a jejich určení v souřadnicovém a výškovém systému. Vlčivací body musí být minimálně 3 (teprve tři body určují měřítko a natočení v prostoru). Ze zkušenosti doporučujeme určení alespoň 4 vlčivacích bodů, které jsou vhodně rozmístěné v prostoru a vzdálenost mezi dvěma z nich dosahuje minimálně $\frac{2}{3}$ nejdějšího rozměru dokumentovaného objektu. Vlčivací body je potřeba vhodně rozmístit v prostoru. To znamená, že při dokumentaci 2 m hluboké sondy nerozvrhneme vlčivací body pouze na dno (případně pouze na rohy sondy v úrovni terénu), ale snažíme se jimi charakterizovat i osu Z. Optimálně rozmístěné body tedy nejsou v jedné rovině (a už vůbec ne v jedné linii) (obr. 3). Vlčivací body v jedné rovině jsou přípustné pouze v případě dokumentace objektu, který je plochý nebo se rovinně velmi blíží (např. rovná zeď, jeden profil apod.) (obr. 4). I v případě geodetického určení vlčivacích bodů platí pravidlo o kontrole (tedy čím více vlčivacích bodů, tím spolehlivější výstup v budoucnu a také eliminace náhodných hrubých chyb z měření).

Dalším geometrickým pravidlem, které je potřeba dodržovat, je správná konfigurace snímků při fotografování (obr. 5, 6 a 7). Zcela jednoznačně je třeba se vymezit proti tvrzení těch návodů, které doporučují pouze „nafotit objekt kolem dokola“ (obr. 8). Způsob, kterým je objekt fotograficky dokumentován, by nikdy neměl být libovolný či náhodný. Rozhodně nestačí bezmyšlenkovitě vytvořit sérii fotografií. Při dodržení stanovených pravidel je možné již dnes pracovat s pořízenou fotodokumentací mnoha různými výpočetními postupy. Navíc je téměř jisté, že nové matematické postupy v budoucnu umožní vytěžit ze snímků ještě více informací, než si nyní dokážeme představit (obr. 9, 10).

Správnost výše uvedených tvrzení jsme mohli testovat při zpracování konkrétních digitálních modelů v minulosti odkrytých archeologických situací a reliktiů historických staveb (obr. 11, 12, 13). Uvedme tři konkrétní příklady použití fotodokumentace pořízené podle metodiky „3 x 3 pravidla pro fotogrammetrii“ (Waldhäusl, Ogleby 1994) v moderním zpracování a následném vyhotovení digitálního modelu dnes již nepřístupné nálezové situace. Prvním z nich byla dokumentace revizních výzkumů kostelů a paláce na lokalitě Mikulčice-Valy v letech 2008–2013 (Poláček 2014). Stejným způsobem jsme otestovali sérii fotografií pořízených měřickou skupinou Archeologického

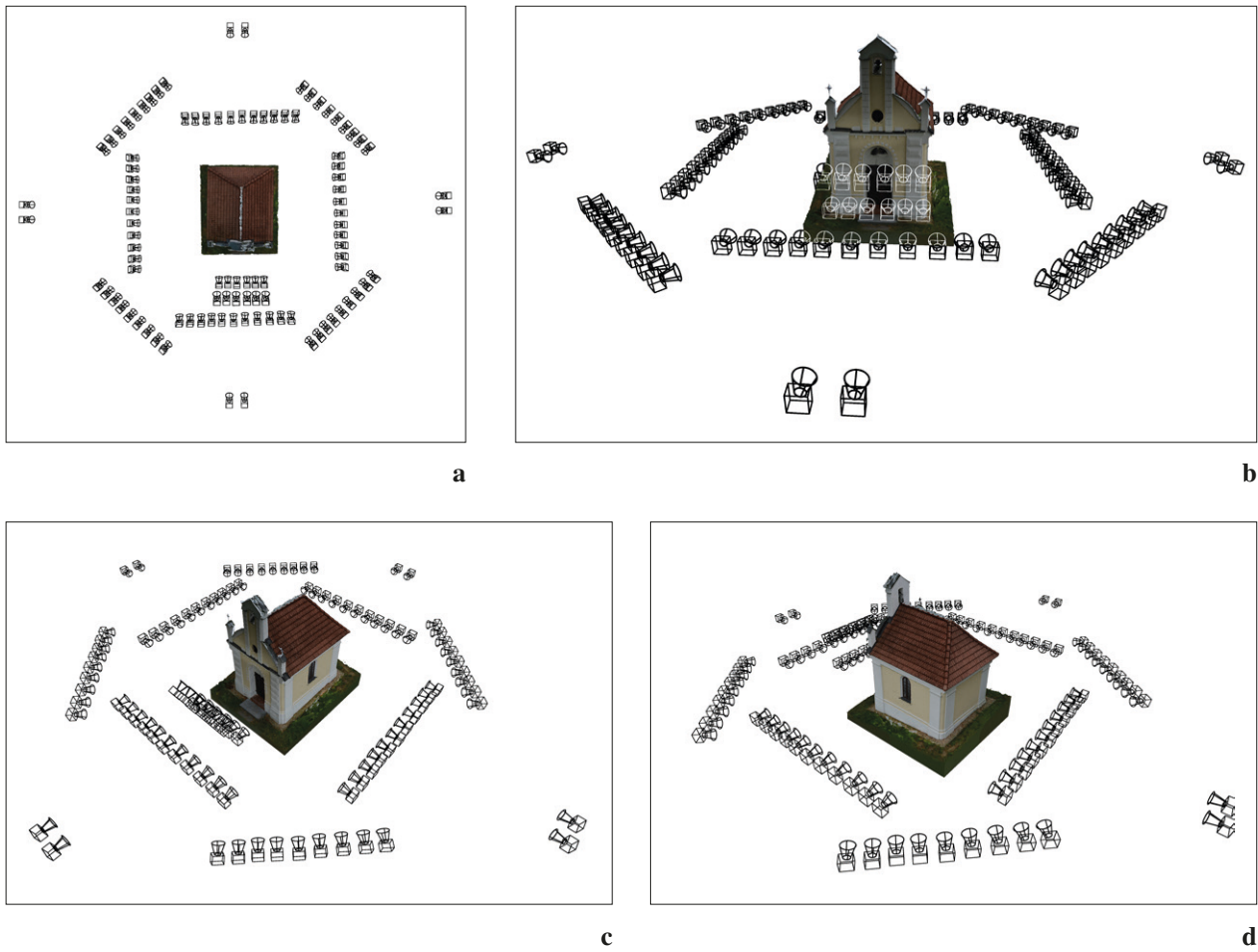


Obr. 7. Dokumentace interiéru (vnitřek místnosti, vnitřní stěny velké sondy apod.): a – optimální a doporučená metoda; b – většinou doporučovaný způsob dokumentace interiéru, řešitelná úloha většinou s uspokojivým výsledkem, ovšem s nižší přesností v hloubkové mapě a bez kontrol; c – nevhodný způsob snímání pro metrické vyhodnocení.
Fig. 7. Documentation of an interior (the inside of a room, the inner walls of a large probe, etc.): a – optimal and recommended method; b – mostly recommended method of documenting an interior, a solvable problem mostly with a satisfactory result, although with lower accuracy in the depth map and with no controls; c – method used to take photographs unsuitable for metric evaluation.



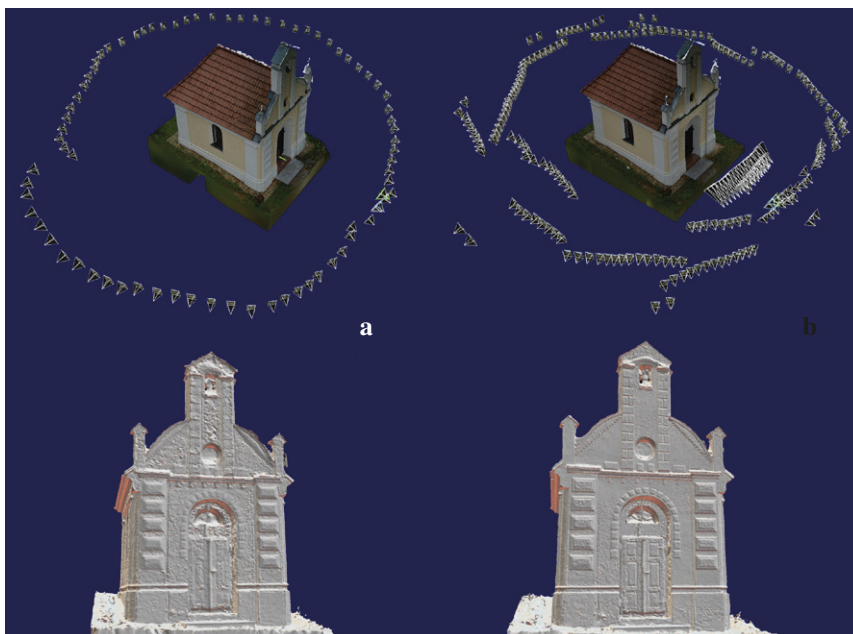
Obr. 8. Ukázka nafocení objektu zájmu „kolem dokola“, nedodržení doporučených pravidel deformuje model budovy z obrazové korelace. Pokud odchylka z počítačových programů na obrazovou korelaci nevyjde takto dramatická, zpracovatel dokumentace ji vůbec nemusí odhalit. Výsledné plány jsou pak zatíženy hrubou chybou, kterou jen těžko odstraníme. Bez kontrol a výpočetních protokolů je to nemožné.

Fig. 8. Example of photographing the object of interest “all the way around”; failure to follow the recommended rules distorts the model of the building from the image correlation. If the deviation from the computer software does not have such a dramatic impact on the image correlation, the person compiling the documentation might not necessarily reveal it at all. The resulting plans are thus riddled with errors that are very difficult to eliminate. This is impossible without controls and computing protocols.



Obr. 9. Optimální rozvržení fotografických stanovisek a os záběrů pro 3D dokumentaci konkrétního objektu – kaple (na základě dlouhé řady provedených testů).

Fig. 9. Optimal distribution of photographic viewpoints and shot axes for the 3D documentation of a specific building – a church (on the basis of a long series of tests).



Obr. 10. Porovnání výsledného modelu při nasnímání objektu zájmu: a – metoda „kolem dokola“; b – podle navrženého postupu. Při výpočtu bylo použito v obou případech pouze obrazové korelace (při kombinaci se stereofotogrammetrickým vyhodnocením by byl výsledek ještě markantnější).

Fig. 10. Comparison of the resulting model when scanning the object of interest: a – “all the way around” method; b – according to the proposed procedure. In both cases the calculation was made using only image correlation (when combined with a stereophotogrammetric assessment the result would be even more striking).

Infografika 1

1. **Fotografická stanoviška vhodně rozprostře v prostoru.** Nepořizujeme větší množství snímků z jednoho místa pouhým natáčením objektivu, ale vždy pořizujeme sérii snímků z různých míst v prostoru kolem objektu zájmu (a to myšleno polohově i výškově). Větší množství snímků z jednoho místa, případně velmi blízko vedle sebe bude při výpočtu zvyšovat chybovost výsledného modelu a vytvářet falešné hrany a nerovnosti v plochách. Důležité je dodržení dostatečně velkého překryvu sousedních snímků. Minimální překryv sousedních snímků doporučujeme 60 % (toto je opravdové minimum, na všech našich projektech neklesá přesah sousedních snímků pod 80 %).
2. **Při pořizování snímků se snažíme o sérii s rovnoběžnou osou záběru.** Tím umožníme ve výpočetní fázi projektu kombinaci více fotogrammetrických metod (vedle digitální obrazové korelace i výpočet stereofotogrammetrický) a zajistíme tak řádově kvalitnější výstupy. Takový postup fotografování zajistí správné odečtení bodů na nepravidelných prostorových tvarech. Při pořizování stereodvojic snímků se snažíme o tzv. normální případ (osy záběrů jsou rovnoběžné a kolmé na základnu) nebo případ konvergentní (osy záběrů se mírně sbíhají). Doporučujeme vyvarovat se divergentního případu, tedy situace, kdy se osy záběrů rozbíhají. Při běžné dokumentaci v archeologii stačí rovnoběžnost os záběru odhadovat. Stejnou pozornost je třeba věnovat i správně volené délce fotografické základny, tedy vzdálenosti pozic stanovišek fotoaparátu při pořizování stereodvojice. Jako optimální se ukazují $\frac{1}{4}$ až $\frac{1}{15}$ průměrné vzdálenosti kamery od objektu zájmu. Stejně jako u určování rovnoběžnosti záběrů, i zde stačí délku základny odhadnout. Není potřeba ji přesně odměřovat. Toto pravidlo nabývá na významu především v okamžiku, kdy pro fotodokumentaci používáme kameru s velmi širokým záběrem (např. GOPRO). Při použití širokoúhlého objektivu má operátor dojem, že díky velkému záběru může pořizovat menší množství snímků, protože mu ohnisková vzdálenost umožňuje dostatečné přesahy sousedních snímků. Velké zkreslení objektivu na stranách však znemožňuje využití moderních obrazových korelací (image based modeling) (obr. 8 a–d; 9). Snímky stereodvojice je dobré pořizovat ze stejné výškové úrovně (případně využít posun v ose X či Y). Fotografická základna by tedy měla být vodorovná nebo svislá.
3. **Vedle série snímků s osou záběru kolmou na objekt zájmu pořizujeme ještě snímky šikmé a diagonální** (zachycující dvě stěny objektu). Díky těmto snímkům bude zajištěna přesnost u dlouhých rovných stěn a také to umožní kombinaci výpočtu s metodou průsekové fotogrammetrie.
4. **Pořízení frontálních snímků ucelených částí objektu** (jednotlivé líce zdí, fasád, rovných stěn profilů apod.). Takovéto snímky umožní bez potřeby drahého programového vybavení a silné výpočetní techniky jednoduché a rychlé vyhodnocení jednosnímkovou metodou a vytvoření ortofotoplánů.
5. **Nutnost zajistit mnohonásobné zobrazení každého jednoho místa z objektu zájmu na více snímcích** (minimálně na třech fotografiích).
6. **Do fotodokumentace zahrnout i některé části polohopisu v sousedství našeho objektu zájmu.** Toto pravidlo nabývá na významu především v okamžiku, kdy nemáme pro finální vyhodnocení body georeferencované do souřadnicového a výškového systému. V budoucnu mohou takové generální snímky lokality pomoci k upřesnění polohy dokumentovaného objektu. Vedle hlediska měřického mají takové snímky mnohdy i velkou vypovídací hodnotu historickou.
7. **Zajištění kvalitní fotodokumentace detailů.** Při fotografování detailů postupujeme vždy krokově. Velký skok od celkové dokumentace líce zdi na velký detail (např. rytinu na kamenné nebo kolek na cihle) znemožní v budoucnu přesné určení polohy fotografických stanovišek z dokumentace detailů. Jako správný příklad poslouží představení správné dokumentace kostrového pohřebiště. Správný postup při fotodokumentaci je první série snímků na sondu (nebo třeba hromadný hrob), druhá série snímků na jednotlivé jedince, třetí série na jednotlivé části těl (samostatně lebka až ramena, samostatně trup a horní končetiny, samostatně pánev a dolní končetiny) a případně ještě čtvrtá série snímků na důležitý detail (např. patologické změny na kostech nebo jednotlivé movité nálezy u kostry) (obr. 14; 15).

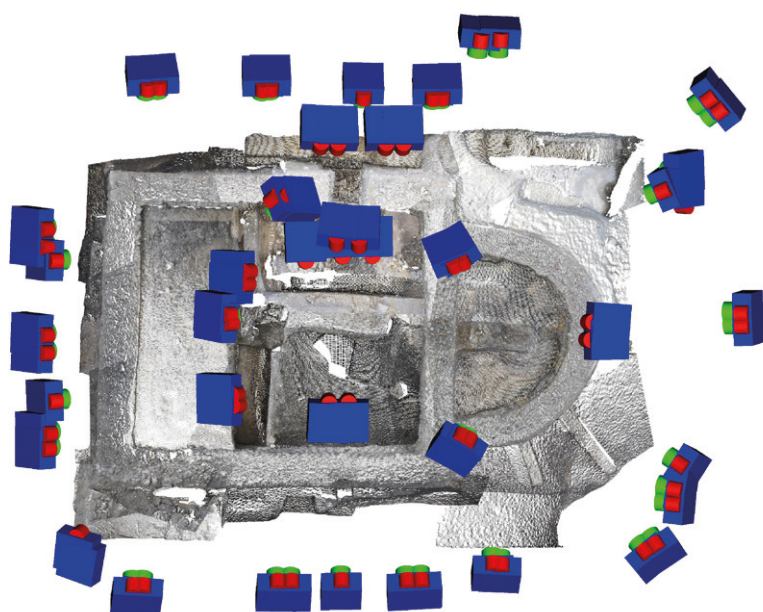
ústavu AV ČR, Praha, na archeologickém výzkumu kostela v Živoohošti a bohatého hrobu ze 4. století po Kr. na stavbě dálnice D5 u Berouna (Břicháček 1981, Šindelář, Břicháček 2019). Oba posledně jmenované výzkumy probíhaly a byly dokumentovány v 70. letech 20. století. Díky tomu, že se v obou případech jednalo o sérii fotografií pořízených podle zmiňovaných geometrických pravidel, můžeme je dnes nově vyhodnotit moderním postupem – digitální obrazovou korelací. Ač autor fotografií v době vzniku snímků předpoklá-

dal pouze výpočty stereofotogrammetrické, případně vyhodnocení formou průsekové fotogrammetrie, správná volba pozic kamery a směr os záběru umožnily po více než čtyřiceti letech vytvoření detailních digitálních 3D modelů těchto archeologických situací a plnohodnotně zastoupily chybějící části klasické měřické dokumentace. Tím se opět potvrzuje, že bez ohledu na naše aktuální možnosti přístrojové techniky jsou a budou základní teoretická pravidla geometrie stále platná (obr. 14).



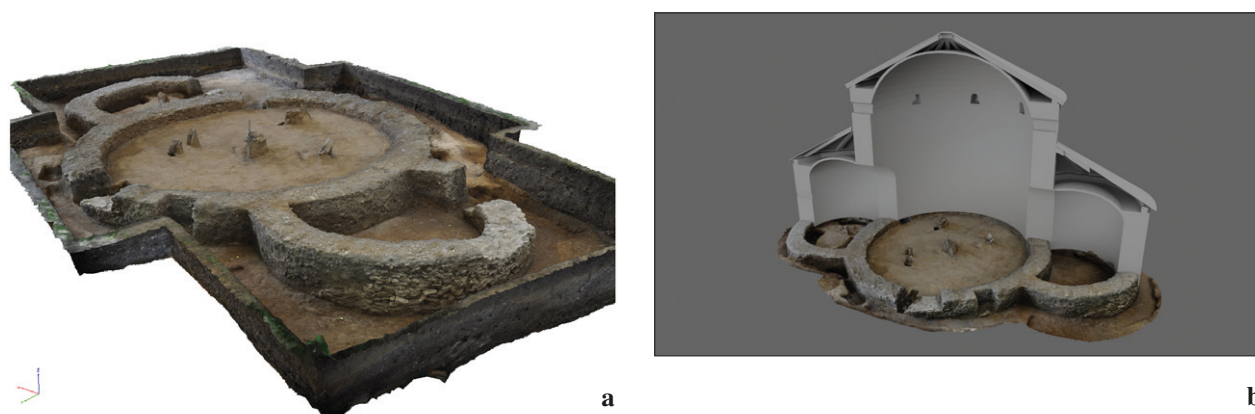
Obr. 11. Pracovní snímek z nového výpočtu 3D modelu IV. kostela v Mikulčicích. Podkladem pro výpočet je fotodokumentace z roku 2011, která byla provedena podle popisované metodiky.

Fig. 11. Working image from the new calculation of the 3D model of church III in Mikulčice. The calculation is based on photographic documentation from 2011, which was taken using the described methodology.



Obr. 12. Pracovní snímek z nového výpočtu 3D modelu IV. kostela v Mikulčicích. Díky dodržení popisované metodiky je možná moderní obrazová korelace, ač původní fotodokumentace předpokládala pouze dílčí (dokumentace jednotlivých detailů) vyhodnocení metodou stereofotogrammetrie.

Fig. 12. Working image from the new calculation of the 3D model of church IV in Mikulčice. As the described methodology is followed only modern image correlation is possible, although the original photographic documentation assumed only partial (documentation of the individual details) assessment using the stereophotogrammetry method.



Obr. 13. Mikulčice, VI. kostel: a – výsledný model archeologické situace revizního výzkumu, nové výpočty realizované na základě správné fotodokumentace v minulosti; b – digitální model archeologické situace využitý v 3D grafice při tvorbě rekonstrukčních modelů.

Fig. 13. Mikulčice, church VI: a – resulting model of the revisory research archaeological situation, new calculations made on the basis of correct photographic documentation in the past; b – digital model of the archaeological situation used in 3D graphics to create reconstruction models.

3.2. Fotografická pravidla pro fotogrammetrii

Dodržování několika základních fotografických pravidel výrazně ovlivňuje kvalitu vytvářené dokumentace a významnou měrou může usnadnit fotogrammetrické výpočty. Jedná se o soubor pravidel, které definují, za jakých podmínek je optimální fotodokumentaci provádět a jak nastavit kameru pro sběr dat (Bezděk, Frouz 2014).

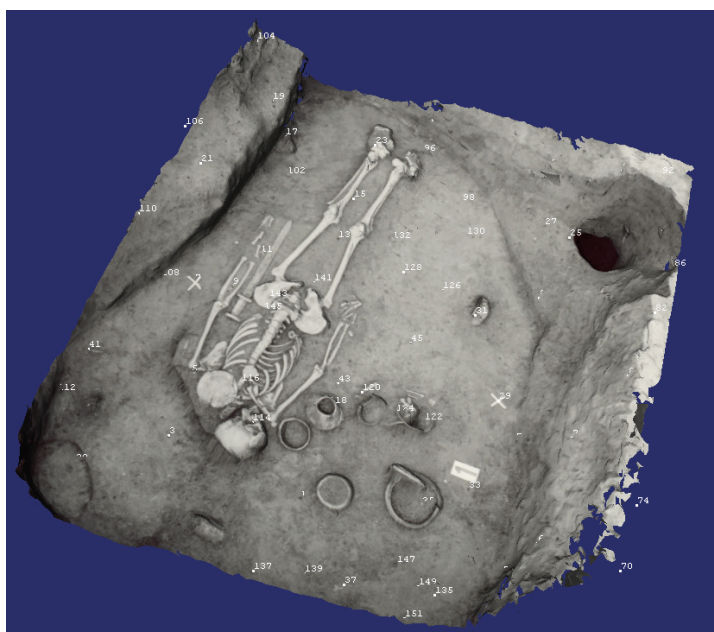
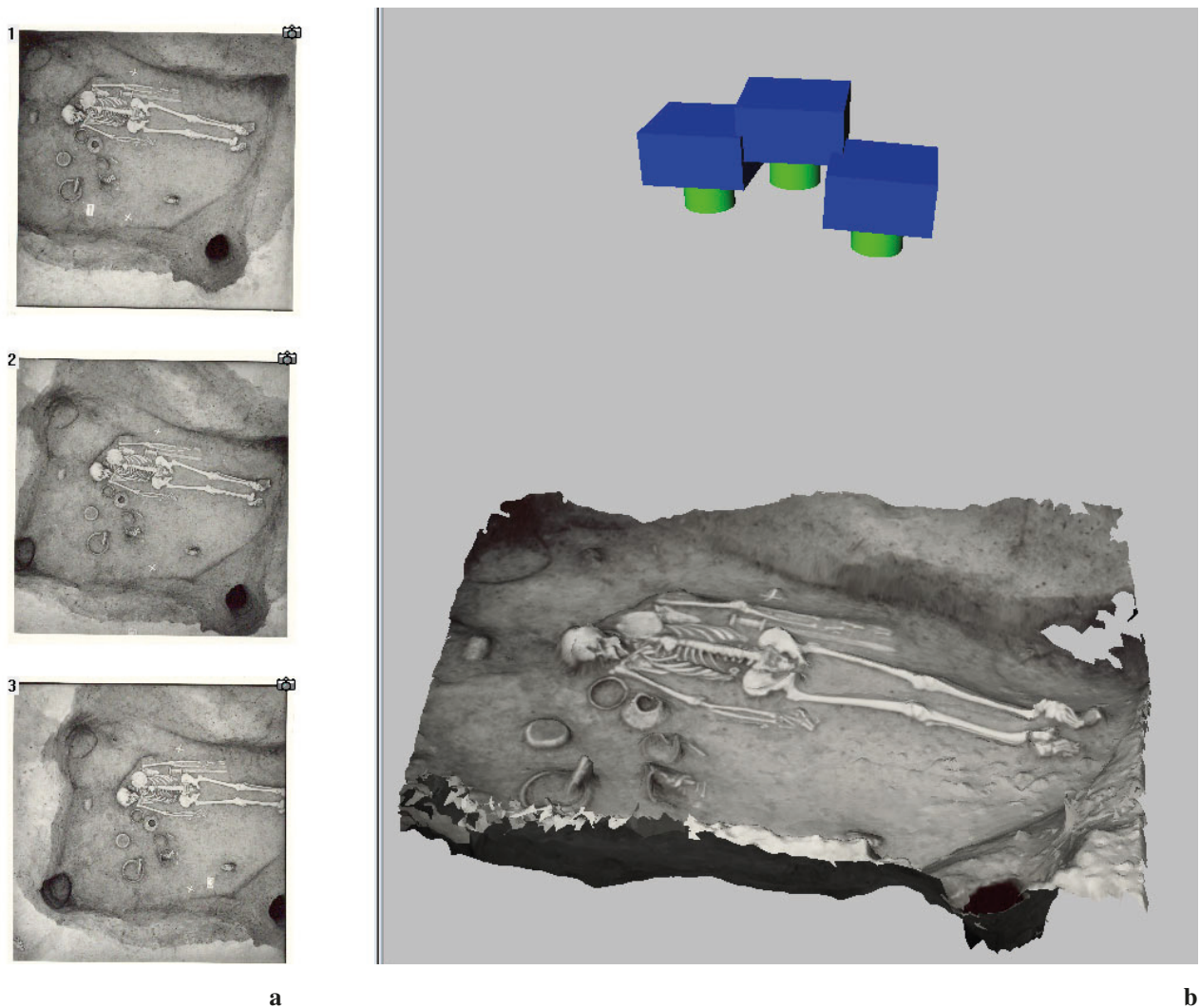
Při pořizování snímků, které mají dále sloužit jako základ měřické dokumentace, je vhodné udržet po celou dobu neměnné geometrické parametry fotoaparátu. To znamená neposouvat optiku (u tzv. shift objektivů), vypnout stabilizaci obrazu a pokud možno nepoužívat zoom (optimální je nafotit celý objekt s nastavením stejné ohniskové vzdálenosti). V případě, že objekt nelze kvalitně nafotit bez použití různých ohniskových vzdáleností, doporučujeme rozdělit snímky do jednotlivých sérií, kde každá série má svou hodnotu ohniskové vzdálenosti. Při fotodokumentaci relativně malých objektů je třeba dbát na dostatečnou hloubku ostrosti. Výsledné fotografie nikdy nijak neupravujeme. Lepších výsledků docílíme uložením snímků ve formátu RAW. Do výpočetní fáze vstupují zásadně a pouze originální neupravené snímky. Významnou roli pro výpočet mají také neobrazové informace – tzv. metadata. Tak jako nezasahujeme do pořízeného obrázku, nezasahujeme ani do metadat.

Kvalita jednotlivých fotografií má zásadní vliv na kvalitu výsledného plánu nebo modelu. Opět zde platí přímá úměra – čím kvalitnější vstupní snímky, tím kvalitnější plány a modely. Naopak rozmazané fotografie

a snímky přexponované jsou pro výpočty bezcenné. Obecně platí: co není na fotografiích zaznamenáno, nemůže být ani vyhodnoceno. Vedle správného nastavení kamery je stejně důležitá správná volba období, kdy budeme fotodokumentaci provádět. Volíme čas s optimálními světelnými podmínkami (dostatek světla, v exteriérech se snažíme vyhnout ostrým kontrastům osvětlených ploch a stínů). Při dokumentaci v nedostatečně osvětleném interiéru si pomáháme přísvitem. Optimální je kruhové osvětlení kolem objektivu, kterým se vyhneme tvorbě stínů na hranách objektu.

Donedávna fotogrammetrická pravidla zakazovala použití blesku. Dnes je situace jiná: při dokumentaci v podzemí jsme jednoznačně prokázali, že nové výpočetní postupy dokáží snímky osvětlené bleskem bez problému zpracovat. Výsledek z fotografií s použitím blesku byl mnohdy kvalitnější, než v případě složitěho externího osvětlování „scény“, kde se jen s obtížemi vyhneme vytváření stínů u hran objektu (Hašek, Mořkovský et al. 2013; Hašek, Šindelář et al. 2013). Doporučujeme však před zahájením vlastní dokumentace provést několik testovacích snímků a nastavit optimální výkon zábleskového zařízení.

Samostatnou kapitolou, kterou lze zařadit do fotografických pravidel, je volba samotného fotoaparátu. Obecně platí, že lze použít jakoukoliv fotografickou kameru, ale výsledky z kalibrovaných kamer (tj. fotoaparátů s pevně stanovenými prvky vnitřní orientace) jsou kvalitnější. Kamery s velmi širokým ohniskem typu rybí oko umožňují rychlé snímání malých interiérů, ale vyhodnocení je složitější a kvalita výsledných modelů je nižší pro velké zkreslení a horší kvalitu obrazu v rozích snímků. Velmi efektivní se zdá být aktuálně testovaný



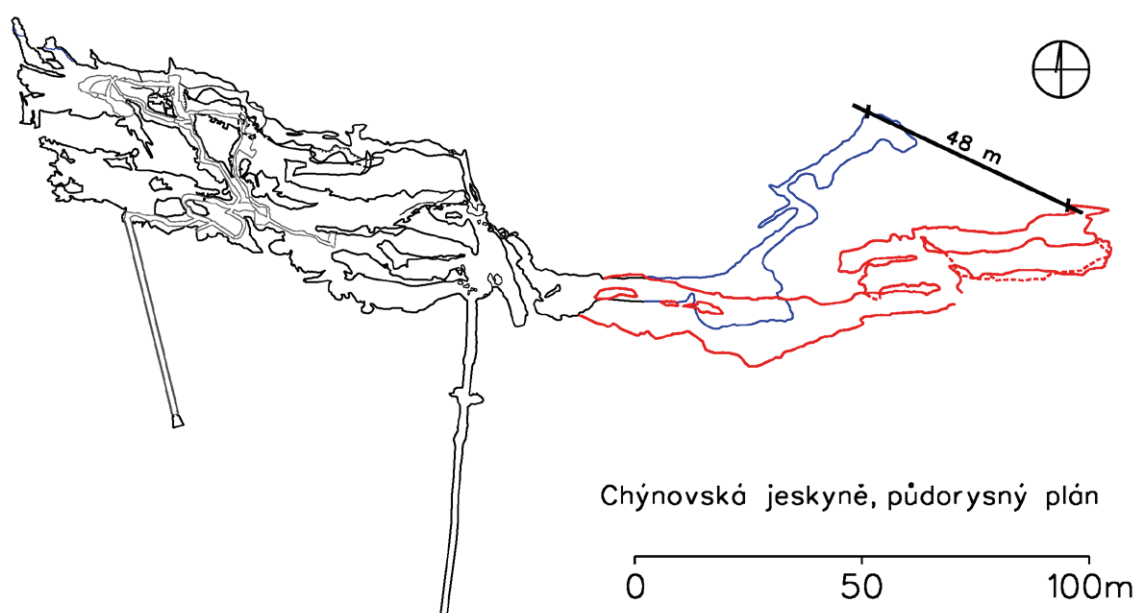
Obr. 14. Nové zpracování fotogrammetrického projektu ze 70. let 20. století z archeologického výzkumu v trase dálnice D5 u Berouna (Archeologický ústav AV ČR, Praha): a – snímky z tzv. švédské věže (se shodnou osou záběru, dle požadavků pro stereofotogrametrii); b – finální model i s vypočtenými fotografickými stanovisky; c – finální model s kontrolně odečtenými body; střední chyba nového modelu nepřekračuje hodnotu 3 cm proti dochované měřické dokumentaci.

Fig. 14. New processing of a photogrammetric project from the 1970s from archaeological research on the route of the D5 motorway by Beroun (Institute of Archaeology of the CAS, Prague): a – images from the so-called Swedish tower (with the same axis of the image, according to the requirements for stereophotogrammetry); b – final model including the computed photographic viewpoints; c – final model with control points deducted; the medium error of the new model does not exceed 3 cm against the preserved surveying documentation.

postup s použitím 360stupňové kamery. Do výpočtu nevstupují fotografie, ale 360stupňové panoramatické snímky. Jedná se o relativně nový postup, který je zatím ve fázi testů. I při použití technologie 360stupňových panoramat je však nutné vytvořit celou sérii záběrů z různých stanovišť. Z jednoho panoramatického snímku není možné zajistit mnoho metrických dat.

Vedle nasnímáním sady fotografií doporučujeme ještě pořídit pomocný videozáznam celé situace. V relativně krátké době tak může operátor zajistit obrovské množství obrazového materiálu, a to s jednou výhodou. Videozáznam totiž jednoznačně uchovává informaci o pohybu operátora v prostoru. Při pořizování série jednotlivých záběrů se může (hlavně u prostorově členitějších celků) stát, že dokumentátor zapomene nasnímat nějakou část celku. Tu potom můžeme při zpracování nahradit vybranými snímky z videa. Videogrammetrie jako nová měřická metoda v památkové péči byla na území ČR vůbec poprvé použita právě autory této studie (Šindelář 2014, Šindelář 2016a). Vznikla v podstatě jako nouzové řešení při dokumentaci rozsáhlých archeologických lokalit (hradiště Mikulčice-Valy) prostřednictvím bezpilotních prostředků. Díky jednoznačně kontrolovatelnému pohybu dokumentátora v prostoru lze takto nejen doplňovat při výpočtu snímky z míst, kde bylo opomenuto pořízení fotografií, ale použít i jako dokonalou kontrolu výpočtu z obrazové korelace (tj. fáze orientace vstupních snímků). Pokud do výpočtu zařadíme pravidelnou sadu snímků z videozáznamu (např. jeden snímek z každé vteřiny videa), můžeme

vypočtená stanoviška kamery zkontrolovat jednoduchým algoritmem na test trasování. Takováto jednoduchá početní metoda například velmi pomohla při řešení obtížného projektu videogrammetrického mapování zatopené jeskyně (3D dokumentace zatopené části Chýnovské jeskyně 2018–2019; Šindelář, Krejča 2019) (obr. 15, 16). Použití videozáznamu (jako nedílné součásti obrazové dokumentace výzkumu) má ještě jednu velkou výhodu a obrovský potenciál již v blízké budoucnosti. V rámci uvedeného NAKI projektu jsme zahájili práci na zavedení vícesnímkového algoritmu s vysokým rozlišením, který zajistí vytvoření obrazu s velmi kvalitním rozlišením detailu, a to sloučením série surových snímků z videozáznamu. Většina běžně používaných fotoaparátů a kamer je vybavena pouze malými senzory, což významně omezuje prostorové rozlišení pořizovaných snímků. Použití různých barevných filtrů (CFA) ještě dále snižuje jejich poměr signál – šum. Nechali jsme se proto inspirovat výzkumníky z firmy Google, kteří od roku 2019 začali zavádět do firemních telefonů tuto obrazovou analýzu (Handheld Multi-Frame Super-Resolution), a vytvořili jsme vlastní postup skládání série snímků z videozáznamu a tvorby nového obrazu s lepším rozlišením. Poprvé jsme tuto metodu využili při nedestruktivním výzkumu a dokumentaci nepřístupné hrobky Jana Jiřího ze Švamberka v Poběžovicích v roce 2018 (Šindelář 2018a). Díky nové obrazové analýze se podařilo identifikovat ty nejmenší detaily na portrétním obraze z víka sarkofágu Jana Jiřího a rozpoznat zlatý řád, kterým byl Švambersk dekorován (obr. 17, 18).



Obr. 15. Mapování Chýnovské jeskyně. Markantní ukázka rozdílu mezi fotogrammetrickým zpracováním správně (červeně) a nevhodně pořízených dat (modře). Odchyłka mezi oběma variantami v tomto případě činí 48 m.

Fig. 15. Mapping of Chýnov Cave. A striking example of the difference between the photogrammetric processing of correctly (in red) and incorrectly obtained data (in blue). In this case the deviation between the two variants is 48 m.

3.3. Organizační pravidla ve fotogrametrii

Samotná sada fotografií nestačí k vytvoření měřické dokumentace. Vedle nasnímání objektu je potřeba také zajistit, aby byly série snímků v budoucnu správně ztotožnitelné s konkrétním objektem nebo situací. Ke každé sadě fotografií je důležité připojit kvalitní náčrt, z něhož je patrné, o jaký objekt se jedná, jaké

je jeho okolí, jaká je situace při fotografování (postup fotografování, stanoviska, čísla snímků) a z nějž vyplývá jednoznačná identifikace vlčovacíh bodů, případně kontrolních měř, horizontál a svislic. Vedle náčrtu se nám osvědčilo zaznamenání protokolů se všemi doplňkovými informacemi (datum provedení dokumentace, podrobné údaje o objektu nebo o dokumentované situaci, odkaz na uložení snímků



Obr. 16. Ukázka jednotlivých fotografických stanovisek z jednoho stereopáru kamer. Postavení kamer umožňují výpočet kontrolního trasování.
Fig. 16. Example of the individual photographic viewpoints from a single stereopair of cameras. The positioning of the cameras enables control routing to be calculated.



Obr. 17. Portrét Jana Jiřího ze Švamberka na víku jeho rakve. Snímek z průzkumné sondy, která provedla průzkum a dokumentaci nepřístupné švamberské hrobky.

Fig. 17. Portrait of Jan Jiří of Švamberk on the lid of his coffin. Image from a survey probe, which was used to research and document the inaccessible Švamberk tomb.



Obr. 18. Praktické využití vicesnímkového algoritmu s vysokým rozlišením. Detailní snímek části malby na víku rakve Jana Jiřího ze Švamberka. Díky speciálnímu algoritmu se podařilo získat z videozáznamu s omezeným rozlišením mnohem ostřejší snímek a rozpoznat řád, kterým je Švamberk dekorován.

Fig. 18. Practical use of a high-resolution multi-image algorithm. Detailed image of part of a painting on the lid of the coffin of Jan Jiří of Švamberk. The special algorithm allowed a much sharper image to be obtained from a lower-resolution video recording, thus enabling us to identify the order with which Švamberk is decorated.

apod.). Před ukončením terénní části fotogrammetrické dokumentace je vhodné provádět kontrolu všech dat, tj. zkontrolovat pořízené snímky, úplnost a správnost všech zaznamenaných údajů a zkontrolovaná data správně archivovat a zálohovat.

Organizační pravidla považujeme za velmi důležitou součást celého projektu. Moderní přístroje a metody (laserové skenery, totální stanice, dálkoměry, tzv. fotoskenery apod.) jsou na pečlivost práce, pochopení teoretických základů geometrie a kontrolu práce výrazně náročnější, než nástroje tradiční. Chyba, která při použití takové techniky vznikne, je zpravidla špatně dohledatelná a mnohdy neopravitelná. Problémům lze předejít právě organizačně správně nastavenými kontrolními mechanismy a správnou volbou výstupů z projektu. Proto do organizačních pravidel zařazujeme ještě otestovanou a v mnoha projektech ověřenou podobu celkových (komplexních) výstupů z fotogrammetrické dokumentace archeologické situace nebo památkového objektu (viz např. Šindelář 2009, Šindelář 2014, Šindelář 2016b, Šindelář 2019b, Veselý 2014; infografika 2).

4. Dokumentace movitých předmětů

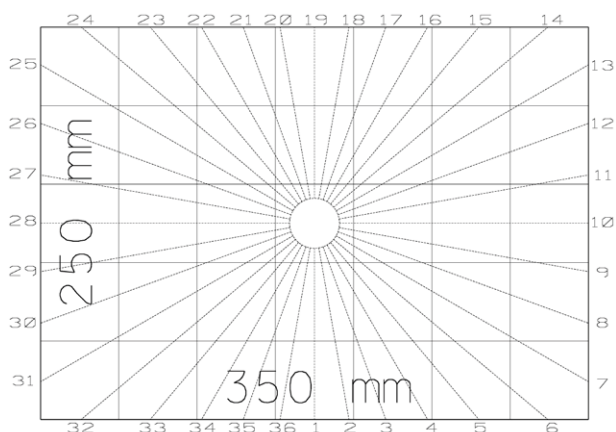
Stejně postupy a pravidla jako pro dokumentaci celé archeologické situace nebo složitého a prostorově členitého nemovitého objektu platí pro dokumentaci jednotlivých artefaktů. Variabilitnost konkrétních postupů při dokumentaci drobných předmětů je námětem samostatných studií (např. Šindelář 2016b, Šindelář 2016c, Šindelář 2018b). Na tomto místě uvedeme pouze základní poznatky a zkušenosti, ke kterým jsme dospěli při realizaci projektu „Obrazový digitální archiv mikulčického náleзовého fondu – DAM“ (Archeologický ústav AV ČR, Brno; Strategie AV21; 2018–2019). Při pořizování fotodokumentace, která má následně posloužit k metrickým analýzám u artefaktů, platí všechna výše uvedená geometrická, fotografická a organizační pravidla (viz infografiky 1, 2). V případě mikulčických artefaktů jsme hledali cestu, jak výrazně urychlit sběr dat, neboť šlo o rozsáhlý soubor drobných předmětů, zejména šperků (řádově stovky předmětů). Proto jsme ověřovali možnost automatizace některých částí procesu. Přitom se ukázalo, že v případě drobných předmětů je velmi nepohodlné (a časově neúsporné) měnit stanoviště kamery; mnohem efektivnější je měnit polohu objektu. Z toho důvodu jsme předmět položili na otočnou podložku propojenou s ovládním kamery. Následně jsme sestrojili prototyp automatizované fotografické točny, která po prvním a základním nastavení sama provede nasní-

Infografika 2

- 1. Předání nejen výsledných produktů (plánů, 3D modelů), ale i kompletní prvotní dokumentace** (tj. všech originálních vstupních fotografií a videozáznamů, náčrtů a skic s měřickými údaji, seznam souřadnic a identifikace vlíčovacích bodů).
- 2. Vytvoření technické nebo průvodní zprávy.** Účelem textové části dokumentace je poskytnutí informací
 - o důvodech a okolnostech vzniku dokumentace
 - o všech odchylkách od běžných norem a dalších skutečnostech, které mají vliv na srozumitelnost a využitelnost výstupů v budoucnu
 - o použitém přístrojovém a softwarovém vybavení
 - o použitých metodách
 - o dosažené přesnosti ve výpočetní fázi projektu
- 3. Vytvoření vlastních výstupů z projektu (plánů, modelů atd.).** Výstup by měl být ve formátu požadovaném odběratelem, a pokud je to možné, tak i ve formátech běžných pro daný typ dokumentace v daném časovém horizontu
- 4. Kontrola výsledných dat.** Tím rozumíme zajištění a jednoznačné prokázání kvality výstupních dat. Za kvalitu výstupních plánů (případně modelů) ručí vždy dokumentátor a zpracovatel výpočetní fáze projektu. Rozhodně se vymezujeme proti závěrečnému doporučení některých autorů měřických metodik, že má objednatel dokumentace počítat s jistou částkou na honorář odborníkům, kteří budou provádět přezkoušení a kontrolní měření. Taková cesta je pouze a jen slepou uličkou. Kdo potom bude provádět kontrolu těch měřičů, kteří prováděli kontrolní měření a dále práci kontrolních měření na již jednou zkontrolovaných plánech kontrolních měřičů? Takto nelogickému a zvrácenému postupu se vyhneme jednoznačně definovaným výstupem s protokolárně doloženými výsledky a požadovanou zodpovědností vedoucího měřické dokumentace.

mání celé série snímků (již bez dalšího zásahu operátora). Pro dokumentaci předmětů o velikosti řádu decimetrů se ukázalo být optimální položení objektu zájmu na předem definovaný marker, který zajistí informace o měřítku a natočení. Marker je připraven na papírovém archu A3 s jasně definovaným rozměrem v osách X a Y a pro kontrolu je ještě dělen na čtverce 5 × 5 cm (obr. 19). Od středu markeru (kam je položen před fotodokumentací objekt zájmu) jsou vyznačeny ještě pomocné přímky po 10 stupních. Tyto přímky pomohou při správném posunu a správném nastavení polohy kamera vs. předmět. Pro objemnější předměty (keramika, lebky, sochy, reliéfy, zbraně, vzorky minerálů a zkamenělin i větší šperky) bylo prakticky potvrzeno, že ideální posun na otočné podložce je právě oněch 10 stupňů (tj. 36 snímků v jedné ose předmětu). Při dokumentaci velmi drobných artefaktů (např. drobných šperků, zlomků) je možné počet snímků zahustit a posunout podložku vždy o 5 stupňů (tj. 72 snímků pro jednu osu předmětu).

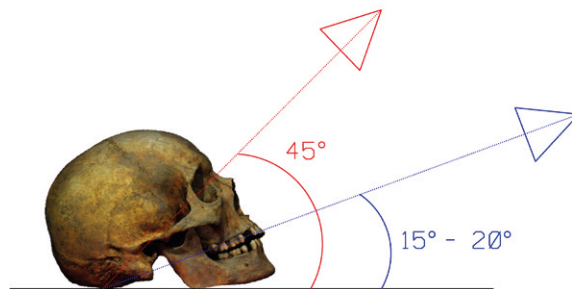
Dalším příkladem z archeologické a antropologické praxe je 3D dokumentace lidské lebky. Pozornost byla věnována definování jednoduchého postupu pro detailní a maximálně přesnou 3D dokumentaci lebky, aby z ní byla možná následná vědecká rekonstrukce obličeje (Batistela et al. 2017, Šindelář, Moraes 2018). Optimálním řešením je volba monochromatického pozadí. Pokud má lebka dochovanou spodní čelist, je vhodné složit obě části lebky k sobě. Nastavíme kameru s dostatečnou hloubkou ostrosti tak, aby osa záběru svírala



Obr. 19. Navržený marker (podložka) pro dokumentaci artefaktů. Podložka umožňuje rychlé určení měřítka při zpracování projektu (včetně kontrol) a obsahuje i pomocné přímky pro správné zafixování polohy kamera – objekt zájmu.

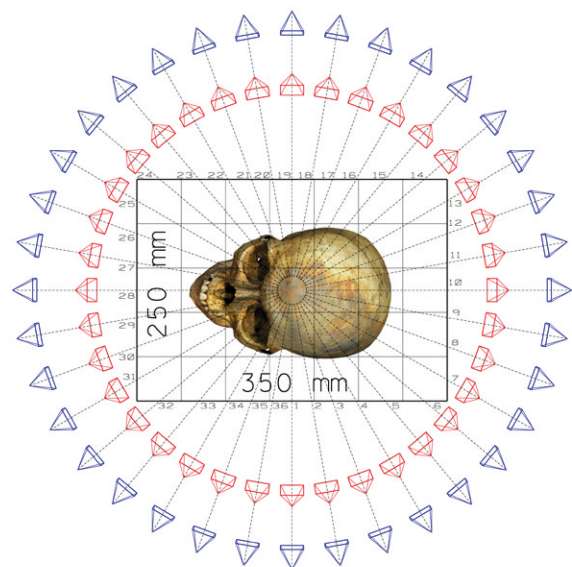
Fig. 19. Proposed marker (underlay) for the documentation of artefacts. The underlay allows the scale to be quickly determined when working on a project (including controls) and also contains auxiliary lines for properly fixing the camera position – object of interest.

s podložkou, na níž je umístěna lebka, 15–20 stupňů (obr. 20) a vytvoříme první sérii 36ti snímků (po deseti stupních). Kameru nastavíme na stativu tak, aby osa záběru svírala s podložkou 45 stupňů, a takto vytvoříme druhou sérii 36ti snímků (obr. 21). Pro popsaný postup není ani potřeba točny. Lebku můžeme postavit na papírový marker na stole, kameru umístit před



Obr. 20. Doporučená 3D dokumentace lidské lebky ve dvou výškových úrovních (Šindelář, Moraes 2018).

Fig. 20. Recommended 3D documentation of a human skull at two different heights (Šindelář, Moraes 2018).



Obr. 21. Kompletní schéma pro správnou dokumentaci předmětu (lebky). Červeně 36 snímků s úhlem 15–20 stupňů k podložce, modře série 36 snímků v úhlu cca 45 stupňů k podložce.

Fig. 21. Complete chart for the correct documentation of the object (a skull). 36 images in red at an angle of 15–20 degrees to the underlay, series of 36 images in blue at an angle of approx. 45 degrees to the underlay.



Obr. 22. Posuvné měřítko na podložce, vhodné pro rychlou dokumentaci vysokých předmětů. Posuvné měřítko v pravém úhlu umožňuje správně definovat horizontálu, svislici i délky ve všech třech osách.

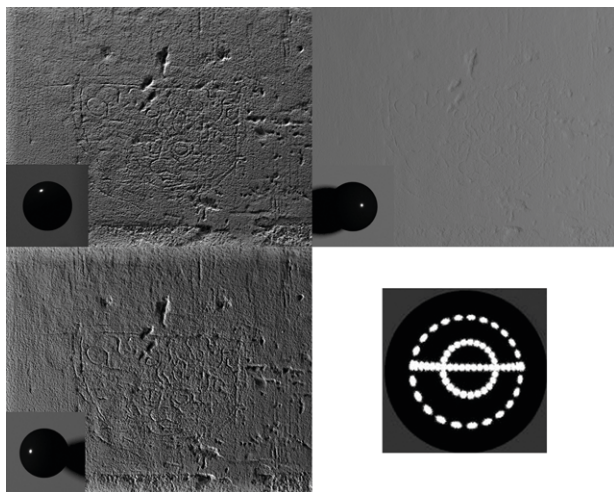
Fig. 22. Calliper on an underlay, suitable for quickly documenting high objects. The calliper set at a right angle allows the horizontal, the vertical and the lengths in all three axes to be correctly defined.

objekt na stativ a oběma rukama položenýma na stranách markeru tak může fotograf pomalu otáčet celou scénou. Protože je lebka uprostřed, bude sama fungovat jako závaží v ose otáčení a znemožní větší posun mimo centrální bod záběru. Tento postup byl vytvořen pro efektivní skenování lidské lebky, ale je využitelný pro jakýkoliv předmět podobné velikosti. Při kontrole takto dokumentovaných objektů (testováno na lebce a vzorku keramiky) s výstupem z laserového skenování jsme jednoznačně prokázali absolutní přesnost ve všech třech osách. Zjištěné odchylky se pohybovaly v řádech desetin milimetru. Pouze při dokumentaci objektu, který má výrazně větší rozměr v ose Z (tedy je výrazně vyšší, než jsou jeho délka a šířka) doporučujeme ještě definovat jednu kontrolní míru nejen na podložce, ale i do výšky. Pro takové případy jsme vytvořili speciální podložku s možností připevnění dvou posuvných pravouhlych pravítek (obr. 22).

5. Další možnosti obrazových analýz v archeologii a památkové péči

Vedle definování pravidel pro optimalizaci sběru fotogrammetrických dat jsme věnovali pozornost i dalším metodám obrazových analýz a sběru dat v terénu. Při dokumentaci drobných artefaktů (např. numizma-

tika) a maleb jsme testovali zobrazovací techniku RTI (Reflectance Transformation Imaging), která je dnes využívána v mnoha oborech. Jedná se o fotografickou metodu, která velmi dobře zaznamenává detail povrchu zkoumaného objektu a dokáže zdůraznit jeho povrchovou strukturu. Metoda RTI využívá sérii fotografií dokumentovaného objektu z konstantní polohy fotoaparátu, přičemž každá fotografie je osvětlena z jiného úhlu (Reedy 2018, Castro et al. 2019). Nejčastějším postupem v terénní části projektu je pořízení série snímků objektu, vedle něž je umístěna lesklá černá koule a pohyblivý zdroj světla. Na každém snímku je tak na povrchu koule zaznamenána informace o jedinečné pozici světelného zdroje v době pořízení fotografie. Jedná se o perspektivní metodu s potenciálem využití pro další studium povrchů historických objektů a artefaktů i rozpoznání časem setřelých reliéfů. Metoda je však časově velmi náročná ve fázi terénního sběru dat, vyžaduje speciální světelné podmínky a dokáže zachytit objekty jen do určité velikosti. Možnost vylepšení aplikace metody se však nabízí v kombinaci s již definovanými pravidly pro 3D fotogrammetrii. Při vytvoření dostatečně podrobného modelu zkoumaného povrchu je možné provádět analýzu RTI až následně, ve virtuálním prostředí. Takový postup velmi výrazně zrychluje část sběru dat v terénu, eliminuje speciální požadavky na světelné podmínky, umožňuje provádění analýzy u neomezeně velkých objektů a ve finále zkvalitňuje výstupy. Jako modelový příklad lze uvést dokumentaci dvou objektů v Katedrále sv. Víta na Pražském hradě: povrchu obrazu Máří Magdaleny a špatně čitelné rytiny masky na vnitřním triforiu katedrály (Šindelář 2019b). V obou případech byla pořízena série 40 fotografií (stereopáry + doplňující šikmé snímky) ve vysokém rozlišení. Čas potřebný pro sběr dat v terénu ani v jednom případě nepřesáhl 10 minut. Z fotodokumentace byl vytvořen 3D model ve vysokém rozlišení (mračno bodů – více než 100 milionů). Model byl následně převeden do programu Blender, v němž proběhla virtuální fáze projektu. V digitálním prostředí je na nejhodnější místo k modelu povrchu zkoumaného objektu umístěna virtuální černá koule a definován virtuální zdroj silného světla. Dalším krokem je naplánování přesné trasy pohybu světla kolem modelu s koulí a naprogramování automatického kroku ukládání jednotlivých stínových snímků ve vysokém rozlišení. Během jedné hodiny program automaticky vygeneruje 70 snímků vhodných pro analýzu RTI. Výsledný produkt dokonale dokumentuje nerovnosti plochy a zvýrazňuje (umožňuje rozpoznat) povrchovou strukturu. Jako jednoznačné výhody takto upraveného postupu v metodě RTI shledáváme obrovské zrychlení sběru dat v terénu, neomezenost velikosti zkoumaného objektu a kvalitativní posun, který je dán skutečností, že ve virtuálním prostředí dokážeme simulovat zcela přesný pohyb světelného zdroje kolem zájmové scény. Absolutní přesnost nasvícení scény a jednoznačně definované světelné podmínky ve virtuálním prostředí jsou něčím, čeho není možné při terénní dokumentaci a ručním svícení nikdy dosáhnout (obr. 23).



Obr. 23. Zpracování projektu metodou RTI ve virtuálním prostředí. Detailní model stěny s těžko čitelnou rytinou. Podle pravidel (popisovaných v této studii) byl pořízen detailní model stěny s těžko čitelnou rytinou. Ve virtuálním prostředí je k modelu stěny přiložena černá přesná koule a scéna je nasvícena z předem definovaných míst v prostoru (o poloze světelného zdroje vypovídá bílý odraz na kouli). Vpravo dole časosběrný snímek, který ukazuje polohu světla na všech pořízených snímcích, které jsou dále využity pro analýzu. Takto pravidelně se zkoumanou scénou v reálném světě nepodaří nasnímat (nebo jen s obrovskými problémy).

Fig. 23. Processing a project using the RTI method in a virtual environment. Detailed model of a wall with a scarcely visible engraving. According to the rules (described in this study), a detailed model was made of the wall with the scarcely visible engraving. In the virtual environment a precise black sphere is attached to the model of the wall and the scene is lit from pre-defined places in the space (the position of the light source is indicated by the white reflection on the sphere). The time-lapse image at the bottom right shows the position of the light on all the images taken; this data is further used for analysis. It would be impossible to shoot such a scene regularly in real light (or only with great difficulty).

6. Závěr

Předkládaná studie je celkovým zhodnocením výsledků aplikovaného výzkumu zaměřeného na hledání efektivní metodiky 3D dokumentace ve složitých podmínkách archeologického výzkumu lokality Mikulčice-Valy. Ověřené postupy a metody lze aplikovat i pro zpracování dokumentace z dalších archeologických a historických výzkumů. Po mnohaletém testování v terénu se podařilo definovat základní pravidla, která si kladou za cíl umožnit exaktní, rychlou a cenově dostupnou 3D dokumentaci jakékoliv archeologické

situace nebo objektu – nemovitého či movitého. Text současně zohledňuje relativně dlouhodobou mezioborovou diskusi na dané téma. Svým způsobem naplňuje dlouhodobou „objednávku“ odborníků celé řady historických oborů. Funkčnost předkládané metodiky je ověřena nejen v rámci mikulčického výzkumu, ale i úspěšnou aplikací na řadě dalších aktuálně zkoumaných archeologických a historických lokalit, jako jsou Pražský hrad, Kutná Hora – kostnice, hrad Orlík u Humpolce, předrománské kostely v Kopčanech a Kostolanech pod Tríbečom (oba na Slovensku), nebo arménských lokalit Mastara a Lernagog. Vedle primárního zaměření na dokumentaci archeologických výzkumů byla metodika v posledních dvou letech použita při dokumentaci řady památkově chráněných objektů doma (katedrála sv. Víta na Pražském hradě, klášter Milevsko, klášter Želiv, hrad Bečov nad Teplou, hrad Orlík u Humpolce, kostel sv. Jana Nepomuckého na Zelené hoře u Žďáru nad Sázavou, historické jádro města Tábor) i v zahraničí (Státní opera v Curychu, bazilika sv. Jakuba v Řezně, starověký Kamiros v Řecku, Asparn v Rakousku, stavební památky v Arménii).

Studie je výsledkem projektu Ministerstva kultury NAKI II *Virtuální vědecký model velkomoravských Mikulčic jako systém interaktivní dokumentace, prezentace a archivace dlouholetého systematického archeologického výzkumu* (č. DG18P02OVV029).

Literatura

- Batistela, G. C., Moraes, C., Miamoto, P. 2017:** Comparison of live photogrammetry 3D digitizing systems of applied to Forensic Anthropology and Forensic Dentistry. *Revista Brasileira de Odontologia Legal* 4(3), 24–33.
- Bezděk, L., Frouz, M. 2014:** *Digitální a digitalizovaná fotografie pro vědecké účely v praxi památkové péče*. Odborné a metodické publikace 46. Praha: Národní památkový ústav.
- Bláha, J. 2016:** *Průzkum a dokumentace památek lidové architektury*. Rožnov pod Radhoštěm: Valašské muzeum v přírodě v Rožnově pod Radhoštěm.
- Borba, E. Z., Montes, A., Lopes R. D., Zuffo, M. K., Kopper R. 2017:** Itapeva 3D: Being Indiana Jones in virtual reality. IEEE Virtual Reality 2017, March 18–22 2017, IEEE VR, Los Angeles, poster session B. Abstrakt dostupný online: <http://www.ieeevr.org/2017/program/posters.html#Poster%20Session%20B> [2019-08-20].
- Brejcha, M., Brůna, V., Frouz, M., Frouzová, M., Marek, Z., Větrovská, B. 2015:** *Metodika 3D dokumentace a vizualizace interiérů památkových*

- objektů. Odborné a metodické publikace 75. Ústí nad Labem: Národní památkový ústav, územní odborné pracoviště v Ústí nad Labem, Filozofická fakulta Univerzity Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem.
- Bruno, F., Lagudi, A., Gallo, A., Muzzupappa, M., Petriaggi, B. D., Passaro, S. 2015:** 3D documentation of archaeological remains in the underwater park of Baiae. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W5*, 41–46.
- Břicháček, P. 1981:** A rich grave of the Roman period at the site of Beroun-Závodí. In: Hrala, J. (ed): *Archaeological news in the Czech socialist republic. X^e congrès international des sciences préhistoriques et protohistoriques, Mexico 1981*. Prague, Brno: Archaeological institute of the Czechoslovak academy of sciences, Prague section, 127–128.
- Castro, Y., Pitard, G., Goic, G. L., Brost, V., Mansouri, A., Pamart, A., Vallet, J. M., De Luca, L. 2019:** A new method for calibration of the spatial distribution of light positions in free-form RTI acquisitions. Abstract. *Optics for Arts, Architecture and Archaeology VII, Session 10: 3D Surface Analysis* [online]. SPIE. Optical Metrology, June 24–26 2019, Munich, Germany. [cit. 2019-09-02]. Dostupné z: <https://spie.org/eom/conferencedetails/optics-for-art-architecture-archaeology?SSO=1>.
- De Luca, L., Busayarat, Ch., Stefani, Ch., Véron, P., Florezano, M. 2011:** A semantic-based platform for the digital analysis of architectural heritage. *Computer and Graphic* 35, 227–241.
- Frolík, J. 2016:** Záchranný archeologický výzkum u kostnice v Sedlci u Kutné Hory. *Záchranný archeologický výzkum u kostnice v Sedlci u Kutné Hory*. Rkp. nálezové zprávy. Uloženo: Archeologický ústav AV ČR, Praha.
- Hašek, V., Mořkovský, T., Šindelář, J., Tomešek, J. 2013:** A non Destructive Survey of Tombs in the Chapel of St. Barbara of Modla Hill (Catastral district of Buchlovice). *Anthropologia integra* 4(1), 13–20.
- Hašek, V., Šindelář, J. 2015:** Nedestruktivní průzkum pro stanovení možných příčin vzniku vlhkosti zdiva kostela Nanebevzetí Panny Marie ve Strážnici. *Jižní Morava* 51, 407–412.
- Hašek, V., Šindelář, J., Unger, J., 2013:** Nedestruktivní archeologie při výzkumu hrodek v Čechách. *Anthropologia integra* 4(2), 15–28.
- Hodač, J. 2004:** Jednoduché metody měřické dokumentace malých památkových objektů. *České památky. Časopis pro přátele památek a historie*, 2004(1), 5–7.
- Khalaf, A., Ataiwe, T., Mohammed, I., Kareem, A., Al-Attar, T. S., Al-Neami, M. A., Abdul-sahib, W. S. 2018:** 3D Digital modeling for archeology using close range photogrammetry. *MATEC Web of Conferences* [online]. 162 [cit. 2019-07-27]. DOI: 10.1051/mateconf/201816203027. ISSN 2261-236X. Dostupné z: <https://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/201816203027>.
- Maříková-Kubková, J., Bravermanová, M., Kováč, A., Křivánek, R., Měchura, P., Šindelář, J., Šindelářová, M., Vácha, B., Vandělík, J., Mrlina, J. 2005:** Předběžná zpráva o průzkumu staré královské hrobky v chóru katedrály sv. Víta na Pražském hradě. In: J. Maříková-Kubková (ed.): *Castrum Pragense* 6. Praha: Archeologický ústav AV ČR, Praha, 99–104.
- Maříková-Kubková, J., Herichová, I. 2009:** *Archeologický atlas Pražského hradu, díl 1. Katedrála sv. Víta – Vikářská ulice*. Castrum Pragense 10. Praha: Archeologický ústav AV ČR, Praha.
- Pavelka, K. 2003a:** *Fotogrammetrie 10*. Praha: Vydavatelství ČVUT.
- Pavelka, K. 2003b:** *Fotogrammetrie 20*. Praha: Vydavatelství ČVUT.
- Pierdicca, R., Frontoni, E. Malinverni, E. S., Colosi, F., Orazi, R. 2016:** Virtual reconstruction of archaeological heritage using a combination of photogrammetric techniques: Huaca Arco Iris, Chan Chan, Peru. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage* [online]. 3(3), 80–90 [cit. 2019-06-15]. DOI: 10.1016/j.daach.2016.06.002. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212054816300224>.
- Poláček, L. 2014:** Velkomoravská sakrální architektura – nové výzkumy, nové otázky. In: P. Kouřil a kol.: *Cyrlometodějská misie a Evropa – 1150 let od příchodu soluňských bratří na Velkou Moravu*. Brno: Archeologický ústav AV ČR, Brno, 66–72.
- Reedy, Ch. L. 2018:** Reflectance Transformation Imaging (RTI) in Conservation. In: S. L. López Varela (ed.): *The Encyclopedia of Archaeological Sciences* 3. Chichester, Malden: Wiley Blackwell, 1–6.
- Santos, P., Ritz, M., Fuhrmann, C., Fellner, D. 2017:** 3D mass digitization: A milestone for archaeological documentation. *Virtual Archaeology* 8(16), 1–11. Dostupné online: <https://polipapers.upv.es/index.php/var/article/view/6321/7701> [2019-06-15].

- Sokol, P., Havlice, J., Knechtová, A., Kypka, J., Laval, F., Neustupný, Z., Stránská, R., Tišrová, R., Tomášek, M., Vitula, P. 2017:** *Metodika terénní prostorové identifikace, dokumentace a popisu nemovitých archeologických památek*. Odborné a metodické publikace 91. Praha: Národní památkový ústav.
- Šindelář, J. 2006:** Využití digitální fotogrammetrie při dokumentaci maleb. *Technologia Artis* 5, 82-85.
- Šindelář, J. 2009:** Kompletní digitální dokumentace památky – kostel sv. Juraja v Kostolanoch pod Trábečom. In: J. Maříková-Kubková, P. Baxa (eds.): *Monumentorum Tutela. Ochrana pamiatok 21*. Praha: Pamiatkový úrad Slovenskej republiky, Archeologický ústav AV ČR, Praha, 205–214.
- Šindelář, J. 2014:** *Podrobná geodetická dokumentace vnějšího pláště katedrály sv. Víta na Pražském hradě*. Rkp. geodetické dokumentace. Uloženo: Archiv Odboru památkové péče Kanceláře prezidenta republiky, Praha.
- Šindelář, J. 2015a:** *Nedestruktivní průzkum podzemí kostela sv. Václava v Dobrušce*. Rkp. nálezové zprávy, č. j. C-201559656. Uloženo: archiv Archeologického ústavu AV ČR Praha.
- Šindelář, J. 2015b:** Průzkum nepřístupného podzemí kostela v Dobrušce a nová technologie speleologického mapování. In: *Zpřístupněné Jeskyně 2015. Ročenka Správy jeskyní České republiky*. Průhonice: Správa jeskyní České republiky, 69–71. Dostupné také z: <https://static.caves.cz/data/media-manager/attachments/rocenka/rocenka-2015-web.pdf>.
- Šindelář, J. 2016a:** 3D skenování ve speleologické praxi. In: *Zpřístupněné Jeskyně 2016. Ročenka Správy jeskyní České republiky*. Průhonice: Správa jeskyní České republiky, 62–63. Dostupné také z: <https://static.caves.cz/data/media-manager/attachments/rocenka/rocenka-caves-2016-web.pdf>.
- Šindelář, J. 2016b:** *3D dokumentace Českých korunných klenotů*. Rkp. odborné zprávy. Uloženo: Archiv Odboru památkové péče Kanceláře prezidenta republiky, Praha.
- Šindelář, J. 2016c:** *3D dokumentace Závěšova kříže*. Rkp. odborné zprávy. Uloženo: archiv Cisterciáckého kláštera ve Vyšším Brodě, Vyšší Brod.
- Šindelář, J. 2018a:** Objev a průzkum hrobky Jana Jiřího ze Švamberka. In: *Zpřístupněné Jeskyně 2018. Ročenka Správy jeskyní České republiky*. Průhonice: Správa jeskyní České republiky, 62–65. Dostupné také z: <https://static.caves.cz/data/media-manager/attachments/rocenka/rocenka-sjcr-2018-web-def.pdf>.
- Šindelář, J. 2018b:** *3D dokumentace Relikviáře sv. Maurara*. Rkp. odborné zprávy. Uloženo: Archiv Národního památkového ústavu, územního odborného pracoviště v Ústí nad Labem, Bečov nad Teplou.
- Šindelář, J. 2019a:** *Posouzení 3D dokumentace formou pozemního laserového skenování Španělského sálu na Pražském hradě*. Rkp. odborné zprávy. Uloženo: Archiv Odboru památkové péče Kanceláře prezidenta republiky, Praha.
- Šindelář, J. 2019b:** *Podrobná 3D dokumentace vybraných plastik vnitřního triforia v katedrále sv. Víta na Pražském hradě*. Rkp. odborné zprávy. Uloženo: Archiv Odboru památkové péče Kanceláře prezidenta republiky, Praha.
- Šindelář, J., Břicháček, P. 2019:** *3D modelace nálezové situace – Knížecí hrob z Berouna-Závodí*. Rkp. odborné zprávy. Uloženo: Západočeské muzeum v Plzni.
- Šindelář, J., Krejča, F. 2019:** Nová metoda mapování trvale zatopených prostor v NPP Chýnovská jeskyň. *Ochrana přírody* 2019(1), 21–24. Dostupné také z: <http://www.casopis.ochranaprirody.cz/vyzkum-a-dokumentace/nova-metoda-mapovani-trvale-zatopenych-prostor-v-npp-chynovska-jeskyne/>.
- Šindelář, J., Moraes, C. 2018:** *Rekonstrukce obličejů sv. Zdislavy z Lemberka podle lebky*. Rkp. odborné zprávy. Uloženo: Římskokatolická farnost, děkanství Jablonné v Podještědí.
- Veselý, J. 2014:** *Měřická dokumentace historických staveb pro průzkum v památkové péči*. Odborné a metodické publikace 49. Praha: Národní památkový ústav, územní odborné pracoviště Střední Čechy.
- Waldhäusl P., Ogleby, C. 1994:** 3 × 3 Rules for simple photogrammetric documentation of architecture. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* XXX(5), 426–429.
- Zollhofer, M., Siegl, C., Vetter, M., Dreyer, B., Stamminger, M., Aybek, S., Bauer, F. 2016:** Low-Cost Real-Time 3D Rekonstruktion of Large-Scale Excavation Sites. *Journal on Computing and Cultural Heritage* 9(1), 1–20.

Resumé

The major boom in computing hardware and digital technologies around the world in recent years has probably had an impact on every area of human life. Therefore, nowadays it is no longer a problem to apply the latest findings and technological procedures in the

study, protection and restoration of cultural heritage. The effective use of digitisation procedures in practice in documenting sites of cultural, historical and scientific value is thus becoming a matter of course. During the last four years mathematicians and surveyors have worked together to develop a new methodology for photogrammetric documentation. A number of computer programs have been written that use image correlation to create 3D models from a series of photographs of the building to be documented.

The fact that certain software is now relatively easy to work with and user-friendly is not necessarily always a benefit when creating precise surveying documentation. Using new computer software and modern instrumentation without an understanding of the theoretical bases of mathematics and geodesy can have a highly adverse impact on the result of the planned documentation. To eliminate the negative impact of the incorrect use of 3D photogrammetry the authors of this study have decided to generalise and publish the recommended methodology for photographic documentation in archaeological practice, heritage conservation, etc. After all, practical archaeology lacks any detailed guide or list of rules for the correct procedures to be followed in this area. The topicality of this issue is emphasised by an entire series of professional articles, from the Czech Republic and abroad, which focus on the application of “3D photogrammetry” in archaeology and heritage conservation. There is therefore an evident need for a clear and adequately detailed definition of the basic rules for how to correctly go about collecting data for use in modern digital photogrammetry (and also for use in the future), including in the international context.

For these reasons we present the methodology developed over the last two years by the Institute of Archaeology of the CAS, Brno, in Mikulčice. One of the tasks of the NAKI applied research project “Virtual scientific model of Great Moravian Mikulčice: a system of interactive documentation, presentation and archiving of long-term systematic archaeological excavations” is to seek the most effective means of creating interactive field documentation. For the needs of the project the authors summarised and further developed on their many years’ experience with detailed 3D documentation of various archaeological situations at the site, the remains of historical buildings and actual artefacts. In doing so they formulated a series of rules and recommendations for how to correctly take photographic documentation during the course of archaeological research. The results are summarised in this study.

This photographic documentation can subsequently (or further in the future) be used for the purposes of image analysis and to create precise surveying documentation. All the technological processes and methodical recommendations presented here have

been repeatedly tested and successfully applied during archaeological rescue excavations at Mikulčice-Valy. The individual procedures used to collect surveying data in the field as described below have proven to be not only highly effective (i.e. yielding information that is sufficiently detailed and as precise as possible while considerably saving on time and money), but also timeless. This is because the proposed field documentation procedures are not linked to the latest software products, but offer the potential for new (better) surveying analyses in the future. Naturally, the result is conditional upon good quality photographic documentation being taken during the field research.

As part of the project the use of various technologies was tested for the 3D documentation of archaeological probes, the remains of historical buildings, works of art and artefacts. From conventional geodetic measurements (trigonometry, the polar method, the orthogonal method, etc.) through to GNSS (global navigation satellite systems) positioning to photogrammetry and other image analyses. These tests served as the basis for defining the most effective form of detailed 3D documentation in archaeological practice: multi-image photogrammetry with the option of further digital image analyses from the photographs taken. The advantages of this method are the precision of the resulting model, coupled with the fact that it is affordable and user-friendly (with no special skills needed), and also that it is readily and easily usable in various environments while documenting a wide variety of sites (from entire localities, through complex stratigraphy using a probe to individual artefacts). Nowadays classic photogrammetry has expanded to include videogrammetry, which significantly refines and streamlines the process of documenting archaeological or heritage sites.

If we consider multi-image photography as recommended above to be the most effective form for creating detailed 3D documentation in archaeological practice, this does not mean it is the most precise method. Taking the amount of detail and precision of the resulting model as our main criteria, the absolute “winner” as far as the technologies we have tested are concerned seems to be a combination of laser scanning and multi-image photogrammetry. However, a laser scanner is very expensive and so hardly affordable for the needs of routine archaeological work. It also requires a very skilled person to operate it.

Following clearly defined geometric, photographic and organisation rules when taking photographic documentation can greatly improve the accuracy of future surveying outputs. These rules define the right procedure to follow when taking photographs, i.e. how to photograph the building we are interested in and what has to be physically measured on the site. The way in which a site is photographed for documentation purposes

es should never be arbitrary or random. It is definitely not enough to take any old series of photographs without giving it careful thought. Moreover, it is almost certain that in the future new mathematical procedures will enable even more information to be extracted from the images than we can possibly imagine now.

The same procedures and rules for documenting field archaeological situations or a complex building with a number of spatial variations also apply for the photographic documentation of individual artefacts. Under the project entitled “Digital Image Archive of the Mikulčice Find Collection – DAM” (Institute of Archaeology of the CAS, Brno; Strategy AV21; 2018–2019) specific procedures were verified for the documentation of an extensive collection of small items, particularly jewellery (hundreds of objects). A way was sought to speed up the entire data collection process. The result was the prototype of an automated photographic turntable, which after the initial basic setup is able to automatically shoot an entire series of photographs (with no further operator input required).

Another example from archaeological and anthropological practice is the 3D documentation of a human skull. Attention was given to defining a simple procedure for detailed and highly precise 3D documentation, to enable the subsequent scientific reconstruction of the face.

Other image analysis and data collection methods tested in the field include a procedure for documenting small artefacts (e.g. numismatics) and paintings using the RTI (Reflectance Transformation Imaging) technique. This is a photographic method that produces a very good record of the details of the surface of an object and is able to emphasise its surface structure. As part of our tests and the application of this method we modified our workflow, saving a considerable amount of time in the field and achieving excellent results.

The article also presents examples of the application of photogrammetry and videogrammetry in extreme conditions, such as in documenting flooded caves, where the procedure applied at Chýnov Cave in South Bohemia is one of the first similar examples of the 3D scanning of flooded caves in Europe.

The present study is an overall assessment of the results of applied research aimed at seeking an effective 3D documentation methodology in the complex conditions of the archaeological research conducted at the early mediaeval site of Mikulčice-Valy. The tested procedures and methods can also be used to process documentation from other archaeological and historical research. After many years of testing in the field we have managed to define basic rules aimed at enabling the exact, fast and affordable 3D documentation of any archaeological situation or object (building) or artefact.

Kontakty

Jiří Šindelář

Archeologický ústav AV ČR, Brno, v. v. i.
Čechyňská 363/19
CZ-602 00 Brno
sindelar@arub.cz

Lumír Poláček

Archeologický ústav AV ČR, Brno, v. v. i.
Čechyňská 363/19
CZ-602 00 Brno
polacek@arub.cz

Šárka Krupičková

Archeologický ústav AV ČR, Brno, v. v. i.
Čechyňská 363/19
CZ-602 00 Brno
krupickova@arub.cz

**BALÁZS KOMORÓCZY, MAREK VLACH, MICHAELA ZELÍKOVÁ, JOZEF SEDLÁČEK,
PAVLA RŮŽIČKOVÁ**

REVIZE STAVU ARCHEOLOGICKÝCH KOMPONENT V TRATI DRNHOLEC „HOLENICKÁ POLE“
POMOCÍ PROSPEKČNÍCH A MÁLO INVAZIVNÍCH VÝZKUMNÝCH METOD

ŠÁRKA KRUPIČKOVÁ, ESTELLE OTTENWELTER, HELENA BŘEZINOVÁ

EXACT EVIDENCES OF THE USE OF SPHERICAL BUTTONS (GOMBÍKY): TWO CASE STUDIES
FROM MORAVIAN FINDS

MICHAELA LÁTKOVÁ, MÁRIA HAJNALOVÁ, MIROSLAV HAVLÍK

GRAPE VINE AND VITICULTURE TRADITION IN MIKULČICE

PAVEL KOUŘIL, JANA GRYC

CZECH SILESIA IN THE EARLY MIDDLE AGES

ALEKSANDRA PANKIEWICZ

AN ATTEMPT TO IDENTIFY PLACES ASSOCIATED WITH TRADE AND EXCHANGE
IN EARLY MEDIEVAL STRONGHOLDS IN THE EXAMPLE OF OSTRÓW TUMSKI IN WROCŁAW

PAVEL ŠLÉZAR, KAREL FALTÝNEK

ROMÁNSKÝ KOSTEL SV. PROKOPA V LOŠTICÍCH. PŘÍSPĚVEK K POČÁTKŮM MORAVSKÉ ŠLECHTY

JIŘÍ ŠINDELÁŘ, LUMÍR POLÁČEK, ŠÁRKA KRUPIČKOVÁ

DOPORUČENÁ METODIKA FOTODOKUMENTACE V ARCHEOLOGII PRO NÁSLEDNÉ METRICKÉ
ANALÝZY OBRAZU

