

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta filozofická

Disertační práce

**MODERNÍ DOKUMENTAČNÍ METODY
ARCHEOLOGICKÝCH FAKTŮ**

Mgr. Jindřich Plzák

Plzeň 2016

Západočeská univerzita v Plzni

Fakulta filozofická

Katedra archeologie

Studijní program - Archeologie

Studijní obor - Archeologie

Disertační práce

**MODERNÍ DOKUMENTAČNÍ METODY
ARCHEOLOGICKÝCH FAKTŮ**

(Aspekty trojrozměrného digitálního prostředí v
archeologii na příkladech s movitými a nemovitými
památkami)

Mgr. Jindřich Plzák

Školitel:

Doc. PhDr. Pavel Vařeka, Ph.D.

Katedra archeologie

Fakulta filozofická Západočeské univerzity v Plzni

Plzeň 2016

Prohlašuji, že jsem práci zpracoval samostatně a vyznačil jsem použité
prameny tak, jak je to ve vědecké práci obvyklé.

V Plzni dne 8. prosince 2016

.....

processing
archaeology presentation
examples potential
several well illustrated
thesis data
described
three-dimensional projects basic environment
new both archaeological
possible virtual digital technologies
methods documentation options
modern

Na tomto místě bych rád poděkoval především své manželce, že to se mnou během celého studia vydržela a doufám, že i nadále vydrží. Pak děkuji svému synovi, za neustálé dožadování si hrát a samozřejmě také celé své rodině za velkou podporu, kdykoliv jsem potřeboval.

Obsah

1 ÚVOD	7
1.1 Temporální transformace tématu a cílů	8
1.2 Nástup nových technologií a jejich „hype“ fenomén	14
 I. ČÁST PRÁCE	
2 UPLATNĚNÍ TROJROZMĚRNÝCH TECHNOLOGIÍ V ARCHEOLOGII A PAMÁTKOVÉ PÉČI	19
2.1 Ochrana a záchrana památek	19
2.1.1 Buddhové z Bámijánu	20
2.1.2 Hrobky bugandských králů v Kasubi.....	21
2.1.3 Artefakty z Mosulského muzea	22
2.1.4 Náměstí Durbar v Káthmándú	23
2.2 Aplikace 3D digitálních technologií při archeologickém výzkumu, dokumentaci a vyhodnocení dat	24
2.3 Možnosti prezentace a vizualizace archeologických dat	25
3 SOUČASNÝ STAV APLIKOVÁNÍ MODERNÍCH TROJROZMĚRNÝCH METOD VE SVĚTĚ.....	25
3.1 Významné archeologické výzkumy a organizace ve světě	26
3.1.1 Çatalhöyük.....	26
3.1.2 Carnuntum	26
3.1.3 Projekt CyArk.....	27
3.1.4 The Discovery Program	28
3.1.5 Zamani Project	28
3.1.6 Cultural Heritage Imaging (CHI)	29

3.2 Významné archeologické výzkumy a památkové péče v České republice	29
3.3 Významné odborné konference o trojrozměrných digitálních technologiích upotřebitelné v archeologii a památkové péči	30
3.3.1 Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Conference (CAA).....	30
3.3.2 Conference on Cultural Heritage and New Technologies (CHNT).....	31
3.3.3 International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS).....	31
3.3.4 Počítačová podpora v archeologii (PPA / CAA CS).....	31
3.3.5 Digi - Digitální technologie a kulturní dědictví.....	32
3.4 Příklady virtuálních muzeí a digitálních 3D sbírek.....	32
3.4.1 Website Sketchfab.....	33
3.4.2 Vlastivědné muzeum v Šumperku	33
3.4.3 Moravské zemské muzeum Brno - Ústav Anthropos.....	34
3.4.4 Regionální muzeum v Českém Krumlově.....	35
3.4.5 Virtual Hampson Museum	35
3.4.6 Archeologické 3D virtuální muzeum	36
4 TEORETICKÉ ASPEKTY	36
5 TROJROZMĚRNÉ DIGITÁLNÍ DOKUMENTAČNÍ METODY ARCHEOLOGICKÝCH FAKTŮ	38
5.1 Přehled metod pro získání trojrozměrných digitálních dat....	39
5.2 Vybrané metody aplikovatelné pro digitalizaci archeologických objektů	45
5.2.1 Fotogrammetrie	46
5.2.1.1 Stereoskopie	52
5.2.1.2 Průseková fotogrammetrie	55

5.2.2	Obrazová korelace (image-base modeling).....	56
5.2.3	PTM a RTI fotografické digitální snímkování.....	57
5.2.4	Trojrozměrné skenování.....	58
5.2.4.1	Triangulační skenování.....	61
5.2.4.2	Dálkové pozemní skenování.....	64
5.2.4.3	Letecké laserové skenování.....	66
6	TECHNICKÉ VYBAVENÍ PRO TROJROZMĚRNOU DIGITALIZACI	67
6.1	Dostupné přístroje pro skenování nebo digitalizaci.....	68
7	SOFTWARE	80
7.1	Editační a vizualizační programy.....	81
7.2	Speciální programy pro trojrozměrná archeologická data	82
8	OPRÁVNĚNÍ A PRÁVO	87
9	SBĚR 3D DAT A JEJICH PROBLEMATIKA.....	88
9.1	Metadata	88
9.2	Trojrozměrné skenování se skenery NextEngine a HandyScan VIUscan	89
9.3	Sběr dat a jejich vyhodnocení technikou obrazové korelace	101
10	OBECNÉ SOFTWAREOVÉ ZPRACOVÁNÍ 3D DAT ZE SKENERŮ	106
11	PREZENTACE 3D DAT	106
11.1	Digitální zveřejnění objektů	106

11.2	Fyzické modelování replik objektů	109
-------------	--	------------

II. ČÁST PRÁCE

12	PŘÍPADOVÉ STUDIE.....	119
-----------	------------------------------	------------

12.1 Dokumentace mincí výpočetní fotografickou metodou

RTI 119

12.1.1	Úvod	119
12.1.2	Historie vývoje a vzniku techniky RTI	120
12.1.3	Reflectance Transformation Imaging.....	121
12.1.4	Metodika tvorby a prohlížení souborů RTI.....	123
12.1.5	Produkce 3D digitálních modelů mincí	126
12.1.5.1	Rekonstrukce povrchu s využitím obyčejného stolního skeneru	127
12.1.5.2	Rekonstrukce povrchu s využitím normálové mapy z RTI	130
12.1.6	Závěr.....	132

12.2 Analýza přesnosti repliky fragmentu reliéfního kachle

12.2.1	Úvod	134
12.2.2	Analýza přesnosti	134
12.2.3	Závěr.....	136

12.3 Virtuální složení fragmentů keramiky na příkladu

renezančního keramického umyvadla.....

12.3.1	Úvod	137
12.3.2	Automatické postupy virtuálního složení fragmentů	138
12.3.3	Poloautomatické postupy virtuálního složení fragmentů.....	138
12.3.4	Manuální postupy virtuálního složení fragmentů	139
12.3.5	Shrnutí	142

12.4	Virtuální hmotová rekonstrukce artefaktu hlavy Buddhy z lokality Mes Aynak.....	143
12.4.1	Úvod	143
12.4.2	Trojrozměrná digitalizace hlavy Buddhy	145
12.4.3	Virtuální hmotová rekonstrukce	147
12.4.4	Fyzické porovnání originálu a rekonstrukce	148
12.4.5	Shrnutí	149
12.5	Vznik 3D modelu metodou obrazové korelace a vznik virtuální rekonstrukce nádoby na příkladu fotografií z Iráku	150
12.5.1	Úvod	150
12.5.2	Produkce 3D modelu z fotografií a přibližná rekonstrukce nádoby	151
12.5.3	Shrnutí	153
12.6	Trojrozměrná digitalizace a prezentace Hroznatovy mísy z Kláštera premonstrátů Teplá.....	153
12.6.1	Úvod	153
12.6.2	Hroznatova mísa.....	154
12.6.3	Trojrozměrná digitalizace	154
12.6.4	Zpracování digitálních fotografií do 3D modelu	156
12.6.5	Prezentace 3D digitálního modelu Hroznatovy mísy	159
12.6.1	Závěr.....	161
12.7	Dokumentace plošné exkavace usedlosti v zaniklé středověké vesnici Cetkov okr. Rokycany	162
12.7.1	Úvod	162
12.7.2	Příprava výzkumu před snímkováním	163
12.7.3	Snímkování výzkumu pro SfM.....	163
12.7.4	Vyhodnocení snímků a tvorba 3D digitálního modelu ..	164
12.7.5	Výstupy z 3D digitálního modelu výzkumu	165
12.7.6	Shrnutí	167

12.8	Ukázka aplikace trojrozměrné geometrické morfometrie na keramických nádobách z Calderonovy sbírky.....	167
12.8.1	Úvod	168
12.8.2	Určení keramiky.....	169
12.8.3	3D geometrická morfometrie	169
12.8.4	Metodika sběru 3D dat.....	170
12.8.5	Metoda geneze landmarks na 3D modelu.....	170
12.8.6	Statistické vyhodnocení.....	172
12.8.7	Shrnutí	173
12.9	Dokumentace mazanic a tvorba digitálních otisků dřevěných konstrukčních prvků	174
12.9.1	Úvod	174
12.9.2	Vznik digitálních otisků	174
12.9.3	Závěr.....	175
12.10	Trojrozměrná digitální dokumentace archeologických památek za využití dálkově pilotovaných létajících systémů.....	176
12.10.1	Úvod.....	176
12.10.2	Současné využívané možnosti dokumentace	177
12.10.3	Cíle dokumentace	178
12.10.4	Případová studie hradu Litice (okr. Plzeň-Město)	179
12.10.4.1	Stručná historie hradu	179
12.10.4.2	Metodiky dálkového a pozemního průzkumu .	182
12.10.4.3	Letecké laserové skenování krajiny.....	182
12.10.4.4	Tvorba digitálního modelu povrchu pomoci sběru dat s RPAS	184
12.10.4.5	Tvorba digitálního modelu reliéfu pomocí měření s totální stanicí.....	186
12.10.4.6	Porovnání a rozložení bodů reprezentujících krajinný reliéf	188
12.10.5	Případová studie hradu Dražice (okr. Mladá Boleslav).....	190
12.10.5.1	Stručná historie hradu	190

12.10.5.2	Tvorba digitálního trojrozměrného modelu hradu pomocí sběru dat s RPAS	192
12.10.6	Potenciál 3D modelu pro potřeby dokumentace architektury.....	194
12.10.7	Závěr.....	196
12.11	Zpracování dat z leteckého laserového skenování zalesněné krajiny.....	198
12.11.1	Úvod.....	198
12.11.2	Dostupnost dat leteckého laserového skenování – evropský přehled.....	199
12.11.3	Metody filtrování a klasifikování dat	205
12.11.4	Komparace metod filtrace dat	206
12.11.5	Filtrace surových dat na území mohylového pohřebiště na k.ú. Držov (okr. Písek).....	207
12.11.6	Shrnutí výsledků komparace filtračních algoritmů lidarových dat.....	214
13	ZÁVĚR A DISKUZE.....	216
14	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A PRAMENŮ.....	221
14.1	Elektronické dokumenty	239
15	SUMMARY	241
16	SOMMARIO.....	243

1 ÚVOD

Tématem disertační práce je demonstrace využití moderního trojrozměrného digitálního prostředí v archeologii a to především od základního kroku při výzkumu jako je dokumentace například nálezové situace, artefaktů, prostředí atd., až po složitější úlohy jako např. digitální rekonstrukce artefaktů, analýza povrchu, digitální skládání zlomků atd. Nejvíce ceněné je určitě využití a zapojení trojrozměrného digitálního prostředí do analýz a interpretací konkrétních otázek. Poslední krok v možnosti využití trojrozměrného digitálního prostředí se předkládá v prezentaci a publikaci dosažených výsledků v různých formách realizace.

Využíváním nejnovějších technologií a metod z řad přírodních a technických oborů vznikají v naší disciplíně nové netušené možnosti, jak pozorovat, dokumentovat, zachovávat a zaznamenávat informace a data z našich terénních, laboratorních a badatelských výzkumů. Tyto nové možnosti jsou ale zatím pro nás těžko uchopitelné a zcela nové, neumíme s nimi ještě adekvátně pracovat a využívat jejich výhody a kvality. Získaná „nová“ (většinou už digitální) data se musejí také správně zpracovat, aby byla vhodná pro naše tradiční formy zobrazení a analyzování. Blízká budoucnost patří tedy určitě vývoji a aplikaci prostředků pro vyhodnocení a vytěžení informací z těchto nových dat.

Moderní archeologické metody spadají pod nově se formující disciplínu Výpočetní archeologie neboli archeoinformatiky (*Burenhult 2002; Huggett - Ross 2004, Huggett 2013*). Termín výpočetní archeologie je většinou přiřknut komplexním matematickým metodám, které nemohou být vypočítány jiným způsobem, než jen za pomoci počítače. Do této nové disciplíny také patří práce s geografickým informačním systémem (prostorové analýzy, prediktivní modelování, analýzy viditelnosti, analýzy vzdálenosti, akumulace vody, analýzy modelu reliéfu a povrchu), statistické a matematické modelování, simulace lidského chování,

virtuální a rozšířená realita, 3D analýzy, fotogrammetrie, skenování povrchu artefaktů, 3D modelace a rekonstrukce atd.

Technologický pokrok v oblasti informačních technologií se dostal to té fáze, že nám umožňuje využívat zcela nové pohledy na dokumentační metody archeologických struktur a jejich moderní zpracování. Práce se zaměřuje především na oblast trojrozměrných metod a prostředí vhodných pro využití v archeologii. Popsány a zhodnoceny budou jednotlivé části od sběru digitálních dat, po jejich zpracování a vyhodnocení až k finální prezentaci. Konkrétně se jedná pouze o výběr několika subdisciplín z velké množiny variant digitalizace a zpracování památek a artefaktů v trojrozměrném prostředí (letecké laserové skenování krajiny, 3D skenování artefaktů malých a středních velikostí, výpočetní fotografii a 3D tisk). Výběr témat zahrnuje širokou oblast s nejvíce inovativními směry a změnami bádání v rámci české archeologie. Víceméně jsou tyto možnosti zpracování u nás možné a využívané, ale nejsou standardně a ve velké míře aplikovány v rutinní práci archeologa, který se o ně přímo nezajímá.

Představovat nebudu tradiční dokumentační metody ani jejich analýzy, zpracování dat či technický popis principů. Tradiční metody jsou takové, které se běžně využívají v archeologické praxi a jejich osvojení a zvládnutí je běžně přednášeno při studiích či archeologických praxích. Za klasické tradiční metody považuji slovní popis, deskripční systémy, databáze, kreslení, klasické zaměřování, digitální fotografování, využívání elektrooptického tachymetru (totální stanice), atd. Zmiňovat budu proto většinou metody, které se běžně nevyžívají a nevyučují v archeologické praxi. Z pohledu laika (na tento typ metody) jsou proto **nové** a **moderní**.

1.1 Temporální transformace tématu a cílů

V tématu zaměřeném na aplikaci a uplatnění technologických novinek a moderního pojetí zpracování dat, je velice jednoduché pozorovat překotný vývoj a změnu technik a metod. Časem různé

techniky zastarávají. Kvalitnějšího zpracování či vyhodnocení dat je pak možné dosáhnout zcela novou technikou či metodou. Tato časová alternace či vylepšení technologií nastává průměrně jednou ročně. Od podání projektu pro doktorské studium až po sepsání této disertační práce jsem byl v průběhu pěti let svědkem obrovské změny ve sběru a zpracování trojrozměrných dat a také celkového formování, vědeckého uznání a využívání trojrozměrného prostředí v našem oboru. Úzce zaměřené odborné informace a výsledky disertační práce proto rychle zastarávají a směrodatné jsou jen pár let od data odevzdání práce.

V počátcích byl jakýkoliv hardware či software velice drahý a úzce specializovaný pro průmyslové odvětví. O trojrozměrném prostředí a jeho využití v archeologii se už diskutovalo a prezentovalo ve světě od roku 1997 (*Gordon 1999; Astorqui 1999; Avern 2001*). Aktivní uplatnění trojrozměrného prostředí lze v České republice zaznamenat od roku 2008 (např. *Dreslerová - Frolík - Mikolášek 2008*; různé příspěvky na téma 3D na konferenci PPA¹ od roku 2008), i když první aplikace 3D laserového pozemního skeneru pro dokumentaci archeologického výzkumu v České republice bylo využito už v roce 2003 společností Archaia Brno (*Archaia*). Specialistů na 3D systémy se zkušenostmi v památkové péči či archeologii bylo velice málo a jejich role suplovali odborníci z průmyslového odvětví. Celkově byl o 3D zájem, ale neexistovaly nástroje či finančně rozumné možnosti nákupu vybavení. Velká změna nastala cca před 8 lety vývojem kvalitnějších zařízení a jejich celkového zlevnění pro většinu oborů, ve kterých mají nepopiratelné uplatnění. Druhým rozvojem v rozšíření aplikací trojrozměrného prostředí byl cca před 6 roky vývoj softwaru ve formě open source a nových softwarových algoritmů pro zpracování digitálního obrazu. Prostřednictvím volného softwaru pro zpracování neměřických digitálních fotografií za pomoci fotogrammetrie či obrazové korelace se otevřely všem badatelům možnosti uplatnění a vyzkoušení trojrozměrného prostředí pro archeologická data. Tím, jak se 3D systémy otevírají světu s čím dál

¹ Konference Počítačová podpora v archeologii

jednodušším aplikováním, jsou stále více využívány a testovány na čím dál složitějších otázkách a potřebách výzkumu.

Vývoj aplikací pro sběr a zpracování trojrozměrných dat časem umožňuje využít 3D prostředí všem, bez omezení, bez technické znalosti problematiky, bez metodiky a bez zkušeností. Získané výsledky ale většinou ztrácejí potřebnou kvalitu a jsou využívány nejčastěji pro jednoduché dokumentační počiny, které obsahují řadu chyb a pro budoucí využití je nelze plnohodnotně využít. Ovšem na druhou stranu je velice potřebné trojrozměrné prostředí zkoušet a testovat a tím je dostávat do povědomí ostatních badatelů i za cenu zisku nedostatečně kvalitních 3D dat. Je velice důležité a potřebné, abychom se stále zlepšovali, vyvíjeli a v této prudce rozvíjené disciplíně neustrnuli za ostatním světem.

Aplikací trojrozměrných dat ve výzkumu nám vznikají nové úlohy a otázky k řešení, s nimiž se musíme rozumně vypořádat. Digitální data obsahují metadata (tzv. data o datech) a je nutné je standardizovaným způsobem zaznamenávat. Je potřebné nalézt vhodné metody a postupy 3D digitalizace dle požadovaných cílů výstupu. Konečný produkt je nutné nějakým způsobem prezentovat a vizualizovat odborné a laické veřejnosti. Nasbírané velké objemy dat, je nutné adekvátně zpracovat a zjednodušit bez ztráty kvality geometrie. Na tyto dílčí nové podněty bude práce také zaměřená a bude uvedeno kompaktní východisko a doporučení.

V první části disertační práce determinuji možnosti sběru, zpracování, vyhodnocení a analyzování 3D digitálních dat. Dále se budu zabývat otázkou dostupných technologií, metodami zveřejnění 3D digitálních dat a jejich legislativou a autorskými právy. Zmíněno také bude uplatnění trojrozměrných technologií v archeologii a památkové péči se stručnou rešerší metod a projektů, týkajících se trojrozměrného prostředí. Potenciálně využitelné technologie, metody a přístroje budou přehledně uvedeny.

V druhé části disertační práce představím vybrané postupy dokumentace a zpracování dat archeologických situací na konkrétních

případových studiích a to vždy z oblasti využití trojrozměrného prostředí v archeologii. Vybraná témata jsou navzájem většinou odlišná, ale spojuje je vždy otázka aplikovaného využití trojrozměrného digitálního prostředí v archeologii. Zpracování různorodých témat je logickým řešením pro pochopení odlišných otázek jedinečných témat. Případové studie přinášejí na položené otázky odpovědi prostřednictvím zvolených metod. Témata testují vybrané metody a technologie na určitých příkladech a také řeší konkrétní výzkumné otázky. Vyhledáváním možností, ale i limitů, dojdou k obecnějším závěrům, ze kterých může další bádání čerpat a posouvat se dále.

Výčet zkoumaných témat:

Dokumentace mincí výpočetní fotografickou metodou RTI

Nepříliš známou metodou RTI budu testovat schopnost záznamu dat na velmi složitých artefaktech. Mince obsahují celou řadu mikro detailů, které jiné metody nedokáží zachytit. Otázkou také bude možnost převedení 2D informace do 3D prostředí.

Analýza přesnosti repliky fragmentu reliéfního kachle

Analýza představuje metodu porovnání odchylek, kterou jsem chtěl využít pro digitální porovnání formy (kadluby) a originálů kachlů či dlažby. Během shromažďování materiálu jsem shledal, že formy ze dřeva se na našem území prakticky nedochovaly. Jiné typy či materiály forem jsou také nevhodné, neboť analýza dosahuje velmi vysoké přesnosti a pro velké hodnoty odchylek se nehodí. Protože změna objemu hlíny při sušení a výpalu ovlivňuje velikost originálu oproti obrazu ve formě, tyto velké hodnoty odchylek celkovou analýzu zkreslují, až znemožňují. Představená proto bude jen samotná analýza.

Virtuální složení fragmentů keramiky na příkladu renezančního keramického umyvadla

Velmi často jsou v odborných textech zmiňovány možnosti digitálního skládání, které je snem všech badatelů. Otázkou je, zda je skládání reálné a jakým způsobem je řešitelné.

Virtuální hmotová rekonstrukce artefaktu hlavy Buddhy z lokality Mes Aynak

Téma bude řešit otázku práce a úpravy trojrozměrných digitálních dat (tvaru, povrchu a objemu) v trojrozměrném digitálním prostředí na příkladu digitální rekonstrukce.

Vznik 3D modelu metodou obrazové korelace a vznik virtuální rekonstrukce nádoby na příkladu fotografií z Iráku

Cílem je ukázat možnosti v řešení postprocesingu dat z míst zahraničních expedic, které nám umožní odnést si jen primární digitální informace a nikoliv hmotné artefakty.

Trojrozměrná digitalizace a prezentace Hroznatovy mísy z kláštera Teplá

Řešeny budou hlavně otázky aplikace digitálního trojrozměrného prostředí v muzeologii, jako je otázka ochrany, bezpečnosti, uchování, dokumentace a prezentace artefaktu. Na příkladu unikátního artefaktu bude představena jeho 3D digitalizace a varianty jeho prezentace široké veřejnosti

Dokumentace plošné exkavace usedlosti v zaniklé středověké vesnici Cetkov okr. Rokycany

Trojrozměrnou dokumentací větších celků v terénu budou testovány jejich odlišnosti od metody 3D dokumentace v laboratoři. Řešeny budou přidané hodnoty dokumentování metodou 3D oproti tradiční metodě.

Ukázka aplikace trojrozměrné geometrické morfometrie na keramických nádobách z Calderonovy sbírky

Ukázka zahraniční aplikace 3D geometrické morfometrie bude částečně transformovat původní záměr ve využití 3D geometrické morfometrie na profilech střepů, který z důvodu programové nedostupnosti a neexaktnosti nemohl být naplněn. Přesto ukázka předvede zajímavou metodiku zpracování.

Dokumentace mazanic a tvorba digitálních otisků dřevěných konstrukčních prvků

Na 3D dokumentování mazanic bude testována otázka tvorby digitálních otisků a možné nové prostorové náhledy na otisky.

Trojrozměrná digitální dokumentace archeologických památek za využití dálkově pilotovaných létajících systémů

Téma bude řešit otázky spojené s uplatněním dálkově pilotovaných létajících systémů (RPAS) v archeologii. Testovány budou možnosti a limity uplatnění RPAS jako nového nástroje pro dálkový průzkum Země, pro aplikaci v castellologii a to vždy se vztahem k digitálnímu trojrozměrnému prostředí.

Zpracování dat z leteckého laserového skenování zalesněné krajiny

Cílem je otestovat možnosti vlastního zpracování surových dat z LLS pro potřeby archeologie a zhodnotit potenciál dostupných filtračních algoritmů. Celá tato problematika se velice úzce dotýká digitálního trojrozměrného prostředí, které v celé práci řeším.

Aplikací trojrozměrných dat ve výzkumu nám vznikají nové úlohy a otázky k řešení, s nimiž se musíme rozumně vypořádat. Digitální data obsahují metadata (tzv. data o datech) a je nutné je standardizovaným

způsobem zaznamenávat. Je potřebné nalézt vhodné metody a postupy 3D digitalizace dle požadovaných cílů výstupu. Konečný produkt je nutné nějakým způsobem prezentovat a vizualizovat odborné i laické veřejnosti. Nasbírané velké objemy dat je nutné adekvátně zpracovat a zjednodušit bez ztráty kvality geometrie. Na tyto dílčí nové podněty bude práce také zaměřená a bude uvedeno kompaktní východisko a doporučení.

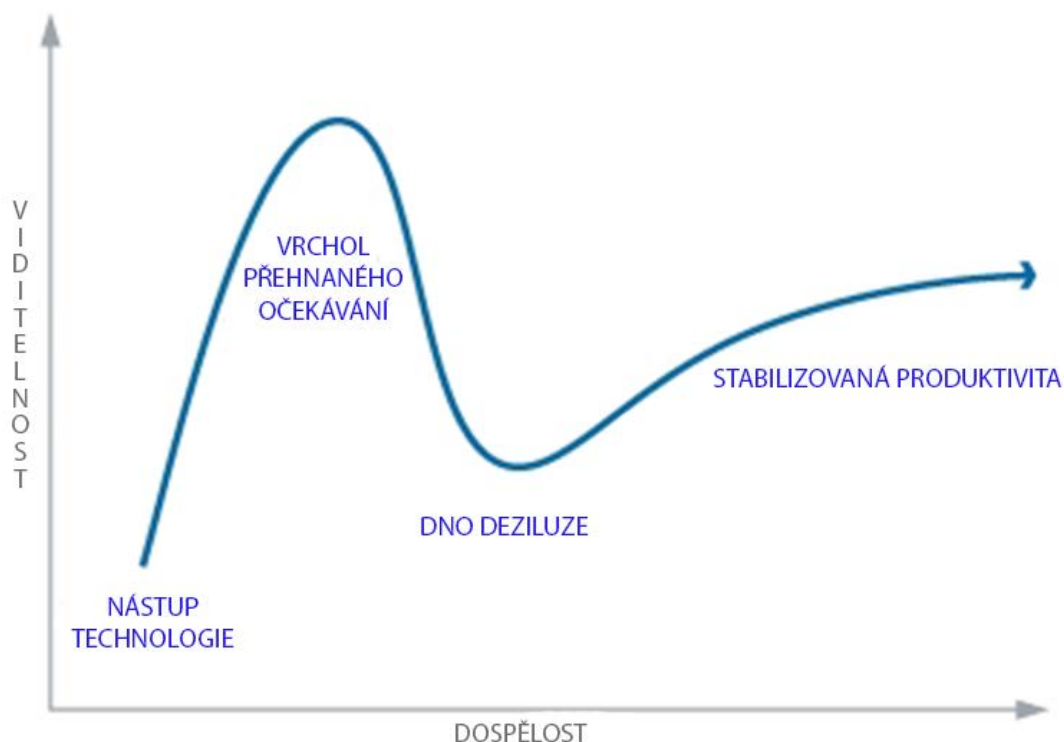
Hlavním obecným cílem je seznámení uživatele/badatele s trojrozměrným digitálním prostředím a s inovativními informačními technologiemi tak, aby věděl, jak s nimi může pracovat, jak by je měl používat, kde čerpat potřebné informace a celkově se zorientoval v 3D prostředí pro potřeby v archeologii. Nejedná se pouze o jednoduché postupy získání digitálních dat a jejich primitivní vizualizace, ale o sofistikované komplexní vědecké postupy s prvky pokročilých analýz či vyhodnocení.

1.2 Nástup nových technologií a jejich „hype“ fenomén

Světovým trendem technologií je stírání hranic mezi fyzickým a virtuálním světem. K tomuto záměru jsou potřebné nové produktivní technologie. Cesta technologie od jejího prvotního vzniku po uplatnění na trhu je velmi náročná a časově zdlouhavá. Dlouhodobou analýzou inovativních technologií se už 20. let zabývá analytická firma Gartner, která každý rok vydává tzv. Hype křivku rodících se technologií. Pojem hype představuje nadměrnou medializaci či přílišné očekávání. Analytická Hype křivka představuje vývojový cyklus inovativních technologií po finální produkt, kdy na začátku vývoje mohou nové technologie přespříliš nalákat budoucí uživatele, kteří nakonec na jejich reálné využití čekají. Graf pomáhá investorům v rozhodnutí, jakému začínajícímu atraktivnímu technologickému odvětví se mají věnovat.

Obecná hype křivka (obr. 1) má několik vývojových etap. První etapou je vznik nových revolučních technologií se zájmem médií. Druhou etapou je vrchol křivky, který reprezentuje přehnané očekávání v technologii a

největší mediální zájem o ni. Po vystřízlivění ze zklamaného očekávání následuje etapa třetí, takzvané dno deziluze. Po odstranění přehnaného očekávání a vylepšení technologie nastupuje etapa osvícení a technologie se ubírá správným směrem. Poslední etapou je produktivita technologie na trhu, kdy je sama životaschopná a má širokou použitelnost (Fenn 2008).

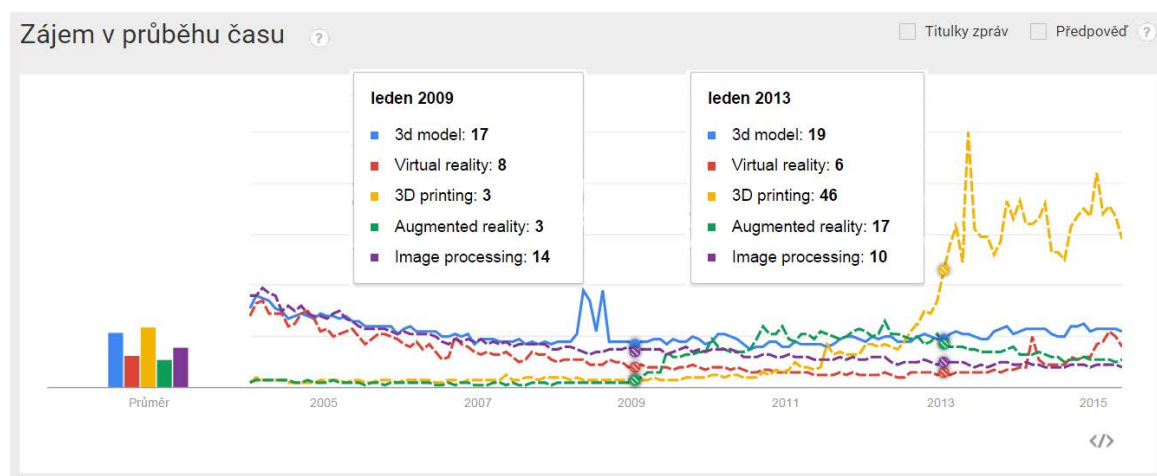


Obr. 1 Obecná Hype křivka (zdroj: Gartner).

Vzorovým příkladem věrohodnosti/korektnosti Hype křivky je reálné využití moderních technologií dokumentace v archeologii či památkové péči. Největší a nejznámější konferencí o použití počítačových metod v archeologii je od roku 1973 konference CAA (Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology). Zaměřením na publikované příspěvky o metodách 3D dokumentace a analýzou trendů z minulých konferencí CAA zjistíme, že teprve od roku 1994 se v oboru archeologie začínáme zajímat o grafiku a zpracování obrazu (Scollar 1999). V letech 1997 až 2000 se začínají objevovat první publikované články o virtuálním muzeu a trojrozměrných metodách sběru dat (Gordon 1999; Astorqui 1999; Avern 2001). V tomto časovém okamžiku od roku 1994 až 2000

můžeme mluvit o reprezentaci vývoje moderních 3D technologií využívaných v archeologii jako o první etapě znázorněné na Hype křivce. Vrcholu křivky a tedy nejvíce mediálního zájmu, přehnaného očekávání a nejvíce publikovaných článků se dospělo v následujících letech. Vrchol nastal někdy okolo roku 2011 až 2013. Poté došlo k rychlému propadu a nyní se nalzáme na dně deziluze. V letošním roce máme ovšem nakročeno do poslední etapy produktivity a uváženého využívání moderních dokumentačních technologií v archeologii.

Důležité je uvědomit si nedokonalost a nepřipravenost technologií v první fázi jejich života, kdy je o ně největší zájem a jsou nejvíce citované a publikované. Vzniklé přehnané očekávání a nadšení z revolučních možností je brzy vystřídáno zklamáním a také budoucím zanevřením na vyzkoušenou technologii, která obsahuje nedokonalé řešení, chyby, uživatelsky nepříjemné prostředí atd. Podobným způsobem lze doložit vzorec zájmu nadšení z trendů v četnosti vyhledání na internetovém vyhledávači Google (obr. 2).

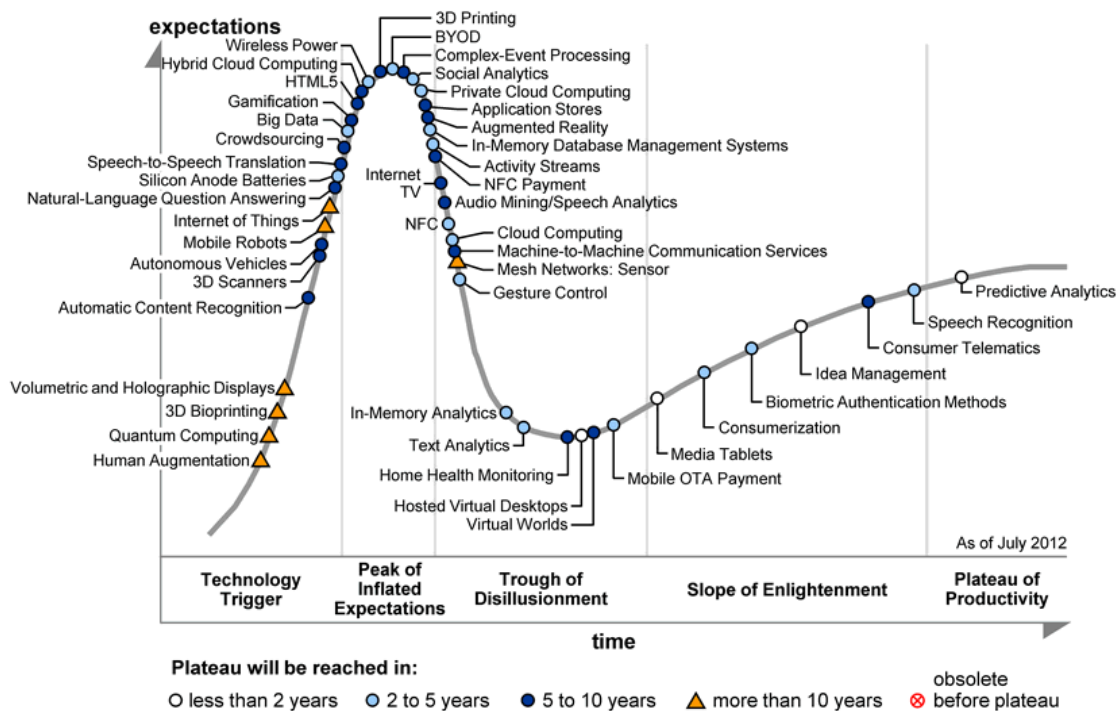


Obr. 2 Zájem o vyhledávání konkrétních trendů v čase. (zdroj: <http://www.google.com/trends>).

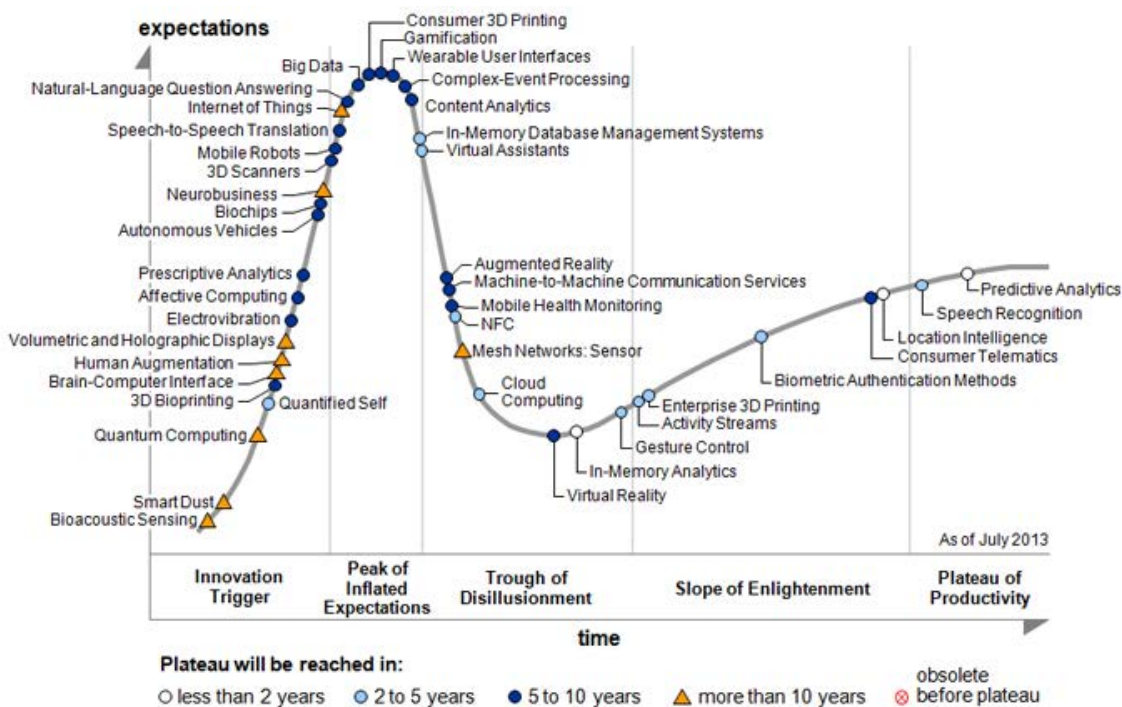
Na počátku vývoje technologie se o ní nejvíce debatuje a vzniká nejvíce odborných i popularizačních článků, které jsou odrazem ve vyhledání konkrétních klíčových slov. Postupem času se informační zájem

zmenšuje, dokud nenastane průlomová změna například ve formě nových možností uplatnění či jiných revolučních změn. Příkladem zájmu s postupným zmenšováním v celosvětovém vyhledávání je klíčové spojení zpracování obrazu (fialová barva). V poslední době je také často diskutovaným spojením rozšířená realita (červená barva), která je znovu více vyhledávaným spojením. Největší změnu v trendech vyhledávání v čase zaznamenal trojrozměrný tisk (žlutá barva), o němž se v posledních letech nejvíce diskutuje.

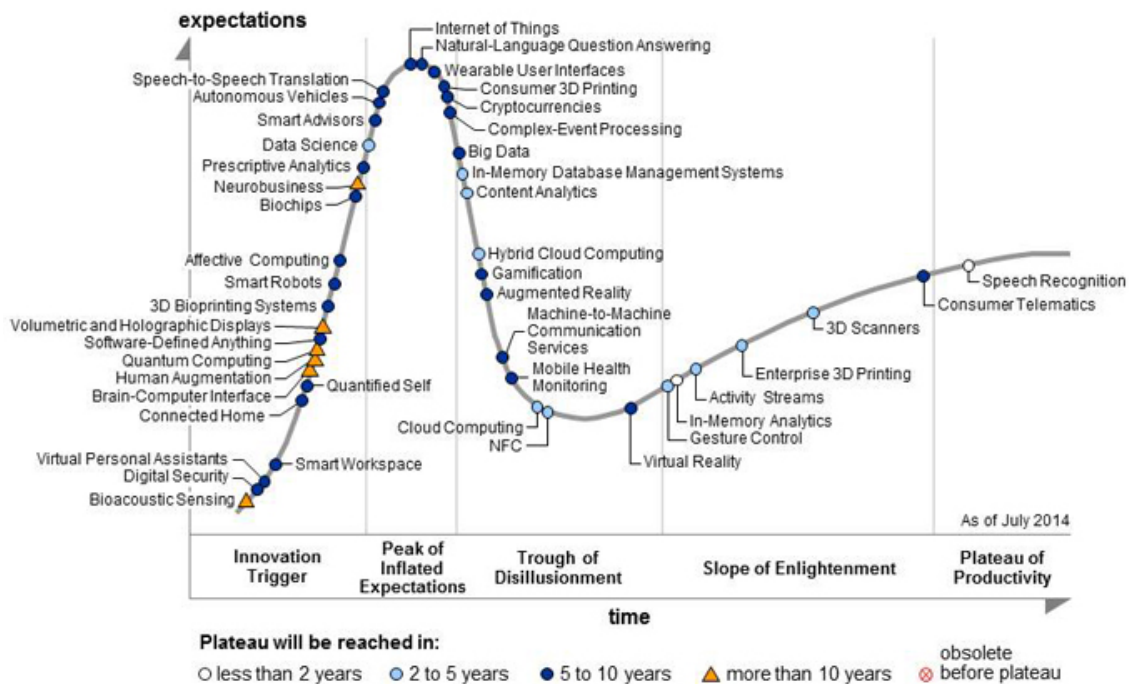
Přímým pohledem na technologie Hype křivkou můžeme spatřit postupný vývoj technologií v osvědčené produkty, které mají odbyt a mají na trhu uplatnění. Teprve v roce 2014 můžeme využívat osvědčené a v mnoha ohledech vyzkoušené 3D skenery, které opravdu produkují kvalitní data, jaká slibovaly na počátku svého vývoje. Podobným způsobem se utváří i 3D tiskárny, na které se všichni velice těšíme a využíváme zatím jejich nevyspělé varianty. Podle křivky ale budeme muset počkat ještě 5 až 10 let než se dočkáme kvalitních domácích spotřebitelských 3D tiskáren (obr. 3, obr. 4, obr. 5). Vhodným příkladem jsou 3D skenery, kterým je predikován vývoj až od roku 2012. Jejich rychlý vývoj v průběhu tří let lze spatřit dvakrát na křivce před vrcholem největšího přehnaného očekávání a naposledy už jako vyspělý systém s předpokladem největší tržní produktivity do pěti let.



Obr. 3 Publikované Hype křivky nově vznikající technologie z roku 2012. (zdroj: Gartner).



Obr. 4 Publikované Hype křivky nově vznikající technologie z let 2013. (zdroj: Gartner).



Obr. 5 Publikované Hype křivky nově vznikající technologie z let 2014. (zdroj: Gartner).

I. ČÁST PRÁCE

2 UPLATNĚNÍ TROJROZMĚRNÝCH TECHNOLOGIÍ V ARCHEOLOGII A PAMÁTKOVÉ PÉČI

2.1 Ochrana a záchrana památek

Uplatnění trojrozměrných technologií v archeologii a v památkové péči je v první řadě určitě vhodné využívat pro ochranu ohroženého kulturního dědictví. Ochrana a záchrana památek ve formě trojrozměrné digitalizace a podrobné digitální dokumentace umožní jejich zachování i budoucím generacím. Světové kulturní památky jsou ohroženy jak lidským faktorem, tak přírodními vlivy. Zničený či zrušeny mohou být během války, terorismu, žhářství, vandalismem, rozrůstáním městských aglomerací, změnou klimatu, zemětřesením, záplavami, průmyslovým a zemědělským rozvojem, těžbou surovin atd. Stručným příkladem uvedu

mediálně známé zničené památky, kterým trojrozměrné technologie mohou pomoci či již pomáhají k jejich obnově nebo záchraně.

2.1.1 Buddhové z Bámijánu

Jedná se o sochy vytesané do skály v bámijánském údolí v Afghánistánu. Sochy představují stojící Buddhy a pocházejí z 6. století. Jejich definitivní zničení nastalo v březnu v roce 2001, kdy byly skulptury Buddhů zničeny radikální vojenskou organizací Taliban, která krátkodobě ovládla většinu Afganistánu. Zničeny byly výbušninou obě sochy vysoké 55 a 38 metrů. Přes své zničení byla oblast okolo soch od roku 2003 do 2013 zapsána v Seznamu světového dědictví UNESCO (*Francioni – Lenzerini 2003*).



Obr. 6 Vlevo dva pohledy na vizualizaci 3D modelu sochy Buddhy, vpravo video mapping sochy Buddhy (zdroj: Grün – Remondino – Zhang 2004, RocketNews24)

Po zničení soch se uvažovalo o možnosti jejich trojrozměrné rekonstrukce, ke které nikdy nedošlo. Díky této myšlence se mohl institut ETH z Zürichu pokusit vytvořit trojrozměrný digitální model soch. Pro fotogrammetrické algoritmy byly využity archivní fotografie jak od badatelů, kteří navštívili sochy v předešlých dobách, tak dostupné fotografie z internetu. Díky vývoji nových fotogrammetrických výpočtů vznikl 3D model soch s přesností 1 až 2 cm (*Grün – Remondino – Zhang 2004*). V roce 2015 bylo dokonce uskutečněno dočasné promítání sochy Buddhy do původního výklenku způsobem tzv. video mapping, kdy se jedná o světelnou projekci obrazů na skutečný 3D povrch, jenž slouží jako projekční plátno (obr.6).

2.1.2 Hrobky bugandských králů v Kasubi

Hrobky králů se nacházejí v Ugandě a jsou v nich od roku 1884 pohřbeni 4 králové Bugandského království. Od roku 2001 jsou zapsány na Seznamu světového dědictví UNESCO. Královské hrobky v Kasubi jsou definovány třemi areály: Bujjabukula je historická vrátnice u vjezdu do areálu, Olugya je hlavní nádvoří a Muzibu Azaala Mpanga je bývalý palác a současná královská hrobka. Hrobka je postavena ze dřeva, proutí a stěny jsou omazané mazanicí, střecha je pokryta došky. Stavba hrobky je vysoká 7,5 metru a má kruhový půdorys o průměru 31 metrů. Zranitelnost stavby vůči požáru byla značná, a proto byla 1. února 2009 trojrozměrně naskenována institucí zabývající ochranou památek CyArk a byl vytvořen její podrobný architektonický plán (obr. 7.). Nedlouho poté 16. června 2010 byla hrobka úplně zničena požárem. Podrobné trojrozměrné naskenování a archivní fotografie pomáhají tuto stavbu znovu zrekonstruovat (*Mutinda 2014, CyArk 1*).



Obr. 7 Prolnutí mračna bodů z laserového skenování a fotografie hrobky králů před jejím zničením (zdroj: CyArk).

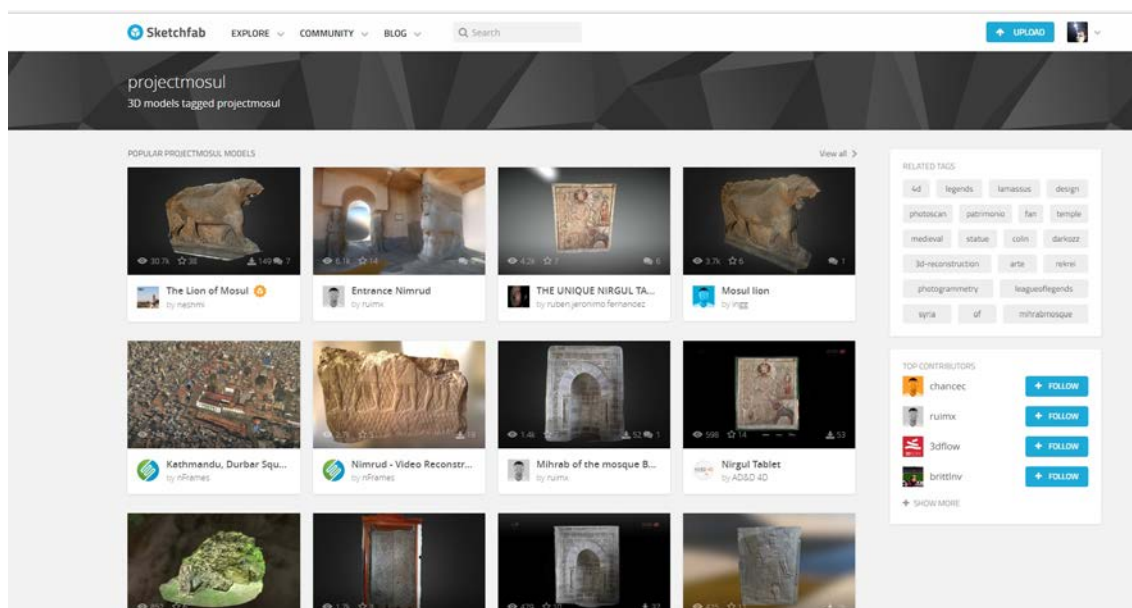
2.1.3 Artefakty z Mosulského muzea

Mediálně nejznámější obrazy destrukcí památek pocházejí z oblasti Iráku, kde je kulturní dědictví rabováno a dále rozprodáváno teroristickou skupinou Daesh (jinak také známou jako Islámský stát). Památky, které nejdou zpeněžit, či pro svoji velikost odvézt, jsou cíleně ničeny a záběry těchto činů jsou mediálně používány pro vlastní propagandu. Stejně dopadly 26. února 2015 artefakty v muzeu v Mosulu, když bylo celé město obsazeno bojovníky Daesh. Zničeny byly především sochy z asyrské sbírky, artefakty z doby římské z výzkumu města Hatry a zachovalá Nergalova brána. Přes 1500 menších artefaktů bylo už v roce 2003 pro jejich ochranu odvezeno do muzea v Bagdádu. Záběry z ničení odvysílala mezinárodní média a sociální sítě. Destrukce artefaktů z muzea byla mezinárodně odsouzená jako ničení národního dědictví (Cuno 2015).

Pokusem o záchranu zničených artefaktů vznikl Projekt Mosul², který vytváří virtuální muzeum zničených artefaktů digitální rekonstrukcí. Trojrozměrné digitální modely artefaktů jsou produkovány fotogrammetrickými metodami. Vstupními daty jsou archivní fotografie sebrané metodou „crowdsourcingové“ kampaně (sami lidé zasílají svoje fotografie a mohou se podílet na digitální rekonstrukci) od turistů, výzkumníků a především členů armády Spojených států amerických, kteří v letech 2008 a 2010 památky v muzeu dokumentovali (Rekrei). Díky spolupráci a podpoře mnoha institucí je 3D modely možné prohlížet v 3D galerii Sketchfab³ (obr. 8.).

² <https://projectmosul.org/>

³ <https://sketchfab.com/tags/projectmosul>



Obr. 8 Galerie 3D modelů Projektu Mosul.

2.1.4 Náměstí Durbar v Káthmándú

Jedná se o třetí královské náměstí v Káthmándú, které je zapsané na Seznamu světového dědictví UNESCO. Na náměstí bylo před zemětřesením v roce 2015 šest chrámů. Dva velké chrámy byly zemětřesením zcela zničeny a ostatní budovy poškozeny. K posouzení celkových škod a pro potřeby rekonstrukce byly využity letecké snímky před a po zemětřesení. Před katastrofou byly využity snímky ze systému MASC z vysoké výšky a po katastrofě bylo náměstí nasnímávané dálkově řízeným prostředkem z malé výšky. Z obou získaných souborů dat společnost nFrames vypočetla 3D digitální model náměstí a vytvořila ortofotoplán pro plánování oprav a rekonstrukcí (*dronesimaging*; obr.9).



Obr. 9 Ortofotoplan náměstí, v levé části před zemětřesením a v pravé po (zdroj: <http://www.dronesimaging.com/>).

2.2 Aplikace 3D digitálních technologií při archeologickém výzkumu, dokumentaci a vyhodnocení dat

Využívání trojrozměrných technologií při archeologickém výzkumu a dokumentaci pomáhá k lepšímu pochopení celkové interpretace zkoumaného objektu. Početnější aplikací trojrozměrných technologií se mění i tradiční pracovní postupy a více se spoléháme na získávání digitálních dat z terénu. I když tyto digitální 3D nástroje uznáváme a využíváme, tak nám stále více slouží jako vizualizace zájmového objektu pro širokou veřejnost než jako mechanismus pro samotné zpracování a vyhodnocení archeologického výzkumu.

Aplikace 3D digitálních technologií při archeologickém výzkumu nám umožňuje zaznamenat mnoho informací, které jsou pro nás nezbytné, ale možná i v tuto chvíli nadbytečné. Stále se učíme sesbíraná 3D data z terénu efektivně využívat a to i při analýzách a vyhodnocení. Trojrozměrná data jsou většinou využívána pro vizualizaci, reprezentaci a

rekonstrukci. Uplatnění trojrozměrného digitalizování má obrovský potenciál pro rozšíření archeologie o nové otázky a informace.

2.3 Možnosti prezentace a vizualizace archeologických dat

Silnou stránkou digitálních trojrozměrných dat je a vždy bude prezentace široké veřejnosti s cílem nabídnout líbeznou vizualizaci cílového objektu. Jednoduché, ale i sofistikované formy zpracování 3D dat se vždy budou snažit docílit na divákovi tzv. „wow efektu“, kdy cílem je úžas nad něčím nevidaným, nezvyklým, netradičním a tímto upoutat jeho pozornost. Tento efekt se skvěle kombinuje s archeologickými daty, které vždy samy o sobě přitahují pozornost.

Interaktivní prohlížení 3D digitálních modelů artefaktů, nálezových situací či nemovitých památek, které je nesnadné či nemožné pozorovat ve skutečném světě, je vhodné pro budování virtuálních muzeí s virtuální realitou. Fyzické prohlížení a replikování 3D digitálních artefaktů je snadno dostupné díky 3D tiskárnám. Kvalita 3D tisku se za poslední roky velice zlepšila a zlevnila a je tedy možné pořizovat kvalitní plnobarevné kopie zdigitalizovaných artefaktů.

3 SOUČASNÝ STAV APLIKOVÁNÍ MODERNÍCH TROJROZMĚRNÝCH METOD VE SVĚTĚ

Plánované uplatnění moderních dokumentačních metod v archeologii se většinou nalézá u badatelských, dlouhodobých, finančně zajištěných archeologických výzkumů. Většinou je zde ochota a možnost testovat různé nové způsoby výzkumu a porovnávat je s tradičně zažitými. Větší koncentrace uznávaných badatelů s mladými začínajícími výzkumníky také přispívá k větší otevřenosti při volbě nových postupů a k otevřenější odborné diskuzi. Další variantu v realizaci moderních postupů na výzkumech nabízí granty a soutěže, které s využitím těchto metod počítají od začátku přípravy konceptu zadání projektu. Poslední možností většího prvotního plánování moderních metod jsou záchranné archeologické

výzkumy, na nichž je potřeba počítat s efektivitou a časovou nenáročností práce v terénu.

Ve stručné formě zde představím jen několik vybraných projektů, které mne nějakým způsobem zaujaly, nebo je jejich provedení natolik kvalitní, že mají ve formě 3D prostředí, jeho tvorby a prezentací co představit.

3.1 Významné archeologické výzkumy a organizace ve světě

3.1.1 Çatalhöyük

Světově nejznámější lokalitou, kde se dlouhodobě aplikují a testují rozmanité trojrozměrné metody, je neolitické sídliště Çatalhöyük v dnešním Turecku. Lokalita byla objevena v roce 1958 a s odkryvem začal James Mellaart. Od roku 1993 je ve výzkumném týmu také Ian Hodder jako vedoucí týmu, který se začal ve výzkumu zaměřovat více na život minulé populace (*Mellaart 1975; Hodder 2004*). Při opakovaných etapách exkavace se na výzkumech vystříдалo několik letních škol a několik výzkumných institucí a projektů zaměřených na trojrozměrné dokumentační techniky. Nejkomplexnějším projektem je od roku 2009 „3D-Digging at Çatalhöyük“ vedený Maurizio Fortem z University of California. Projekt aplikuje na výzkumu a nalezených artefaktech laserové skenování, fotogrammetrii, virtuální prostředí, 3D tisk, virtuální modelování, rekonstrukce, 3D výukové modely stratigrafie a mnoho jiných podobných moderních metod (*Forte a kol. 2012; Forte 2010; Forte 2013; Forte 2014*).

3.1.2 Carnuntum

Další dlouhodobě známou lokalitou a systematicky zkoumanou jednou z nejstarších archeologických asociací v Rakousku (Gesellschaft der Freunde Carnuntums) již od roku 1885 je římský legionářský tábor a později také římské město Carnuntum v dnešním Rakousku (Bomgardner 2000). Pro svoji rozlohu se zde uplatňují především nedestruktivní

metody, jako jsou dálkový průzkum země a geofyzikální měření. Od roku 2010 se výzkumu účastní i institut Ludwiga Boltzmannova z Vídně (Ludwig Boltzmann Institute for Archaeological Prospection and Virtual Archaeology). Při terénním měření a mapování jsou využity bezpilotní prostředky, fotogrammetrie, 3D skenování, geofyzika, virtuální rekonstrukce, multispektrální snímkování atd. (srov. *Doneus 2001; Neubauer a kol. 2012; Trinks a kol. 2010*).

3.1.3 Projekt CyArk

Zakladatelem tohoto mezinárodního neziskového projektu je irácký svatební inženýr Ben Kacyra. Kacyra byl v roce 1990 u vývoje prvního skutečně přenosného laserového 3D skeneru Cyrax, který byl vyroben jeho firmou Cyru Technologies. V roce 2001 tato firma prodala veškerá práva jejich produktů firmě Leica Geosystems. Po prodeji firmy se Ben Kacyra i díky svému životnímu příběhu z války v Iráku a ničení památek rozhodl v roce 2003 založit projekt CyArk. Ten je zaměřen na digitální záchranu našeho kolektivního pokladu ve formě globálního kulturního dědictví (*CyArk 1*).

V říjnu 2013 projekt CyArk zahájil výzvu CyArk 500, která si vytkla za cíl do pěti let digitálně zachovat 500 památek z kulturního dědictví UNESCO. Ambiciózní projekt se tak digitálně pokouší zachránit památky před devastací válkou, terorismem, žhářstvím, rozrůstáním měst, změnou klimatu, zemětřesením, záplavami a dalšími hrozbami. CyArk a jeho partneři využívají nové technologie, aby vytvořili dostupnou 3D online knihovnu kulturních památek z celého světa. K tomu jsou využívány pozemní a letecké laserové 3D skenery, fotografie s vysokým rozlišením, CAD aplikace atd. Výstupem jsou 3D modely památek a jejich podrobná dokumentace ve vícero podobách, které jsou uloženy v centralizované databázi a volně dostupné skrze webový portál. Získaná ohromná množství digitálních dat jsou uložena na několika místech na vysokokapacitních médiích (magnetických páskách) s životností třiceti let a také jako data v cloudu. CyArk již má dokončeno přes 40 projektů

z celkového cíle pětiset. Jedná se především o známé památky například Pompeje, Babylon, Mt. Rushmore, Šikmá věž v Pise, Titanic, opera v Sydney, Tower of London (*Kacyra 2009, CyArk 2*).

3.1.4 The Discovery Program

Jedná se o Irskou národní archeologickou výzkumnou organizaci zaměřenou na irskou archeologii a interdisciplinární výzkum. Ve svých projektech uplatňuje a vyvíjí nové technologie v oblasti digitálního zobrazení a trojrozměrného geodetického zaměření. Organizace spolupracuje s několika výzkumnými projekty. Za zmínku stojí uvést projekt 3D-Icons, který trojrozměrně ve vysokém rozlišení zdigitalizoval 130 budov a monumentů, jako například ostrovní klášter Skellig Michael, megalitické hrobky Knowth a Newgrange, či celý krajinný celek okolo známého mohylového areálu Tara atd. Podobným projektem je i podrobné mapování a digitalizace předkřesťanských nápisů rytých do hran kamenných kvádrů. Na projektu Ogham spolupracuje i Dublinský institut pokročilých studií. Ryté nápisy jsou jedny z nejvýznamnějších národních kulturních památek Irska.

3.1.5 Zamani Project

Projekt je zaměřený na africké kulturní dědictví a kulturní krajinu Afriky. Rozvíjen byl od roku 2004 na univerzitě v Kapském městě. Zaměřením projektu je zaznamenat kulturní dědictví Afrického kontinentu využitím kombinací nedestruktivních metod dálkového průzkumu Země, 3D digitalizací a modelováním. Dokumentovány a mapovány jsou jak architektonické stavby, tak i okolní krajina. Projektová dokumentace památek slouží pro výzkum a vzdělání ostatním institucím a také pro zvýšení mezinárodního povědomí o africkém kulturním dědictví. V současnosti je 3D dokumentace používána také jako důležitý zdroj informací pro restaurování a konzervaci významných památek. Trojrozměrná digitalizace či modelování památek už proběhly v několika

státech Afriky, například v Ghaně, Mali, Kamerunu, Egyptě, Súdánu, Etiopii, Keni, Tanzanii, Ugandě, Mozambiku, Zimbabwe, Alžírsku, Abu Dhabi a v Jordánsku.

3.1.6 Cultural Heritage Imaging (CHI)

Nezisková organizace CHI⁴ se věnuje moderním technologiím pro dokumentaci světového kulturního dědictví, historickým a uměleckým dílům. Byla založena v roce 2002 a nabízí praktická školení a konzultace v nástrojích a technologii pro dokumentaci. Svůj vlastní software RTI (Reflectance Transformation Imaging) a metodiku sběru dat a jeho prohlížení volně distribuuje jako open source. Jejich školení se zaměřuje především na restaurátory, archeology, archiváře, knihovníky. Jejich vzorové projekty dokumentace jsou z oblasti petroglýfů, numizmatiky, uměleckých obrazů atd.

3.2 Významné archeologické výzkumy a památkové péče v České republice

V České republice chybí oproti vyspělým západním zemím či světově uznávaným lokalitám dlouhodobější plánovaný koncept a reálné terénní zapojení moderních dokumentačních metod. Světlou výjimkou jsou archeologické grantové projekty, které se zaměřují na chybějící metodiku, hardware a software, který z finanční podpory mohou zakoupit a aplikovat na své výzkumné otázky.

Rád bych zde proto uvedl několik projektů z programu aplikovaného výzkumu a vývoje národní a kulturní identity (NAKI). Prvním z nich je projekt „Dokumentace, digitalizace a prezentace ohroženého kulturního dědictví v příhraniční oblasti severozápadních Čech“ (číslo projektu DF12P01OVV009). V projektu se plánovalo 3D skenování artefaktů a památek v severozápadních Čechách, fotogrammetrická dokumentace,

⁴ <http://culturalheritageimaging.org/>

tvorba metodik digitální dokumentace a další jiné aktivity pro zachování kulturního dědictví v příhraniční oblasti. Druhým projektem je „Archeologické 3D virtuální muzeum. Nové technologie dokumentace a prezentace neolitického sídelního areálu“ (číslo projektu DF12P01OVV032). Projekt se zaměřil na tvorbu virtuálního muzea z 3D digitálních modelů z neolitického sídliště Bylany u Kutné Hory. Cílem projektu je rozšíření kulturního dědictví široké obci zájemců (Informační systém výzkumu, experimentálního vývoje a inovací; <http://www.isvav.cz>).

Zajímavým pilotním projektem byl také „Potenciál archeologického výzkumu krajiny v ČR prostřednictvím dálkového laserového 3-D snímkování (LIDAR)“ (číslo projektu GAP405/10/0454). Cílem projektu bylo zjistit, jaký potenciál přináší letecké laserové skenování krajiny s různě zachovanými antropogenními tvary reliéfu (*Gojda - John 2013, 21*).

3.3 Významné odborné konference o trojrozměrných digitálních technologiích upotřebitelné v archeologii a památkové péči

3.3.1 Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology Conference (CAA)

CAA⁵ konference byly vždy hybatelem v prosazení moderních technologií do archeologie. Už podle názvu je patrné, jaké je její zaměření. První konference byla uskutečněna v Birminghamu v roce 1973. Od roku 1992 se stává mezinárodní konferencí a byla pořádána mimo Velkou Británii a to každý rok v jiné pořadatelské zemi. Od roku 2006 se její konání stává světovým a je realizována na různých světadílech. CAA je stálící v oboru a udává směr a tempo prorůstání moderních postupů a technologií do archeologie.

⁵ <http://caa-international.org/>

3.3.2 Conference on Cultural Heritage and New Technologies (CHNT)

Od roku 2004 pořádá každý rok Muzeum Vídně konferenci CHNT⁶ ve Vídni. Konference je vždy tematicky zaměřená na cílový okruh v archeologii a památkové péči s aplikací nových technologií. Posledními tématy konference byly Vyhledávání, průzkum a integrace dat, Výzkum odkryvem, Správná dokumentace, Zpracování, Vztahy s veřejností a posledním tématem byla Městská archeologie a data.

3.3.3 International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)

Mezinárodní společnost ISPRS⁷ je nevládní organizace, která se zaměřuje na mezinárodní spolupráci na rozvoji a aplikaci fotogrammetrie, dálkového průzkumu Země, prostorových informačních systémů, kartografie, geodézie, geodetického monitorování životního prostředí a jeho ochranu. Dceřinou organizací je CIPA Heritage Documentation (původní název: Comité International de la Photogrammétrie Architecturale / International Committee of Architectural Photogrammetry), která se zaměřuje na aplikování technologií z měření, vizualizace a počítačové metody pro uchování a dokumentování kulturního dědictví. Od roku 1968 jsou v různých státech pořádány mezinárodní tematické konference, porady, sympozia a workshopy.

3.3.4 Počítačová podpora v archeologii (PPA / CAA CS)

Od roku 2002 se v České republice začala organizovat odborná konference, která reflektovala potřebu využívat a ovládat moderní technologie v archeologii. Konference má putovní tradici a každý rok se

⁶ <http://www.chnt.at/>

⁷ <http://www.isprs.org/>

pořádá na jiném místě. Na začátku se věnovala otázkám a problematice databází, geografickým informačním systémům atd. až po trojrozměrné technologie. Od roku 2012 se z tuzemské konference stala mezinárodní a také lokální sekce konference CAA pro Českou a Slovenskou republiku (CAA CS).

3.3.5 Digi - Digitální technologie a kulturní dědictví

Jde o nejnovější tuzemskou mezinárodní konferenci⁸, kterou organizuje v roce 2016 podruhé organizace Omnium z.s.. Konference se zaměřuje především na využití nových metod dokumentace, digitálních technologií a metod pro použití v památkové péči. Získané informace prezentuje odborné i široké veřejnosti.

3.4 Příklady virtuálních muzeí a digitálních 3D sbírek

Virtuální muzea jsou výkladní skříní úspěšně zakončených projektů zaměřených na trojrozměrnou digitalizaci kulturního dědictví. Jsou jedním z možných výstupů, jak získaná digitální data prezentovat široké veřejnosti s možnou trojrozměrnou interakcí. Exponáty jsou také více dostupné veřejnosti a odborníkům. Způsobem a technickým provedením se virtuální muzea mohou velice lišit, proto záleží na datu jejich vzniku či jejich modernizaci a údržbě. Pravá virtuální muzea či 3D galerie jsou taková, kde je možné vystavené exponáty prohlížet ve všech třech dimenzích, případně přibližovat, měnit osvětlení, prohlížet texturovaný či netexturovaný povrch exponátu, anebo dokonce provádět virtuální řezy, využívat virtuální či rozšířenou realitu a mnohé jiné přidané hodnoty náhledů pro návštěvníka. Některá virtuální muzea umožňují své zdigitalizované sbírky stáhnout a dle autorské licence s nimi zacházet. V mnoha jednodušších virtuálních muzeích je možné jen využívat interaktivní 360 stupňové prohlížení celých místností s exponáty, které

⁸ <http://www.digiheritage.cz/>

nejsou trojrozměrně zdigitalizovány, či prohlížet nafocené sety snímků okolo exponátu tzv. produktové fotografie, které navozují dojem 3D prohlížení. Virtuální muzea jsou ve světě velice rozšířená a nástupem levné a jednoduché trojrozměrné digitalizace se jejich počet zvyšuje. Pouze pro demonstraci kvality uvedu některé příklady z tuzemska a ze zahraničí.

3.4.1 Website Sketchfab

Internetová stránka Sketchfab⁹ je v současné době a v technickém provedení velkým virtuálním muzeem. Jejich technické řešení v zobrazení a sdílení on-line 3D modelů využívá mnoho institucí. Stránky jsou spuštěny od roku 2012 a nyní, v roce 2016, je odhadem využívá půl milionů uživatelů s jedním miliónem vlastních trojrozměrných modelů. Stránky obsahují samostatnou záložku kulturní dědictví. Trojrozměrné modely se zobrazují za pomoci moderního rozhraní WebGL JavaScript API. 3D data jsou uložena v cloudovém řešení SketchFab a uživatelé mohou své 3D modely sdílet s ostatními. Pro každý 3D model si mohou uživatelé Sketchfab vybrat z mnoha nastavení zobrazení modelů, existuje zde možnost stáhnutí pod licencí Creative Commons či režim virtuální reality atd.

3.4.2 Vlastivědné muzeum v Šumperku

V rámci grantového projektu bylo v roce 2016 firmou AFORTI IT s.r.o. ze sbírek Vlastivědného muzea v Šumperku¹⁰ trojrozměrně zdigitalizováno 100 různých artefaktů. Předmětem digitalizace byly např. sochy z 18. století, cínové nádoby, ale také bronzové pravěké zbraně, keramické nádoby atd. Prohlížení 3D modelů je na samostatné webové stránce, která ale pro zobrazení a práci s daty využívá služby Sketchfabu.

⁹ www.sketchfab.com

¹⁰ <http://3dsbirky.cz/vlastivedne-muzeum-sumperk/>

Každý 3D model obsahuje popis, co prezentuje artefakt a také jeho podrobnosti o původu, dataci, rozměrech, materiálu a uložení v instituci. V podrobnostech je také odkaz na eSbírký (kulturní dědictví on-line)¹¹ o zvoleném předmětu. Pro trojrozměrnou digitalizaci artefaktů byla zvolená technika na způsob SfM či vícesnímkové fotogrammetrie, protože 3D modely obsahují různé chyby, pro tyto metody specifické. Z toho důvodu je zřejmě zablokována možnost prohlížet 3D modely bez textury, které jsou vždy velice zjednodušené a obsahují malý počet fasetek v polygonové síti. Textura je velice detailní, aby tyto nedostatky zakryla, ale rovněž obsahuje chyby.

3.4.3 Moravské zemské muzeum Brno - Ústav Anthropos

Snímkování a digitalizace artefaktů proběhla už v roce 2010 za spolupráce společnosti NMS s.r.o. pro Edico sk a.s. Zdigitalizované jsou významné paleolitické artefakty (např. Věstonická venuše, loutka šamana atd.) v celkovém počtu 13 kusů. Artefakty jsou dostupné na samostatné stránce¹². Všechny artefakty je možné prohlížet jako sekvenci nasnímkovaných digitálních fotografií z různých pohledů a detailů či jako „objektová panorámata“, kdy se jedná o produktové fotografie, v nichž je možné se pohybovat po zvolené trajektorii snímání (psuedo efekt 3D) a přibližovat si objekt. Pravých 3D modelů je prezentováno pouze 9 a to výhradně jako video smyčky, které jsou umístěny na youtube kanále EdicoSK. Video prezentuje 3D modely bez textury a viditelných úprav z několika pohledů v 360 stupňové rotaci.

¹¹ <http://www.esbirky.cz/>

¹² <http://vestonicka-venusa.edico.sk/3dmodels.html>

3.4.4 Regionální muzeum v Českém Krumlově

Regionální muzeum¹³ prezentuje digitálně ve svém 3D muzeu jeden bronzový depot z Nové vsi, který byl nalezen v roce 2008. Depot obsahuje deset nákrčnickovitých hříven a dva spirálovité nápažníky pocházející ze starší doby bronzové. Digitálně je prezentován 3D model jejich uložení v in-situ a to ve formě rozšířené reality. Pro zobrazení je potřeba stáhnout příslušnou aplikaci a vytisknout marker, kde se 3D model skrze displej tabletu zobrazí.

3.4.5 Virtual Hampson Museum

Virtuální muzeum¹⁴ představuje od roku 2009 sbírky z Hampsonova archeologického muzea Arkansaského národního parku. Jedná se především o artefakty z archeologických výzkumů z lokality Nodena od původních indiánských obyvatel z údolí řeky Mississippi. Virtuální muzeum vzniklo s cílem sbírky zviditelnit a zvětšit jejich dostupnost. 3D digitální modely především nádob (celkem obsahuje 442 3D modelů artefaktů) je možné stáhnout ve třech formátech .vrml, 3D pdf a .obj v nízkém a vysokém rozlišení. Trojrozměrné prohlížení doprovází vždy popis artefaktu, video animace a možnost interaktivního náhledu stáhnutí 3D pdf. 3D modely jsou zdigitalizovány 3D laserovým skenerem, který zaznamenával i jejich texturu. Ve virtuálním muzeu jsou dostupné i podrobné informace o celé lokalitě Nodena a několik virtuálních rekonstrukcí indiánských vesnic.

¹³ <http://www.muzeumck.cz/gallery/muzeum-3d/>

¹⁴ <http://hampson.cast.uark.edu/>

3.4.6 Archeologické 3D virtuální muzeum

Tyto webové stránky¹⁵ jsou oficiálním výstupem projektu „Archeologické 3D virtuální muzeum. Nové technologie dokumentace a prezentace neolitického sídelního areálu“ a jedná se tedy o první komplexně pojaté 3D virtuální muzeum v České republice. Virtuální muzeum představuje uceleně období vzniku neolitu a zdigitalizované artefakty a rekonstrukce z dlouholetého archeologického výzkumu v Bylanech. Virtuální rekonstrukce prozkoumané lokality neolitické vesnice je možné procházet interaktivně, či je možné shlédnout virtuální rekonstrukci možné podoby výstavby dlouhého neolitického domu. Rozšířenou realitou je možné prohlížet artefakty, nálezové situace, rekonstrukce obydlí, rondelu a také přímo v in-situ (na bývalém archeologickém výzkumu) v terénu pozorovat různé fáze vývoje neolitického sídliště v Bylanech, rondel, pohřebiště v Miskovicích nebo podobu tehdejší kulturní krajiny. Zvláštní pozornost je věnována trojrozměrně naskenovaným artefaktům. Na bázi herního enginu je možné 30 vybraných artefaktů prohlížet ze všech stran. Ostatní artefakty, jako je štípaná industrie, broušená industrie, kamenné mlýny, etnografické objekty, keramika Kultury s lineární keramikou a Kultury s vypíchanou keramikou, je možné prohlížet na platformě 3D pdf či na web stránce Sketchfab (celkem je zde nahráno 906 3D modelů). Velkým potenciálem je možnost stažení 3D dat keramických nádob v zobrazení Sketchfab a to ve formátu .ply s licencí Creative Commons Public Licenses.

4 TEORETICKÉ ASPEKTY

Pro závěry a přehledy práce na toto „polo-technické“ téma je vždy směrodatné datum jejich vzniku a publikování, jelikož při současném

¹⁵ www.archaeo3d.com

rychlém vývoji mohou být za několik měsíců výsledky a možnosti zpracování zcela jiné. Prvním krokem pro jejich plnohodnotné využívání je seznámení se s novými technologiemi a vyzkoušení jejich potenciálu a limitů. Druhým krokem je testování metod na konkrétních úkolech a datech, na kterých dokážeme předem odhadnout zpracovaný odborný výsledek, či podobný úkol souběžně zpracovat tradičními metodami a poté navzájem porovnat jejich výpovědní hodnotu. Třetím krokem je využívání metod na zcela nevyzkoušených datech a materiálu, kde vzniklé výsledky plně reflektují použitou metodologii a položené výzkumné otázky.

Přirozené trojrozměrné vnímání okolního světa v trojrozměrném prostředí od narození do smrti nás předurčuje pro práci s digitálními daty také ve třech dimenzích pro určení prostoru, respektive ve čtyřech, když započítáme i čas. Nyní jsme v obecné rovině, kdy máme první možnost toto prostředí zatím v nevyspělém systému zkoušet a testovat. A můžeme si položit zatím nesložitě, ale zásadní otázky:

- Jsme dostatečně připravení na nástup nových informací?
- Jaká (trojrozměrná) data lze očekávat, jak s nimi pracovat a jak je uchopit?
- Dokážeme trojrozměrným datům porozumět a správně je interpretovat?
- Jak jsme v odborné komunitě této možnosti naklonění a jak jsme technicky připravení a zdatní, abychom plně využili potenciál nových technologií?
- Jaká je budoucnost 3D modelování a skenování v archeologii?
- Budou či jsou 3D metody dokumentace základní dovedností každého archeologa?

K zamyšlení také stojí otázka, co reprezentují trojrozměrné modely artefaktů a archeologických situací. Zdali stále vnímáme 3D modely jako prosté vizualizace originálu nebo se posouváme dál a vnímáme je jako takzvané „digitální náhrady“. Digitální náhrady zastupují dílo, které existuje fyzicky ve světě (*Olson – Caraher 2015, 5*). Kdybychom reprodukovali jen vizuální a prostorové vlastnosti objektů z reálného světa, tak je nutné, aby digitální náhrady byly tak přesné a podrobné, jak jen to je možné. V blízké budoucnosti by se měla do 3D modelu připojovat i další nasbíraná data z ostatních nedestruktivních metod, aby se doplnily chybějící fyzické vlastnosti artefaktu v digitálních náhradách.

Důležité je využívat 3D metody záznamu spíše jako legitimní analytický nástroj než jen jako prostředek k vizuální tvorbě dech beroucích efektů. V archeologickém projektu či výzkumu je zásadní nutnost předem plánovat a toto platí i při využívání 3D metod záznamu. Předem musí být naplánován jejich význam, užití a přesná role modelů, kterou budou hrát v archeologickém projektu či výzkumu. Vzniklé 3D modely musí být po skončení výzkumu životaschopné a plnit svoji předem danou funkci a účel.

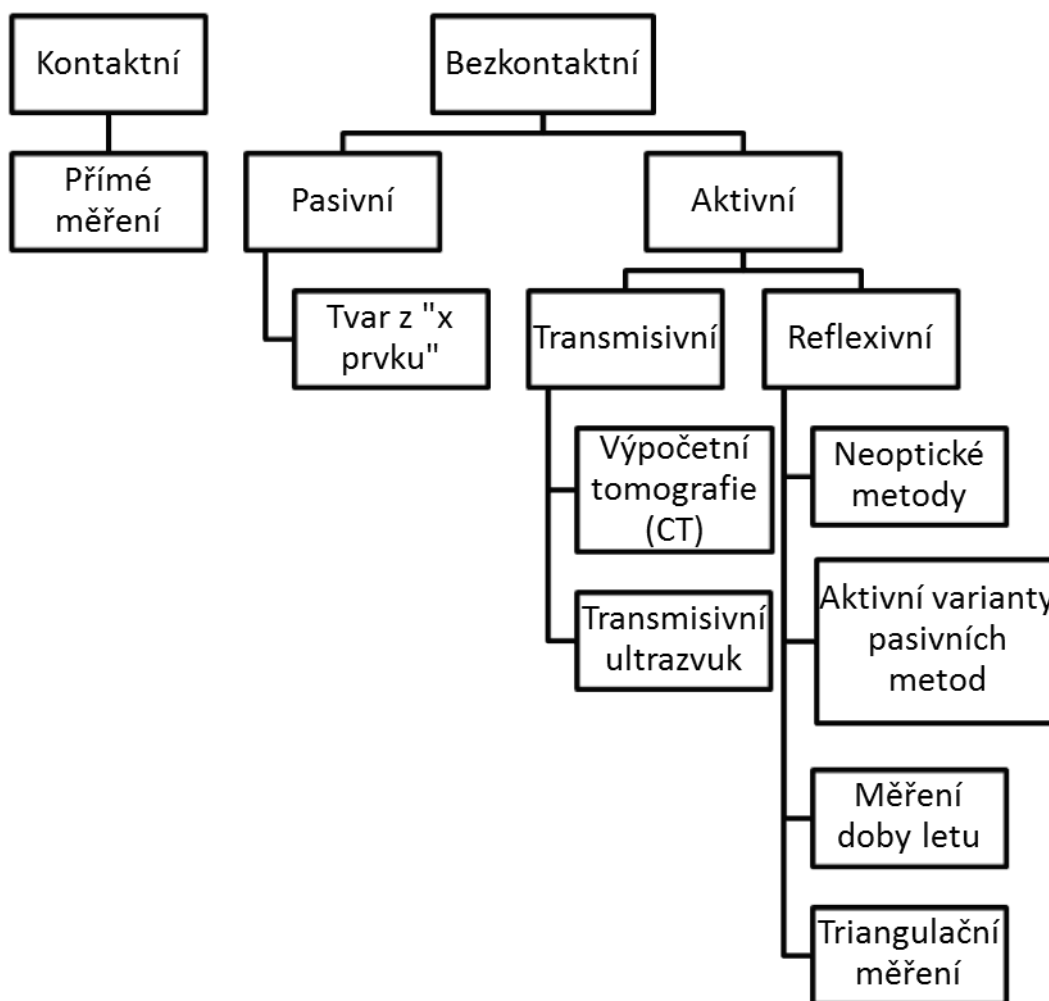
5 TROJROZMĚRNÉ DIGITÁLNÍ DOKUMENTAČNÍ METODY ARCHEOLOGICKÝCH FAKTŮ

Nové moderní technologie a metody většinou nevznikají primárně pro potřeby ochrany kulturního dědictví, archeologii a podobné oblasti. Většinou jsou od začátku zaměřeny na stavebnictví a příbuzné obory. Archeologie od nepaměti přijímá tyto odzkoušené novinky z jiných oborů a aplikuje je na své otázky a potřeby. Mám na mysli například využití stratigrafie z oboru geologie, různé chemicko-fyzikální metody datování, rozličné typy polohopisného a výškopisného měření z geodézie a využití informačních technologií jak softwarově, tak hardwarově. V případě digitální dokumentace je tento případ obdobný. Skenování bylo primárně určeno pro geodézii, stavebnictví a okrajově i pro lékařské účely. U nás bylo možné poprvé zaznamenat 3D laserové skenování v druhé polovině

devadesátých let dvacátého století, ale jeho velké komerční rozšíření přišlo až počátkem 21. století (*Pospíšil 2007, 6*). Až od roku 2010 se jeho uplatnění začalo více využívat v archeologii a v jiných netechnických oborech. Od roku 2013 se mnohem více využívá metody obrazové korelace (podobná metoda jako fotogrammetrie) díky nástupu nových algoritmů, které vše zjednodušily a urychlily.

5.1 Přehled metod pro získání trojrozměrných digitálních dat

Existuje velké množství metod a technologií jejichž prostřednictvím lze získat digitální data z trojrozměrné reality. V literatuře lze nalézt několik schémat rozdělení technologií a záleží na kritériích, kterým autoři kladou důležitost. Některé metody jsou si v principu značně podobné, ale využívají jiné varianty aplikovatelnosti. Pro systematické třídění zde proto uvedu upravené základní rozdělení (*Lanman – Taubin 2009, obr. 10*).



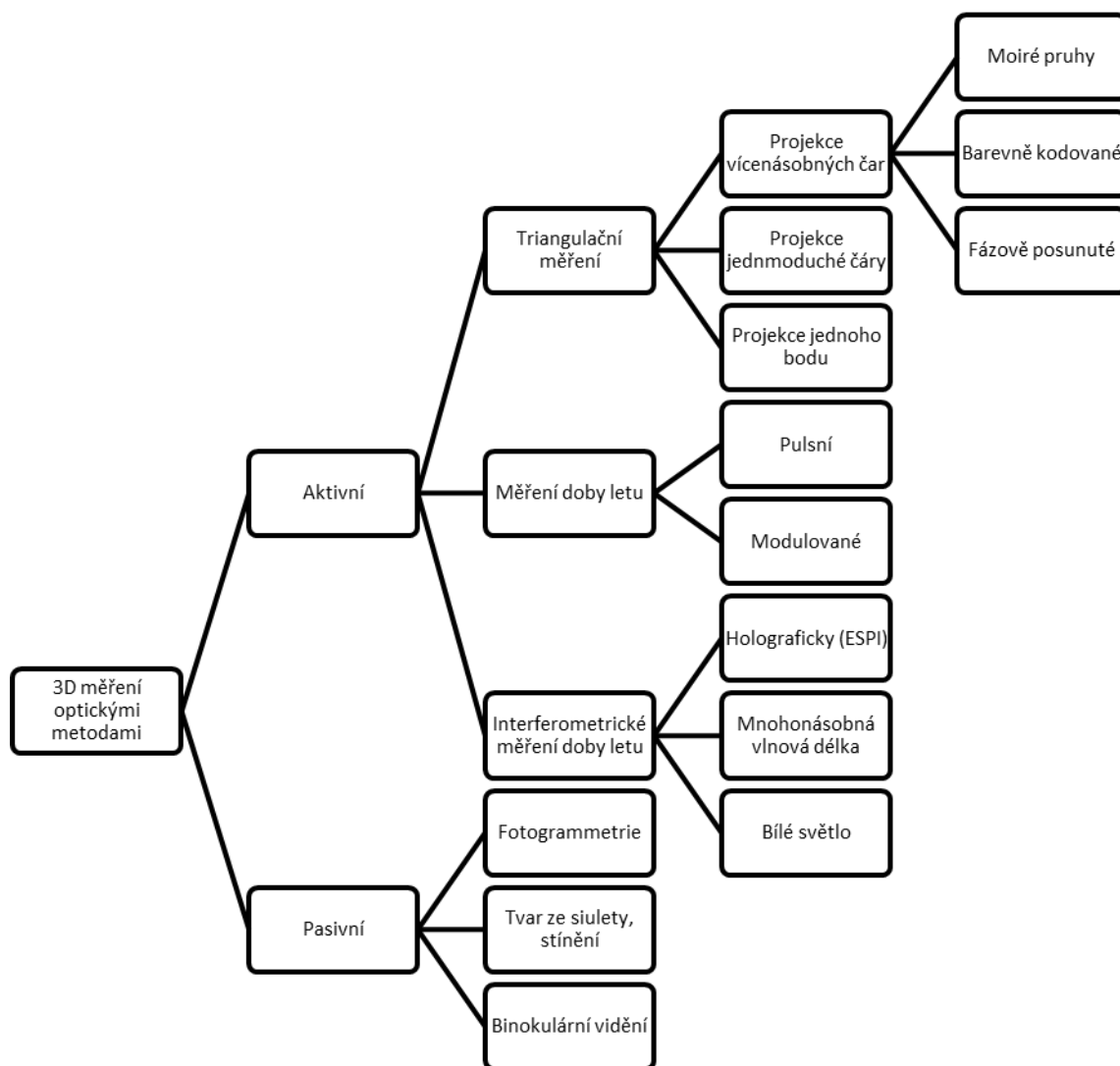
Obr. 10: Rozdělení metod dle Lanman – Taubi (upravil autor).

Základní rozčlenění do dvou skupin je určeno podle způsobu měření. Přímé kontaktní měření vychází z odečtu dvoj- či trojrozměrných veličin. Výsledkem jsou konkrétní číselné jednotky (délka, šířka, výška) nebo souřadnice bodů (osa x , y , z). Provádí se za pomoci pravítek, šupler nebo souřadnicových měřicích strojů.

Bezkontaktní měření využívá různé matematické výpočty a fyzikální zákonitosti. Bezkontaktní měření lze rozdělit na aktivní a pasivní. Pasivní použití spočívá pouze ve využití optických vlastností objektu, bez aplikace aktivních prvků či prostorové geometrie. Princip pasivního měření je využit například pro získání 3D tvaru z objektu pomocí siluety, stínování, textury, ostření/rozostření a stereo či více pohledů (Bülthoff 1994, 308-316).

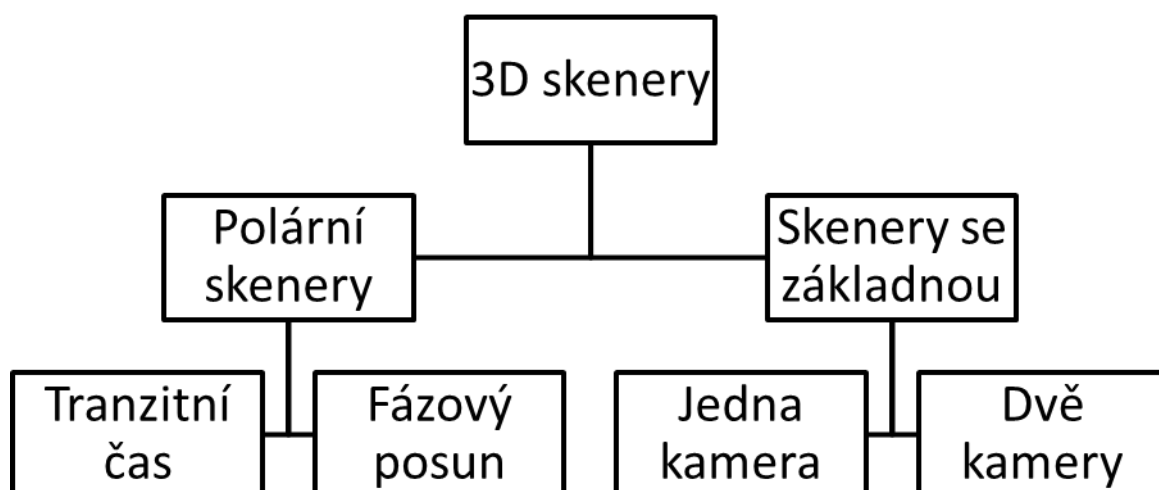
Aktivní metody jsou schematicky založeny na proniknutí (transmisi) nebo odrazu (reflexi) vlny eventuálně specifického paprsku od snímaného objektu. K transmisivnímu měření dochází například ve výpočetní tomografii (Computed Tomography) a transmisivním ultrazvuku. Mezi aktivní odrazová měření můžeme zahrnout skupinu neoptických metod, které jsou použity například v sonarech, radarech, magnetické rezonanci (Magnetic Resonance Imaging) a reflektivním ultrazvuku. Aktivní varianty pasivních metod vycházejí z podobných principů jako získání 3D tvaru objektu prostřednictvím stereo pohledu nebo zaostření/rozostření, ale navíc využívají projekci světelných vzorů na objekt (*Waschbüsch – Würmlin – Cotting – Sadlo – Gross, 2005*). Posledními dvěma metodami jsou měření doby letu paprsku a triangulační měření laserového pruhu a jeho obdoba ve strukturovaném světle.

Existuje mnoho podobných rozdělení a záleží na každém autorovi, ze které počáteční skupiny bude vycházet, jaké specifikace bude dodržovat a jaké použije příklady. Níže (obr. 11) je uvedeno podobné rozdělení jako předchozí, které však vychází z optických metod (*Pezzati – Fontana, 2008*). V tomto schématu jsou podrobněji rozdělena aktivní měření. Optické pasivní metody jsou obecně založeny na analýze obrazu z pohybující se kamery, nebo z více nasnímaných fotografií rekonstruují 3D povrch. Opticky aktivní metody většinou ozařují snímaný objekt a z deformace projektového obrazu nebo odrazu světla opět rekonstruují 3D povrch (*Godin - Beraldin - Taylor - Cournoyer - Rioux - El-Hakim – Baribeau - Blais - Boulanger – Domey - Picard 2002, Hovora 2008, 22 – 24*).



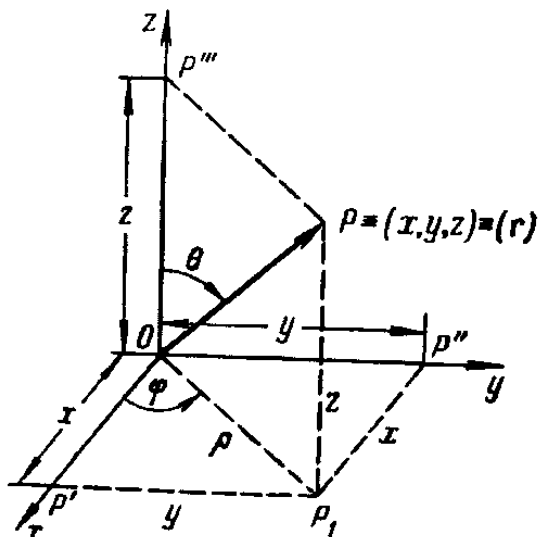
Obr. 11: Rozdělení metod dle Pezzati – Fontana (upravil autor).

Nejjednodušší rozdělení je na systémy statické a kinetické, kde statické jsou umístěny pevně na zemi a kinetické mohou být instalovány například v letadle. Dále se mohou rozdělovat podle technologického principu (Pospíšil 2007, 7; obr.12).



Obr. 12: Rozdělení metod dle Pospíšila (upravil autor).

Laserové skenery se rozdělují dle technologického principu na dvě hlavní skupiny. V první jsou zastoupena přímá měření prostorové vzdálenosti mezi zařízením a měřeným bodem, do druhé náleží triangulační 3D skenery, měřící pomocí známé základny (Pavelka 2006, 6). K získání souřadnic měřeného bodu se využívá prostorová polární metoda (obr. 13). Pro určení souřadnic bodu P je potřeba znát úhly θ , φ a délku průvodiče r . Úhly jsou získány z polohy zrcátek, které vychylují laserový svazek a délka z dálkoměru skeneru.



Obr. 13: Schematické znázornění prostorové polární metody (zdroj: Pavelka).

Podle dosahu lze rozdělit skenery do čtyř skupin: D1 až D4, kdy skupina D1 představuje velmi krátký dosah od 0,1 m až 0,2 m, D2 krátký dosah od 2 m až 10 m, skupina D3 střední dosah od 10 m do 100 m a skupina D4 s dlouhým dosahem je určena pro vzdálenost od 100 m až do stovek metrů.

S dělením podle dosahu úzce souvisí dělení podle přesnosti, neboť se s narůstající vzdáleností skenovaného objektu výrazně snižuje jeho přesnost. I toto rozdělení má čtyři skupiny P1 až P4. Nejpřesnější jsou skenery určené pro menší vzdálenosti skenování ve skupině D1 s přesností P1 0,01 mm až 1 mm. Skenery s velkou základnou nebo polární skenery s krátkým dosahem D2 mají přesnost P2 0,5 mm až 2 mm. Dále skenery se střední dosahem D3 dosahují přesnosti P3 2 mm až 6 mm. Poslední skupina s dlouhým dosahem D4 má přesnost P4 10 mm až 100 mm.

Obdobné rozdělení skenerů je dle rychlosti skenování. Rovněž je lze rozdělit do čtyř skupin. Nejrychlejší je skenování ve skupině R1 s velmi vysokou rychlostí, jenž je schopna změřit více než 50 000 bodů za sekundu. V pomalejší skupině R2 (vysoká rychlost) dochází k měření od

1000 až do 50 000 bodů za sekundu. Ve střední rychlosti R3 je měření od 10 do 1000 bodů za sekundu a v poslední skupině s nízkou rychlostí R4 lze měřit do 10 bodů za sekundu. Nejpomalejší rychlost skenování R4 využívají například elektronické tachymetry (totální stanice). Vysokou a velmi vysokou rychlost využívají skenery s polární metodou s fázovými dálkoměry, nebo s měřením délek pomocí tranzitního času.

V rozdělení metod má také nesporné místo fotogrammetrie, která je používána už více jak 150 let v mnoha rozličných oborech. Jedním z průkopníků fotogrammetrie, který také tento název poprvé použil, je Němec Albrecht Meydenbauer. Ten po roce 1893 použil měřickou fotografii k dokumentaci historických staveb (*Pavelka 2006, 11*). Fotogrammetrie byla postupně zdokonalována a s jejím využíváním se stále počítá i v dnešní době. Nové metody se kombinují s fotogrammetrií a naopak, protože každá metoda má své výhody i nevýhody.

Fotogrammetrii lze rozdělit:

- podle polohy stanoviště snímání na pozemní, leteckou a družicovou.
- podle počtu vyhodnocovaných snímků na jednosnímkovou, dvojsnímkovou (stereofotogrammetrie) a vícesnímkovou
- podle způsobu zpracování na metody analogové, analytické a digitální
- podle záznamu výstupních dat na metody grafické a číselné

5.2 Vybrané metody aplikovatelné pro digitalizaci archeologických objektů

Pro využití v archeologii se hodí pouze některé zde uvedené varianty určené k získávání digitálních dat. Ostatní metody jsou v některých případech zcela nevhodné nebo dosahují nedostatečné kvality.

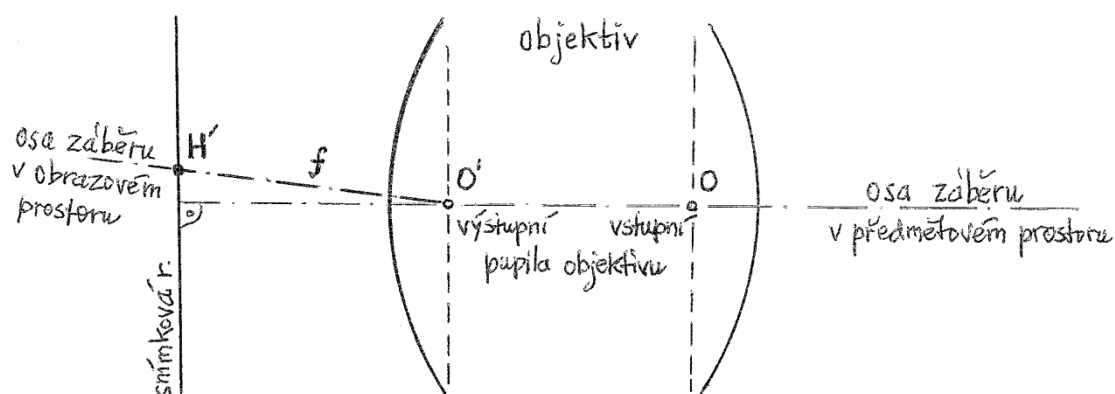
Pro každou individuální událost digitalizace musí být zvolena vhodná metoda a technologie. Je velký rozdíl mezi digitalizací několik set metrů velké baziliky a pár metrů vysoké sochy. Také záleží na materiálu, z něhož jsou movité či nemovité artefakty vyrobeny, aby se zabránilo nechtěné degradaci či poškození materiálu. Pro některé metody digitalizace jsou lesklé, průhledné či černé materiály přímo limitující. Ke zvolení správné metody by nám také měly přispět teoretické otázky, které si klademe během přípravy výzkumného projektu. Otázky by nás měly usměrnit a problematika, o níž se chceme zajímat, by nás měla navést na správnou cestu. Většina metod by v konečném výsledku použití splnila svůj účel podobně, avšak nám se jedná především o vhodnost, efektivitu, časovou nenáročnost a finanční možnosti. Ve výběru také hraje roli lokalita, kde se budou případné objekty nalézat. V laboratorních podmínkách si můžeme dovolit delší časovou a složitější technickou přípravu. V terénu si toto v tak velkém měřítku dovolit nemůžeme. Všechny tyto aspekty nás ovlivňují při výběru, ale také nám vlastně pomáhají pro zvolení nejvhodnějších metod - samozřejmě za předpokladu, že si tyto skutečnosti předem promyslíme a vezmeme v úvahu hned na začátku výběru. Velkou roli hrají ve výběru metody i zkušenosti 3D specialisty na skenování či digitalizaci. Každý přístroj není vhodný pro všechny typy památek a praktické zkušenosti během jeho provozu v praxi jsou někdy odlišné od charakteristiky výrobce.

5.2.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrická metoda se pro svoji relativní jednoduchost a výkonnost velmi osvědčila a rozšířila v archeologii. Její uplatnění se například našlo v pořizování dokumentačních fotografií fasád domů, snímků nalezišť, profilů sond, letecké archeologie, 3D modelování, rektifikaci a také pro vytvoření měřických snímků. Pro účely mého použití jsem si vybral pouze dvě metody, na nichž lze nejlépe prezentovat jejich aplikovatelnost do archeologie.

K úplnému pochopení fotogrammetrie je zapotřebí dobře porozumět matematickému vnímání, popisu a promítání objektu v prostoru. Základní pojmy fotogrammetrie zde proto uvedu a k tomuto účelu budu čerpat ze skript fotogrammetrie od K. Pavelky a z přednášek Fotogrammetrie od J.Šímy (Pavelka 2009, 2006).

Pro správné vyhodnocení fotografických měřických snímků je nutno znát snímkovou orientaci, která se dělí na vnitřní a vnější. Snímky se známou vnitřní orientací se označují jako měřické. Prvky vnitřní orientace měřické komory jsou konstanta komory f , poloha hlavního bodu H' a distorze objektivu (obr. 14).



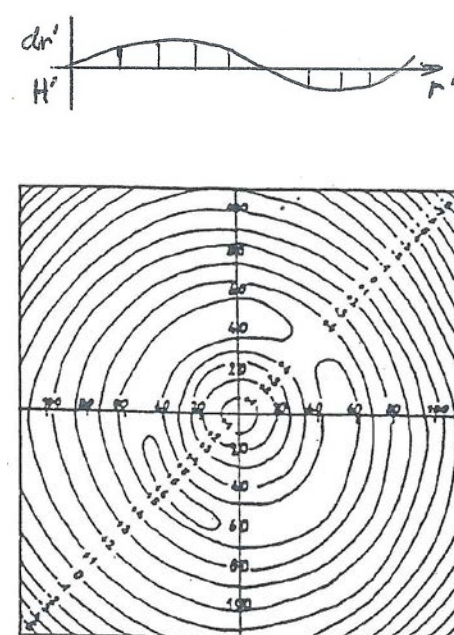
Obr. 14: Prvky vnitřní orientace měřického snímku (dle J.Šímy).

Popis obrázku číslo 5 - vnitřní orientace:

- Osa záběru je kolmice k obrazové (snímkové) rovině procházející vstupní pupilou objektivu.
- Střed snímků (středový bod snímků) O' je průsečík spojnice protilehlých rámových značek.
- Hlavní snímkový bod H' je průsečík paprsku, odpovídajícího v obrazovém prostoru ose záběru, se snímkovou rovinou, který vlivem nedokonalosti konstrukce objektivu nemusí být kolmý na snímkovou rovinu a jeho poloha se mírně liší od středu snímku.

- Konstanta komory f je vzdálenost hlavního snímkového bodu ke středu výstupní pupily, přibližně odpovídá ohniskové vzdálenosti objektivu.

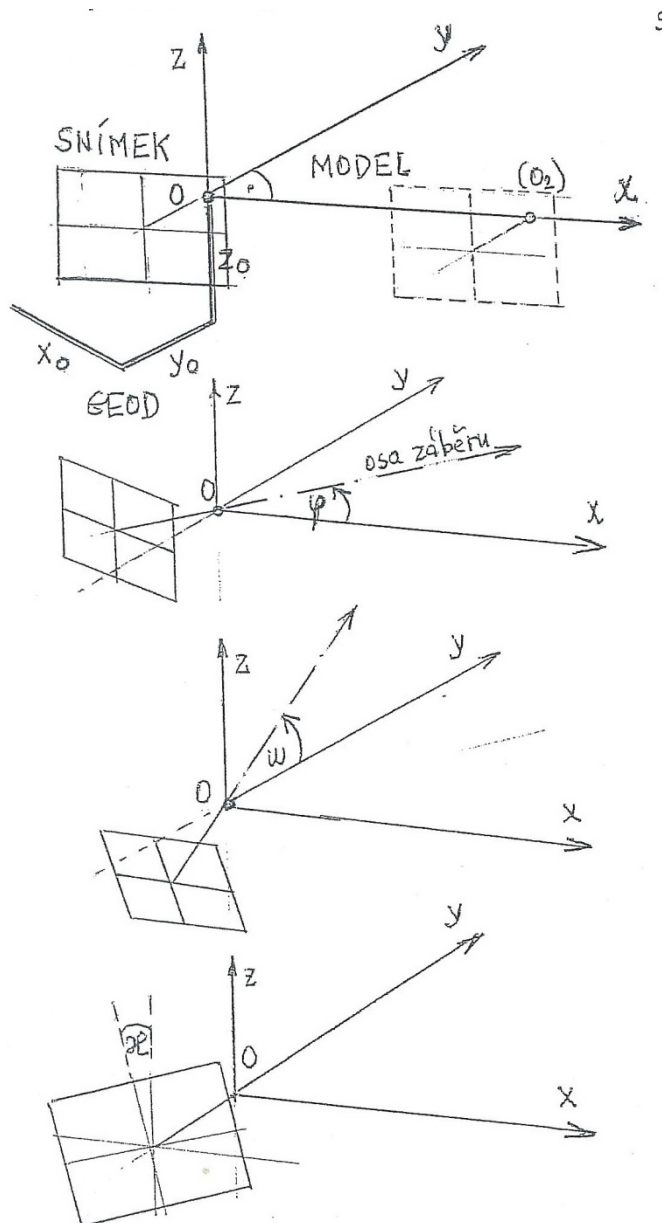
Distorze objektivu je důsledkem nepřesnosti při výrobě objektivu, která působí na geometrii fotografického obrazu. Většinou je uváděná pomocí distorzní křivky zobrazující velikost radiálního zkreslení dr' v závislosti na radiální vzdálenosti r' od H' nebo pomocí izolinií (obr. 15).



Obr. 15: Zobrazení radiální distorze objektivů (zdroj: Pavelka).

Prvky vnitřní orientace většinou uvádí výrobce nebo je lze zjistit později v laboratorních podmínkách, eventuálně pomocí kalibrace přístroje. Prvky vnější orientace pro každý snímek jsou 3 geodetické souřadnice středu vstupní pupily X_0 , Y_0 , Z_0 a 3 úhly rotace ω , φ , κ určující polohu osy záběru v předmětovém prostoru vůči použitému systému modelových souřadnic (obr. 16). Tyto veličiny lze získat pomocí libovolné geodetické metody a pomocí záměrného zařízení s libelou. V dnešní době se provádí zjištění vnější orientace v jednom kroku prostřednictvím

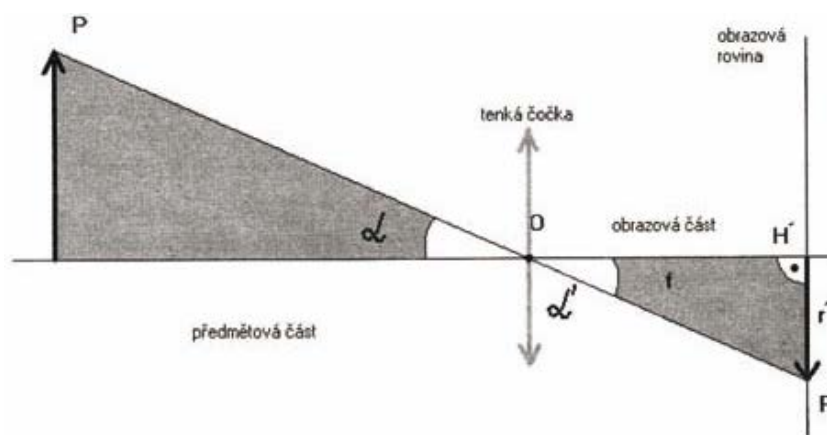
přímého vztahu mezi snímkovými souřadnicemi a geodetickými souřadnicemi tzv. metodou svazkového vyrovnání.



Obr. 16: Prvky vnější orientace měřického snímku v pozemní fotogrammetrii (dle J.Šímy).

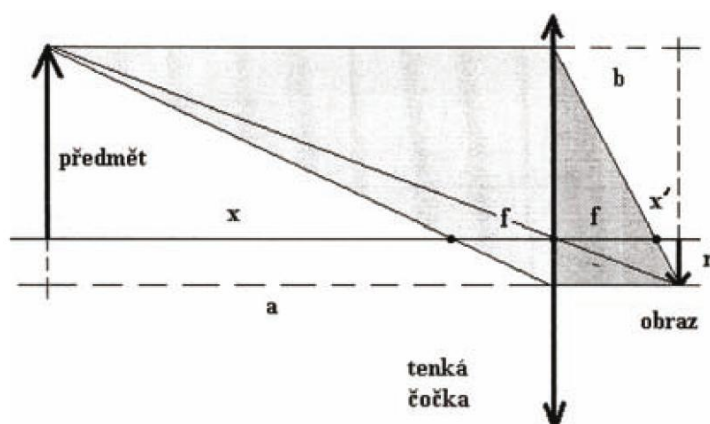
Dalším elementem ovlivňujícím výsledky fotogrammetrie je ideální optické zobrazení pomocí objektivu. V idealizovaném objektivu se vychází z toho, že přesný fotografický snímek je středovým průmětem (tzv. centrální projekce) fotografického objektu (obr. 17). Nejznámější centrální projekcí je metoda využívající projekci dírkové komory, kde tato technika

splňuje téměř stejné předpoklady jako idealizovaná tenká čočka. Její nevýhodou je velmi malá světlost a dlouhá expozice snímků. Výhody lze spatřovat v nepřítomnost optiky a tudíž v absenci většiny optických vad a téměř nekonečné hloubce ostrosti.



Obr. 17: Ideální středové promítání (zdroj: Pavelka).

Ve skutečnosti při vytváření měřického snímku nepoužíváme idealizovanou optiku (kupříkladu „dírkový objektiv“), ale skutečný objektiv, který se skládá z řady optických členů a jeho tloušťka je větší než v případě takzvané tenké čočky při idealizovaném středovém promítání (obr. 18).



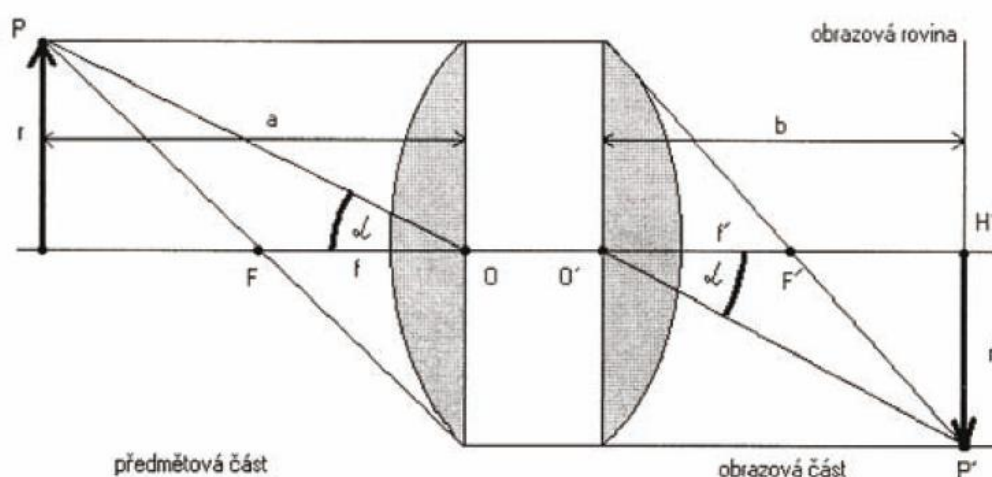
Obr. 18: Zobrazení tenkou čočkou (zdroj: Pavelka).

Dle obrázku platí rovnice:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

Kde a je předmětová vzdálenost bodu, b je obrazová vzdálenost bodu a f je ohnisková vzdálenost tenké čočky.

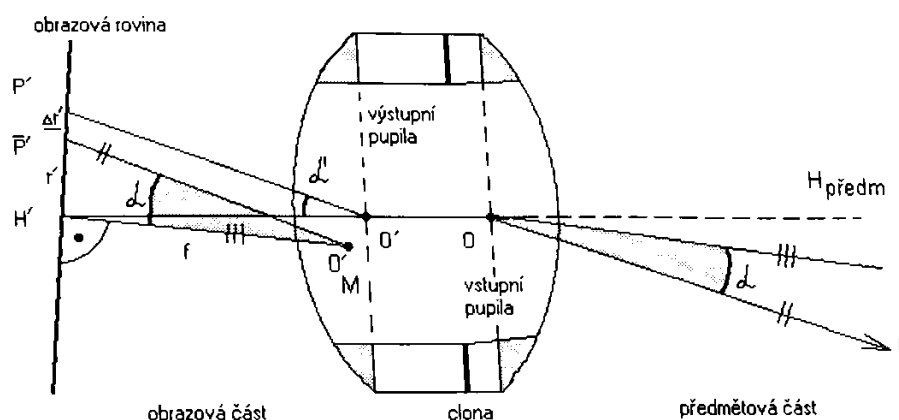
Pro ideální objektiv, kde f' je obrazová ohnisková vzdálenost a f předmětová ohnisková vzdálenost, se s větším průměrem přesné středové promítání neuskutečňuje. Při geometrickém středovém promítání je obrazem bodu opět bod, který je průsečíkem středového promítacího paprsku s promítací rovinou (obr. 19).



Obr. 19: Zobrazení ideálním objektivem (zdroj: Pavelka).

Pro zobrazení svazků paprsků v objektivu platí, že paprsky vstupující do objektivu jsou rovnoběžné a obrazová rovina je totožná s ohniskovou rovinou objektivu $b=f$. Vlivem takzvané aberace se nejedná o přesné bodové zobrazení. Aberace, neboli odchylka, způsobuje rozdíl ve vstupním úhlu paprsku α a výstupním úhlu paprsku α' . Pro minimalizaci rozdílu úhlů se zavádí fotogrammetricko-matematické projekční centrum O'_M , ke kterému se vztahuje konstanta komory a vliv radiální distorze při kalibraci objektivu (obr. 20). Veličiny jako O' je

fyzikální projekční centrum, H' je hlavní snímkový bod, H -předm je hlavní autokolimační paprsek a r' je radiální vzdálenost zobrazovaného bodu.



Obr. 20: Zobrazení objektivem – šikmé paprskové svazky (zdroj: Pavelka).

Rovnice pro výpočet r' :

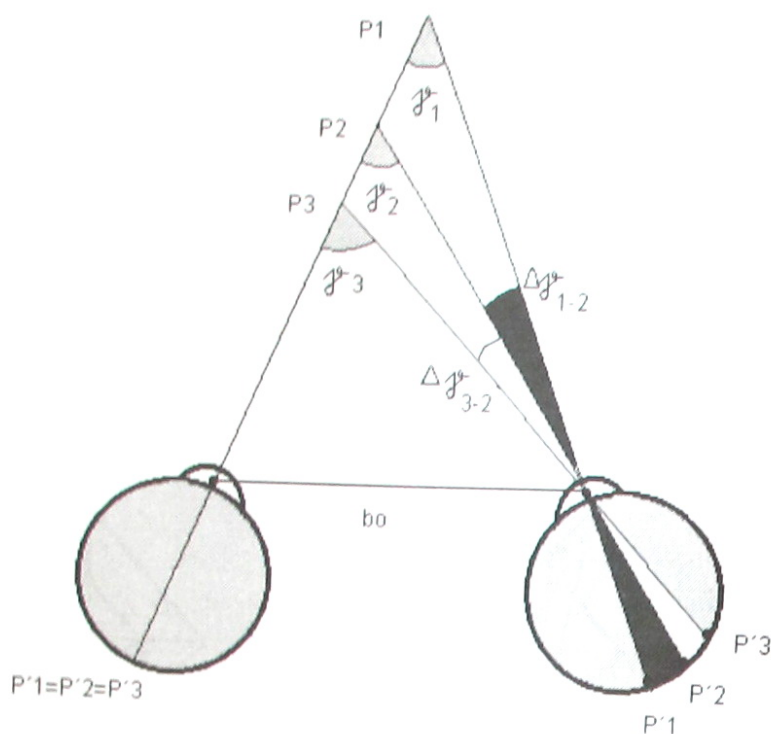
$$r' = f \cdot \tan \alpha + \Delta r' \quad r' = \sqrt{(x' - x'_0 + \Delta x')^2 + (y' - y'_0 + \Delta y')^2}$$

Kde, $\Delta x'$ a $\Delta y'$ jsou opravy souřadnic o zkreslení objektivu.

5.2.1.1 Stereoskopie

Počátky stereoskopie sahají již do 19. století ve formě stereofotografie. Stereoskopickou metodu včetně prostorové měřické značky zavedl v roce 1901 Carl Pulfrich, který také zkonstruoval první stereokomparátor. Stereoskopii můžeme rozdělit na přirozenou a umělou, kdy v přirozené stereoskopii pozorujeme současně předmět oběma očima a při umělé je tento vjem uměle napodobován. Při přirozeném stereoskopickém vidění můžeme pozorovat objekt jedním okem (monokulárně) či oběma očima (binokulárně). Při binokulárním pozorování můžeme automaticky určovat relativní vzdálenost předmětů. Naproti tomu při monokulárním pozorování toto dokážeme jen díky představě o velikosti objektů a vžitě zkušenosti s perspektivou.

Abychom dosáhli přirozeného stereoskopického vjemu, je potřeba správné akomodace a konvergence očí. Pro pozorování bodu P je nutno, aby se oční osy protínaly v pozorovaném bodě P. Oční osy pak svírají konvergenční úhel γ (obr. 21). Rozlišovací schopnost lidského oka, kdy je schopno rozpoznat prostorové polohy bodů, je okolo 450 m dle možnosti pozorovatele.



Obr. 21: Stereoskopické možnosti očí (zdroj: Pavelka).

Pro umělé stereoskopické vidění se využívají dva speciálně provedené fotografické snímky, kterými se získá stejný stereoskopický vjem jako při pozorování skutečného objektu. Snímky musí být pořízeny ve stejné horizontální rovině ze dvou různých stanovisek s předem určenou základnou. V umělém stereoskopickém vidění se setkáváme s pojmy horizontální a vertikální paralaxa, kdy v horizontální paralaxe jde o částečný překryv oblastí na snímku a pořízení snímků ze dvou odlišných bodů a při vertikální paralaxi se musí směry pozorovacích paprsků k odpovídajícím bodům protínat. Pro vhodné pozorování umělého

stereoskopického vjemu si pomáháme zlepšením nebo znásobením oční základny a to pomocí takzvaných stereoskopů. Lze je rozdělit na čočkové, zrcadlové a hranolové podle toho, jakým způsobem odrážejí obraz.

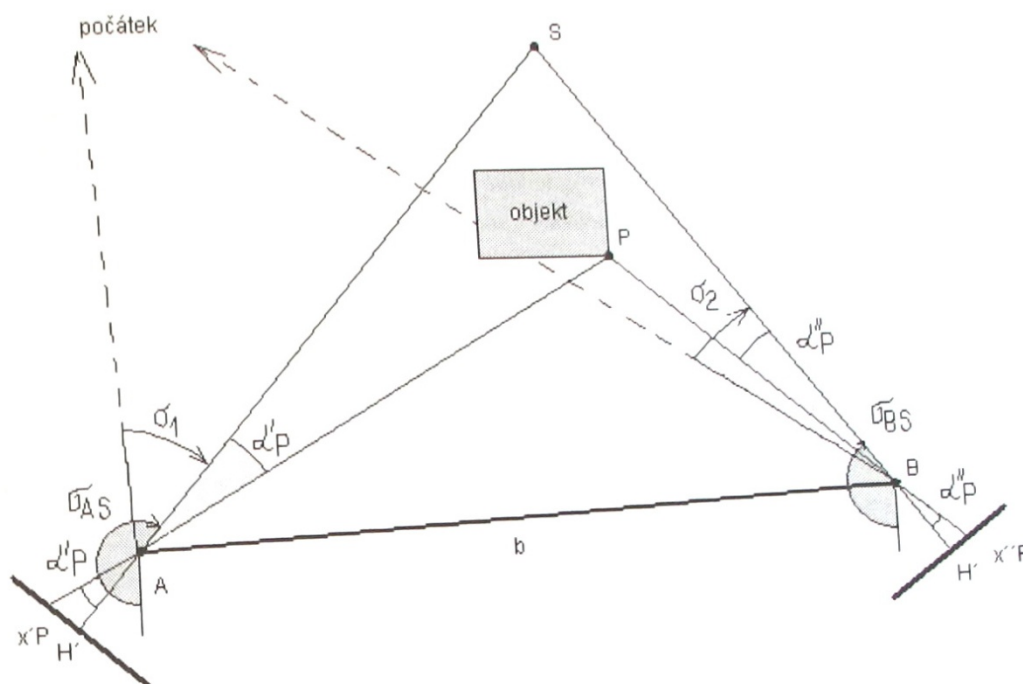
Stereofotogrammetrie našla své uplatnění především v letecké stereofotogrammetrii, kde se vyhodnocují letecké stereo snímky krajiny pro zhotovení přesného polohopisu i výškopisu mapy. První vyhodnocování snímků pomocí analogové metody u nás bylo provedeno v letech 1950 až 1990 prostřednictvím stereopalengrafu či stereometrografu. V roce 1980 nastoupila analytická metoda spojením stereokomparátoru a počítače, kde se snímky vyhodnocují a od roku 1990 plně digitální metoda s digitální fotogrammetrickou stanicí.

Pro pozorování objektu se stereoskopickým vjemem máme k dispozici několik technik. Nejznámějším přístrojem je stereoskop, buď kapesní nebo sklopný pro monitor počítače. Další technika se nazývá anaglyfické zobrazení. Jedná se o prolnutí obou snímků do jednoho. Každý snímek je upraven do co nejvíce spektrálně vzdálené barvy od druhého, aby se snímky co nejméně navzájem rušily. K pozorování slouží brýle s příslušnými barvami pro oba snímky. Nejvíce se využívají barvy modrozelená a červená, ale v podstatě může být kombinace barev jakákoliv. Jde o standardizaci barev - uživatel musí vlastnit stejný typ brýlí, aby si mohl anaglyfy prohlédnout. Výhody anaglyfu jsou především v levném provedení a v možnosti pozorovat snímky více lidmi na jednou, což u stereoskopu není možné. Nevýhodu lze spatřovat v posunutí barevného podání snímků. Podobnou technikou jsou brýle s polarizačními filtry, které jsou pro každé oko jiné. Snímky jsou v tomto případě zobrazeny ve vertikální a horizontální rovině, kdy světlo je usměrněno pro každou rovinu zvlášť a kmitá v dané rovině. Filtry do očí propouští snímek, který je pro oko určený. Toto lze provést pomocí dvou nezávislých projektorů nebo filtru z tekutých krystalů před monitorem, který mění synchronizaci polarizace podle zobrazení snímků. Od této pasivní technologie byl krůček k aktivní, kdy se čekalo na technologický pokrok ve vývoji tekutých krystalů (LCD). V polovině osmdesátých let

vznikl první výrobek pod názvem CrystalEyes. Tento systém pracuje na principu střídavého zatmívání tekutých krystalů pro levé a pravé oko, které jsou umístěny v brýlích. Zatmívání je synchronizováno s projektorem či monitorem, který zobrazuje střídavě obraz ve frekvenci 60 Hz pro každé oko a celkové střídání obrazů činí tedy 120 Hz. Každý lichý snímek je viděn jedním okem a každý sudý snímek druhým okem. Nevýhodou oproti polarizačním brýlím je potřeba energie pro brýle. Tento poslední typ se začal poslední dobu prosazovat v domácnostech technologií 3D LCD televizorů. Časem lze očekávat 3D autostereoskopický typ, který již nebude vyžadovat použití brýlí.

5.2.1.2 Průřezová fotogrammetrie

Průřezová metoda je založena na velice jednoduchém tzv. principu protínání vpřed, řešeném pomocí měřických snímků. Před příchodem kvalitní výpočetní techniky byl využíván jednoduchý výpočetní princip, kdy se vodorovné úhly, které svírají promítací paprsky s osou záběru, počítají z jednoduchých vztahů (obr. 22):



Obr. 22: Princip průřezové fotogrammetrie (zdroj: Pavelka).

$$\operatorname{tg} \alpha' = \frac{x'}{f} \qquad \operatorname{tg} \beta' = \frac{z'}{\sqrt{(f^2 + x'^2)}} = \frac{z'}{f} \cos \alpha'$$

$$x' = f \frac{\tilde{x}_F}{f \cdot \cos \omega - \tilde{Z}_F \sin \omega} \qquad z' = f \frac{f \cdot \sin \omega + \tilde{Z}_F \cos \omega}{f \cdot \cos \omega - \tilde{Z}_F \sin \omega}$$

Celý princip správného získání fotomateriálu spočívá v pořízení vhodného počtu konvergentních snímků, které postupně zachycují celý snímávaný objekt. První softwarové řešení z poloviny osmdesátých let pocházelo od firmy RolleiMetric. V dnešní době průřezovou metodu zvládá každý fotometrický software jak v profesionální sféře, například Photomodeler.

5.2.2 Obrazová korelace (image-base modeling)

Do roku 2005 jsme při generování trojrozměrných bodů z fotografií spoléhali na digitální fotogrammetrii, která byla velice složitá (viz kapitola 5.2.1) a potřebovala striktně dodržovat určitá pravidla jak při sběru snímků, tak při jejich vyhodnocování. Obrovská změna nastala právě v roce 2005, kdy Heiko Hirschmüller vyvinul zcela nový matematický algoritmus SGM (Semi-Global Matching), který zbořil pravidla pro fotogrammetrii (*Hirschmüller 2005, 2008*). Převratný algoritmus byl vymyšlen z grantových financí, a proto byl volně a zadarmo uvolněn všem zájemcům. Postupně z SGM vznikly algoritmy jako SfM či MVS (Structure from Motion, Multi-View Stereo), které nyní využíváme v metodě obrazové korelace. Jde především o techniku, jak z neměřických snímků udělat snímky měřické.

Alternativních pojmů označujících obrazovou korelaci je možné v literatuře nalézt celou řadu. Nejběžnější a správné pojmenování je Structure from motion (SfM), image-base modeling (obrazová korelace) či algoritmus počítačového vidění. Méně vhodné a zavádějící je pak užívání pojmů blížká fotogrammetrie (close-range photogrammetry),

vícesnímková digitální fotogrammetrie či fotoskenování. Terminologicky a technicky se nejedná o tradiční fotogrammetrii. Ovšem fotogrammetrie je natolik zažitý pojem, který dokáže jednoduše vysvětlit i neoborník, že pro urychlení komunikace se stále využívá, i když se jedná o zcela jiné využití techniky 3D digitalizace.

5.2.3 PTM a RTI fotografické digitální snímkování

PTM (Polynomial Texture Mapping) metoda je založena na snímkování a zpracování dat. Byla vyvinuta v oddělení Hawlet Packard Labs v roce 2000, s vývojem je spojován Tom Malzbender. Původně měl sloužit k nasnímání všech známých součástí Antikytherského mechanismu v Národním archeologickém muzeu v Athénách a dekodování téměř neviditelných zkorodovaných symbolů. Nasnímání se uskutečnilo v září v roce 2005. Tato metoda umožňuje zobrazit jemné detaily povrchu za použití standartního digitálního fotoaparátu, externího osvětlení a speciálního softwaru, který je distribuován zcela zdarma. Díky této první aplikaci metody na kulturní památku byla metoda brzy použita v oblastech jako je numismatika, skalní umění, galerie, muzea atd. Normální digitální snímek se skládá z pixelů, které obsahují staticky namíchané tři základní barvy červená, zelená, modrá. V PTM každý pixel obsahuje jednoduchou funkci, která určuje hodnotu výsledné barvy jako funkci dvou nezávislých parametrů l_u a l_v . Při zobrazení objektu pomocí PTM se využívá různého směrového nasvícení objektu, kdy l_u a l_v určují směr bodového světelného zdroje (*Freeth – Bitsakis - Moussas – Seiradakis - Tselikas – Mangou - Zafeiropoulou - Hadland - Bate - Ramsey - Allen – Crawley - Hockley – Malzbender – Gelb – Ambrisco – Edmunds 2006, Earl - Martinez – Malzbender 2010*).

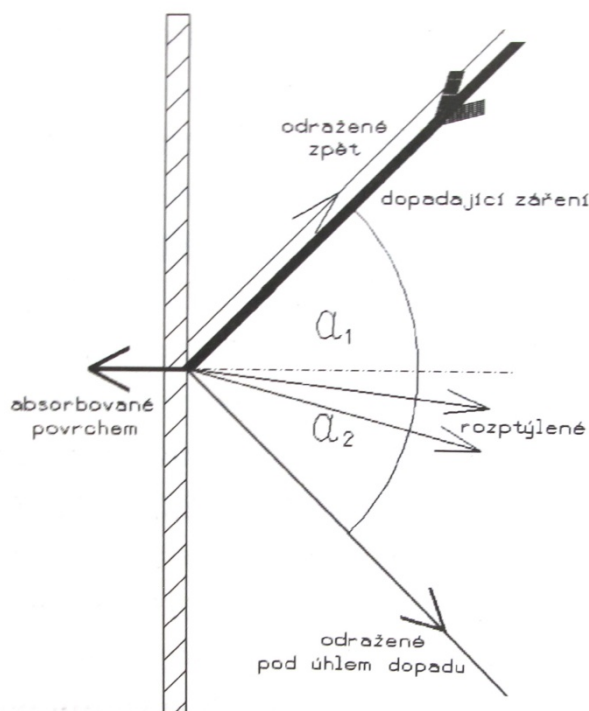
PTM pracuje na principu fotografování více snímků objektu, kdy každý snímek osvětluje zdroj světla z jiného směru. Tyto pozice světla pro nasvícení objektu jsou předem známé a tím pádem neměnné, což je důležité pro správný výpočet funkcí. Snímky jsou po výpočtu složeny do

jednoho, v němž můžeme sledovat zaznamenaný objekt a měnit při tom směr zdroje osvětlení.

RTI (Reflection Transformation Imaging) metoda pracuje na podobném principu jako PTM s tím rozdílem, že zdroj světla není předdefinován a směry světla můžeme nastavovat podle našeho uvážení. Směr zdroje světla se dopočítá z odrazů na černé či červené kouli, která je umístěna vedle objektu. Metoda je určena o spíše do terénu a ke zpracování větších nebo nedostupných objektů (*Mudge – Malzbender - Schroer - Lum 2006, Dellepiane – Corsini - Callieri – Scopigno 2006*).

5.2.4 Trojrozměrné skenování

Ve skenovacích metodách, které využívají laserový paprsek, lze spatřovat několik technologických úskalí, která nás limitují. Tyto hranice jsou způsobeny vlastní specifikací laserového paprsku. Laser je úzký usměrněný svazek světla (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Z názvu vyplývá, že se jedná o zesilování světla stimulovanou emisí záření. Problémy mohou nastat u geometrie skenovaných objektů a povrchu skenovaných objektů s malou schopností odrazivosti světla. Při měření objektů na rovinu cíle, jehož normála není rovnoběžná s dráhou paprsku, může dojít k neodrazení paprsku ke skeneru nebo naopak vícenásobnému odrazu. Ke správnému měření dochází pouze tehdy, pokud správně odražený paprsek dopadne zpět ke zdroji. Při lomu laserového paprsku dochází k více odrazům nebo pohlcení záření. Část paprsku se může odrazit zpět, být pohlcena povrchem nebo může dojít k rozptýlenému dopadu (obr. 23).



Obr. 23: Dopad světelného záření na obecný povrch (zdroj: Kašpar et al).

U zaměřování hran a podobných ostrých profilů může dojít k nepřesnostem měření, pokud paprsek vlivem velké vzdálenosti od skeneru zvětšuje svůj průměr a při dopadu na objekt pokrývá větší plochu, než kterou bylo v plánu původně zaměřit. Dalším problémem pro všechny typy laserových metod je odrazivost materiálu skenovaného objektu, která je spojena s drsností povrchu a jeho barvou. Některé materiály mají horší odrazivost než jiné a pro skenery je složité zaznamenat slabší odraz paprsku a správně je vyhodnotit. Určité materiály mohou mít také větší absorpční schopnost a energie odraženého paprsku může být částečně pohlcena. Nejlepší odrazivost mají materiály bílé barvy a nejhorší černé (Kašpar – Pospíšil – Štroner – Křemen – Tejkal 2003, tab. 1).

Materiál	Reflektivita/ %
Bílý papír	do 100%
Stavební dřevo (borovice, čistá, suchá)	94%
Sníh	80 - 90%
Bílé zdivo	85%
Jíl, vápenec	do 75%
Potištěný novinový papír	69%
Listnaté stromy	typ. 60%
Jehličnaté stromy	typ. 30%
Plážový, pouštní písek	typ. 50%
Hladký beton	24%
Asfalt s oblázky	17%
Láva	8%
Černý neopren	5%

Tab. 1: Reflektivita různého materiálu.

S využíváním laserového paprsku k různým druhům skenování vyvstává také otázka bezpečnosti pro naše oči. Během práce může dojít k trvalému poškození sítnice. Bezpečnost záření laserového paprsku zajišťuje vydaná směrnice číslo 61 ministerstva zdravotnictví ČSR z roku 1982, která rozděluje záření laserů do tříd podle stupně nebezpečnosti. Dále pak v souvislosti s touto směrnicí existuje technická norma ČSN EN 60825 a nařízení vlády číslo 480/2000 Sb. o ochraně zdraví před neionizujícím zářením. Existují čtyři třídy, které se označují římskými číslicemi. Jejich rozdělení a zhodnocení rizika určuje hustota energie (J/m^2) nebo hustota zářivého toku (W/m^2). Dalším hlediskem ve viditelném spektru je doba působení záření, kdy do 0,25 sekund nás ochrání reflex mrknutí oka. Pro vlnové délky ultrafialového záření menší než 370 nm a infračervené záření s vlnovou délkou větší než 1400 nm toto záření nepředstavuje žádné riziko poškození sítnice, jelikož do oka neprojde. V I. třídě laser emituje emise ve viditelné i neviditelné oblasti elektromagnetického spektra, tak malé, že je možnost přímého pohledu do svazku i přes optickou soustavu. Do II. a IIIa. třídy se zařazují lasery, jejichž kontinuální a viditelné záření má hustotu menší než $25 W/m^2$. V obou třídách je možný přímý pohled do zdroje záření, kdy oko chrání mrkací reflex ale ve třídě IIIa. může být oko poškozeno při pohledu do

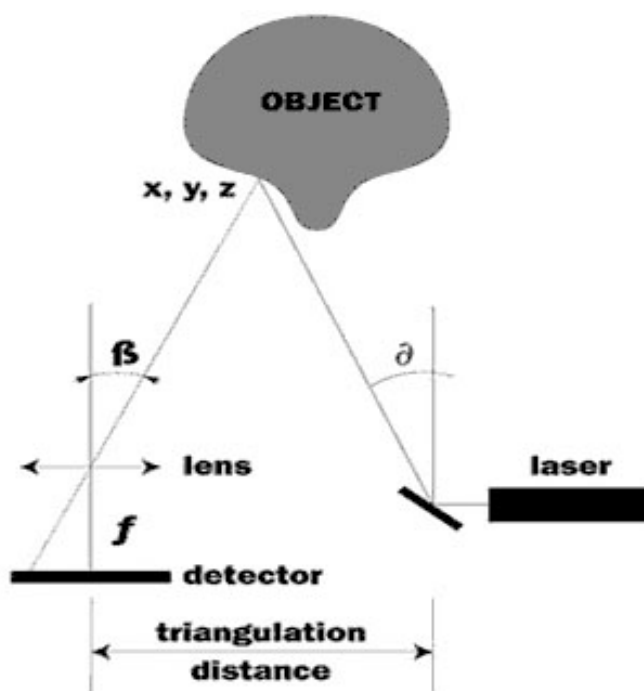
zdroje pomocí optické soustavy (například dalekohled). Poslední dvě třídy IIIb. a IV. jsou velice nebezpečné, jejich hustota zářivého toku přesahuje hodnotu 25 W/m^2 a pro IV. třídu dokonce 5 W/m^2 . Pro ochranu se doporučuje použití speciálních ochranných brýlí, které téměř úplně pohltí nebo odrazí dopadající záření s vlnovou délkou laseru. U takto silných laserů hrozí možnost poškození sítnice i od odraženého záření od nelesklé, difúzně rozptylující plochy jako je například matná stěna (*Kašpar – Pospíšil – Štroner – Křemen – Tejkal 2003, 71-72*).

5.2.4.1 Triangulační skenování

Trojrozměrné skenery s triangulační metodou využívají měření z konců známé základny (*Pospíšil 2007, 8*). Základny můžeme rozdělit:

- Jedna kamera a laser, kdy laser a kamera jsou umístěny na opačných koncích základny a snímá se stopa laseru na objektu. Objekt se může otáčet nebo se stopa laseru vychyluje zrcátkem.
- Dvě kamery a laser nebo projektor, kdy kamery jsou umístěny na známé základně a projektor objekt na světluje strukturovaným světlem, případně se použije laserová stopa.

Princip metody tedy vychází z trojúhelníku mezi bodem na objektu, kamerou a laserovým vysílači. Pro výpočet musíme znát délku základny mezi kamerou a laserovým vysílačem a úhel laserového paprsku. Úhel kamery lze získat ze záběru polohy laserového bodu na objektu. Tyto tři údaje by nám měly stačit k výpočtu trojúhelníku a přesné polohy laserového bodu na objektu. Pro zrychlení metody se může využívat laserový pruh místo jednoho bodu (*3D laser skenování, obr. 24*).

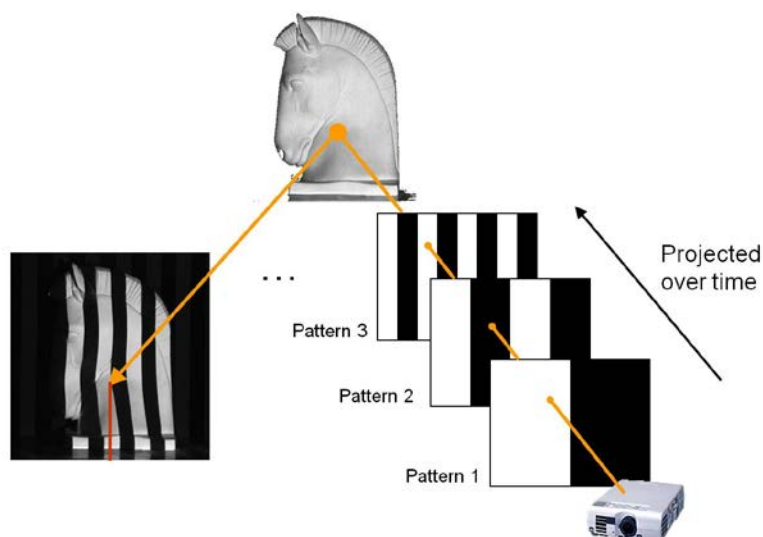


Obr. 24: Princip triangulační metody (zdroj: 3D laser skenování).

Triangulační metoda má více modifikací a pro výpočet polohy bodů může sloužit jakákoliv linie paprsku, která má dostatečně ostrý přechod na svých okrajích. K tomu můžeme použít laserový paprsek, pruh stínu nebo přímo světelný vzor pruhů. Posledně jmenovaná aplikace se nazývá metoda pomocí strukturovaného světla. Projektor na skenovaný objekt promítá předem známé světelné vzory - střídání tmavého a světlého pruhu o různých šířkách (McPherron – Gernat - Hublin 2009, Niven – Steele - Finke - Gernat – Hublin 2009).

Velkou nevýhodou triangulace je jí časová náročnost, neboť paprsek musí pomalu překonat celý objekt a kamera musí celý pohyb nasnímat. Pro urychlení metody se proto začalo využívat více paprsků najednou, ale to vede k problémům s jejich rozeznáváním. Proto může být využíváno barevného rozlišení každého paprsku nebo lze paprsek nahradit strukturovaným světlem. Při něm se využívá tzv. časového kódování pruhů binárního typu, šedého kódování s fázovým posunutím a dalších ekvivalentů (time-coded stripes, obr. 25), kdy každý pruh má jedinečné

kódování v průběhu jeho projekce. Snímky s různě kódovanými pruhy se v průběhu času střídají na povrchu objektu a každá změna je zaznamenána kamerou a poté triangulačně vyhodnocena (*Potsdamer – Altschuler 1982*).



Obr. 25: Binární kódování vzorů ve strukturovaném světle.

Srovnání laserové metody s kódovaným strukturovaným světlem je velice zajímavé. Zabýval se tím projekt, během něhož byly skenovány dvě části sochy Unaveného Heraklea v Bostonu a v muzeu v Antalyi, aby mohl být vytvořen spojený model sochy. (*Akca - Remondino – Novák - Hanusch - Schrotter - Gruen 2007, 10, tab. 2*).

Metoda triangulace	Laserové paprsek	Kódované strukturované světlo
Váha a cena	identická	Identická
Rychlost		Rychlejší
Citlivost k vnějšímu světlu	menší	
Šum		Menší
Průnik do povrchu objektu		Ne
Zobrazení pro pozdější mapování textury		Ano
Schopnost zaznamenat hloubku	větší	
Bezpečnost pro oči		Lepší

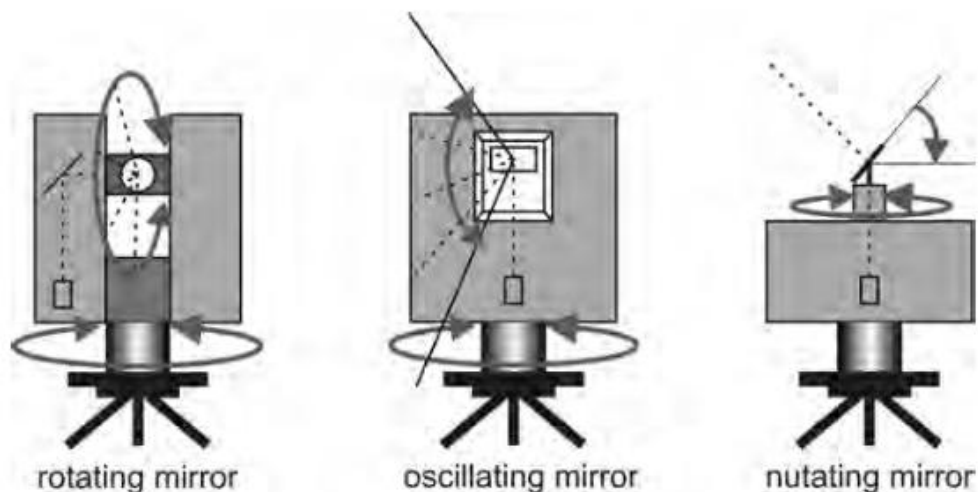
Tab. 2: Srovnání některých aspektů dvou metod triangulace.

Skenery mohou být ruční nebo větší na stativ. Mobilní ruční skenery zpracovávají data ihned a ukazují právě naskenovanou plochu. Druhá skupina data zpracuje a zobrazí až po naměření celého snímku. S ručními skenery je nutný pohyb okolo objektu, při skenování se skenery na stativu se objektem otáčejí na točném nebo se skener postupně přesouvá po nasnímání celého pohledu.

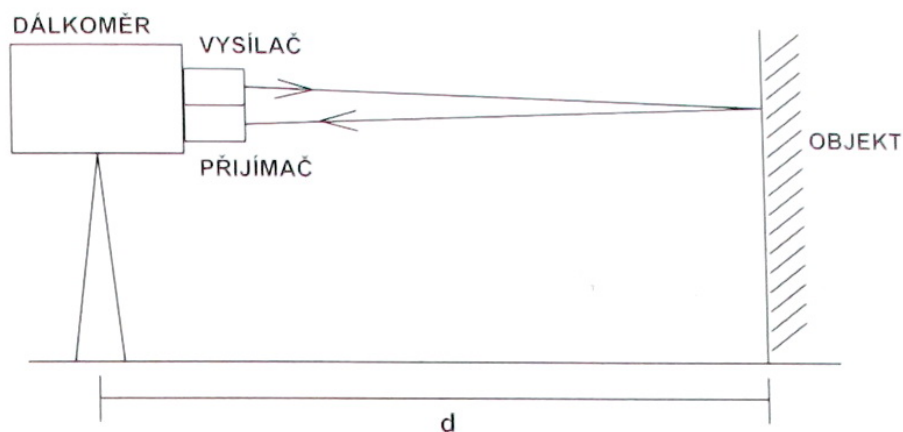
Nevýhodou triangulační metody při řešení obecného trojúhelníku je nižší přesnost s rostoucí měřenou délkou a také délka základny mezi kamerou a vysílačem, která má svoje maximální limity.

5.2.4.2 Dálkové pozemní skenování

V dálkovém pozemním skenování se využívá princip elektronického dálkoměru s výpočtem polohy bodů pomocí obecné prostorové polární metody. Pro každý naměřený bod se automaticky zaznamenává horizontální úhel, vertikální úhel a šikmá vzdálenost od stanoviště skeneru k měřenému bodu. Pro posunutí paprsku v horizontální poloze je využíván přesný krokový motor, pro vertikální polohu se využívá vychylování paprsku rotujícím zrcátkem, hranolem nebo pomocí kývání (obr. 26). Určení vzdálenosti bodů zajišťuje elektronický dálkoměr, kdy elektromagnetické vlnění vychází z vysílače, odráží se na koncovém bodě na odrazném systému a vrací se zpět do přijímače umístěného na počátku měřené délky (obr. 27). Pro pozemní skenery se místo odrazného systému využívá odrazu přímo od povrchu měřeného objektu, tzv. pasivního odrazu (*Kašpar – Pospíšil – Štroner – Křemen – Tejkal 2003, 11*).



Obr. 26: Ukázky vychýlení laserového paprsku na pozemním skeneru.



Obr. 27: Schéma principu elektronického měření délky.

Dle principu lze rozdělit elektronické dálkoměry na impulsní, fázové a frekvenční. Impulsní dálkoměry měří tranzitní čas, který potřebuje elektromagnetický impuls k překonání dvojnásobku měřené délky. Tedy měří se čas letu impulzu. Když impuls opustí vysílač, začne se s měřením času a tento impuls musí dorazit k povrchu objektu, kde se odrazí a při dopadu na přijímač se ukončí měření doby letu. Pro vysokou rychlost světla musí být odečet času velice přesný. Ve fázovém dálkoměru je vyslán parsek, který je modulován harmonickou vlnou a zjišťuje se rozdíl fází mezi vysílaným a přijímaným signálem, kdy z toho rozdílu se zpětně určí měřená délka. Frekvenční dálkoměr je založen na určení záznějí, které vznikají jako produkt skládání časově posunutých frekvenčně

modulovaných vln (*Kašpar – Pospíšil – Štroner – Křemen – Tejkal 2003, 11, Pavelka 2006, 12*).

Z opakovaného měření bodů, kdy během sekundy proběhnou desetitisíce měření, vzniká takzvané mračno bodů (Point cloud). Při skenování jsou nasbírány miliony bodů, které obsahují jak svoje souřadnice v prostoru, tak mohou obsahovat údaje o intenzitě odrazu laserového paprsku převedené do stupně šedi či barevnou škálu každého bodu, získanou z fotografie prostřednictvím spojení kalibrovaného fotoaparátu se skenerem.

Výhodou dálkového pozemního skenování je rychlý sběr naměřených bodů, automatický a systematický sběr dat a garance optimální přesnosti. Současně je velkou nevýhodou nesmírné množství nasbíraných dat ze skenovaného objektu a prozatím také problémy při jejich pozdějším zpracování. Při klasickém zaměřování si pro zaměření vybíráme významné lomové body z kterých později můžeme vyhodnotit hrany objektu. Při laserovém skenování naopak dochází k zaměřování tisíců bodů bez ohledu na konstrukčně významné body. Máme tak k dispozici nepřeberné množství dat, ale manuálně je těžké toto mračno bodů nějak vyhodnotit. Proto se začíná využívat metody automatického vytěžování dat (data mining), kdy se program snaží o automatické vyhodnocení některých tvarů z mračna bodů podle zadaných parametrů (*Zogg 2008, 117-127*). Výhodu ve velkém množství naměřených dat můžeme vidět v dodatečném vyhodnocení naskenovaného objektu bez nutnosti opakovaného doměřování zájmových bodů v terénu.

5.2.4.3 Letecké laserové skenování

Letecké laserové skenování (LLS – ALS Airborne Laser Scanning) bylo původně vyvinuto pro vojenské účely v letech 1970 až 1980. Pro skenování krajiny využívá obdobnou technologii jako pozemní skenovací systémy Lidar (Light Detection and Ranging, Laser Image Detection and Ranging). LLS poskytuje schopnost naskenovat velkou plochu v relativně krátkém časovém období. Skenovací senzor vysílající laserový impulz je

umístěn na leteckém nosiči (většinou letadlo) spolu s přesnou GNSS aparaturou, která sleduje přesnou plochu vysílaných pulzů. Během letu jsou ze senzoru vysílány pulzy k zemskému povrchu, kde se odráží od povrchu či vegetace. Výsledkem každého pulzu je ale vícero ozvěn a to proto, že se během svého letu k zemi postupně odráží od překážek. První odraz většinou pochází od vrcholku stromů a poslední z povrchu země. Pro zaznamenané odražené pulzy je vždy vypočítána jejich přesná poloha kombinací GNSS a zpřesňování jednotky IMU, která se stará o zaznamenání náklonu letadla ve všech osách během vysílání a záznamu pulzů. Konečným výsledkem je mračno bodů, které reprezentuje digitální model povrchu. Po filtraci bodů odražených od vegetace vzniká digitální model reliéfu. LLS je mocný nástroj pro identifikaci a mapování zalesněné krajiny.

6 TECHNICKÉ VYBAVENÍ PRO TROJROZMĚRNOU DIGITALIZACI

Pro každou instituci, která by chtěla začít využívat některý z typů 3D skenování ve svých projektech, je podstatná otázka finančních prostředků. Specializované firmy potřebují zaplatit počáteční vývoj této nové technologie. Proto také vznikly projekty nadšenců, kteří byli schopní využít v podobné kvalitně stejnou metodu jako profesionální firmy, ale za zlomkovou cenu jejich řešení. Časem začaly být skenery více využívány i v jiných oborech a v souvislosti s tím přišlo také celkové zlevnění a větší dostupnost těchto zařízení. Na světovém trhu si vybojovalo pozici vedoucích leaderů několik firem, například Leica, RIEGL, Trimble, Minolta, Faro, MDL a další. Nejsložitější otázkou ale stále zůstává software pro práci s daty, jeho cena a kvalita. Pro archeologii zatím existuje omezené množství specializovaného softwaru a musíme si proto vystačit s podporou z oblasti stavebního inženýrství, geodézie a strojírenství. Pro některé archeologické projekty ale začínají být na objednávku vytvářeny velmi specializované programy, avšak i tento vývoj

je finančně náročný a dostupnost těchto programů je velmi nízká dle typu licence.

Poslední aspekt, který by nás měl zajímat, se pojí jak s použitím softwaru, tak s hardwarem pro zpracování. Jde o to, s jakou architekturou počítače chceme pracovat nebo jakou máme k dispozici. Na výběr dnes máme z 32bitové nebo 64bitové architektury. Jde o základní rozdělení systému počítačů, kde se jedná o to, jak je široká datová sběrnice a jakým způsobem systém dokáže do datové sběrnice přistupovat. Pokud se rozhodneme využívat 64bitový systém, musíme začít používat i 64bitové aplikace a operační systém, abychom získali výhody s tímto spojené, například možnost rozšíření adresování RAM paměti v počítači. Velká paměť je potřeba pro náročné zpracování velkého množství dat získaného během 3D skenování či pro zpracování velkých datasetů fotografií z obrazové korelace. U velkých objemů dat nelze s malou velikostí paměti pracovat, a proto doporučuji pracovat s daty pouze na 64bitové architektuře s minimálně 8 GB RAM paměti. Mezi další významné nároky na výkon počítače při práci s daty patří také rychlý zápis dat na harddisk, výkonná grafická karta a procesor.

6.1 Dostupné přístroje pro skenování nebo digitalizaci

Existuje velká škála přístrojů, které byly vyrobeny pro skenování nebo digitalizaci světa okolo nás. Lze je rozlišit dle různých měřítek, například podle použité technologie, mobility, váhy, přesnosti, využití, provedení, atd. Nejdůležitějším aspektem, jenž nás při výběru zajímá, je na počátku rozhodně pořizovací cena, ale také použitý technologický princip a kvalita provedení. Pro příklad uvedu jen některé zajímavé přístroje nebo jedno zařízení pro každou metodu skenování.

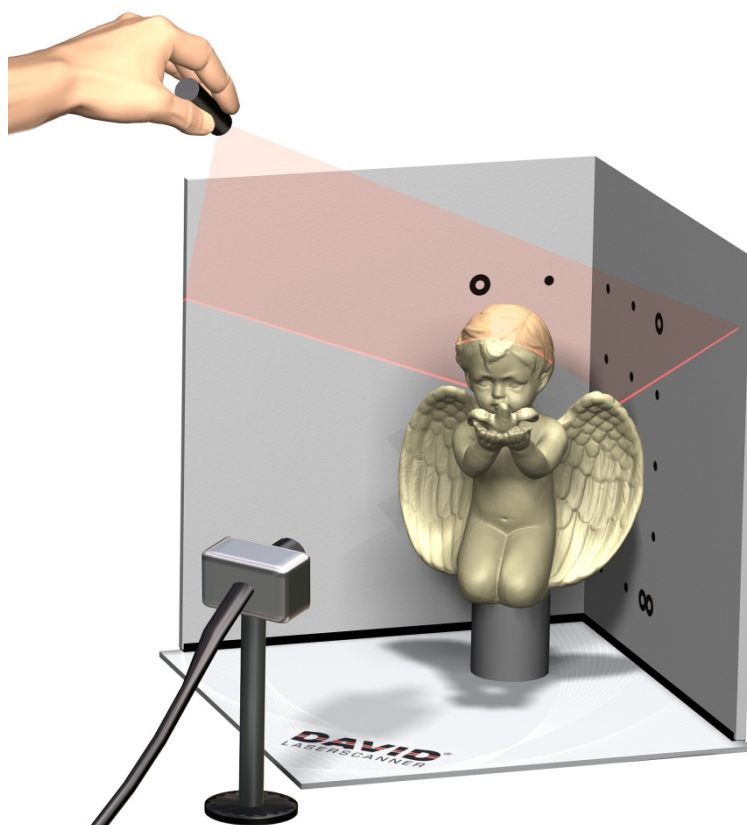
V první skupině bych rád představil celý souhrn přístrojů, které mají společný znak. Jedná se o velmi nízké pořizovací náklady, poněvadž nevznikly pro komerční využití v profesionální firmě, ale produkují je většinou nadšenci nebo studenti. V podstatě žádná základní technologie

nebo princip skenerů není tajný či příliš složitý na to, aby nešel vyrobit amatérsky. V cizojazyčných zemích tyto pokusy nazývají do it yourself (udělej si sám, *Lanman – Taubin, 2009*) a mají většinou okolo sebe velkou základnu přispěvatelů. Z velké části tyto přístroje disponují základním principem různých metod skenování a po stránce hardwarové jsou velice jednoduché ale zároveň efektivní.

Většina konstruktérů skenerů využívá nekontaktní optické aktivní metody jako je triangulační měření. Metoda triangulačního měření je totiž nenáročná na základní hardwarové vybavení, a tudíž postavení přístroje je jednoduché.

Lepším zařízením, než laicky vyrobeným přístrojem a obstojně naprogramovaným obslužným softwarem, je DAVID-laserscanner. Toto zařízení nejdříve vzniklo jako vědecká práce, která popisovala základní princip měření a skenování a to už v roce 2006 v Ústavě pro robotiku a řízení procesů na Technické univerzitě v Braunschweigu. Později okolo roku 2009 si skupinka studentů založila firmu DAVID Vision Systems GmbH a úspěšně se prezentovala na veletrhu CeBIT 2009. Jejich úspěch byl založen na využití standardně dostupných komponentů za minimální cenu. V současné době jejich poslední verze ovládacího software je 5.0.7 a cena pro základní balíček pro skenování začíná na 17 000 Kč. Obsahuje ovládací software, kalibrační desku, webkameru a laserový pruhový emitör, kterým lze ostřit vyzařovaný pruh. Metoda skenování je založena na triangulační metodě a autoři uvádějí, že lze docílit přesnosti menší než 0,2 mm. Než začne být objekt skenován, je nutno nejdříve zařízení pomoci dodaného softwaru a kalibrační desky zkalibrovat, potom může následovat vlastní skenování, kdy se snažíme pomalu a plynule přejíždět skenovaný objekt laserovým paprskem. Tento obraz současně zaznamenává webkamera a software jej ihned vyhodnocuje. Nevýhoda tohoto skeneru je v manuálním pohybu laserového pruhu po objektu, kdy nikdy nedocílíme stejné rychlosti a náklonu. Dále záleží na kvalitě webkamery, ostrosti laserového pruhu a celkovém osvětlení prostředí, kde se skenuje. V posledních letech je také možné zakoupit balíčky s

již poloprofesionálním vybavením a to na bázi skenování pomocí strukturovaného světla. Většina nadšenců a uživatelů pro tento přístroj vymýšlí různé mechanické převody pro posouvání laserového paprsku jako například ze stavebnice Lego Mindstorms NXT, minutek a budíků. Pro lepší výsledky skenování zkouší jiné typy laserů, zlepšují optiku a rozlišení kamer. Výhodou je cenová dostupnost, velká základna nadšenců pro další vývoj a také použití jako ukázka pro pochopení principu triangulační metody do škol. S pomocí základního balíčku DAVID-laserscanner lze skenovat artefakty i s texturou, ale časová náročnost na přípravu a docílení dobré kvality skenů je až příliš velká (obr. 28).



Obr. 28: Ilustrace DAVID-laserscanner (zdroj: DAVID-laserscanner).

Jiným příkladem z řad studijních prací na ZČU je zkonstruování pozemního dálkového skeneru na principu měření doby letu paprsku (time of flight) v doktorské práci od O. Pilíka. Součástky na postavení skeneru stály celkem cca 200 000 Kč, kdy nejdražší součástí byla měřící hlava od firmy Sick (obr. 29). K řízení otáčení slouží krokový motor a data se

odesílají do počítače přes převodník pomocí USB. Přesnost skeneru je dána měřicí hlavou a to od 1 mm – 1 dm (blíže viz tab. 3). Na tomto skeneru lze posoudit, jak moc složitá jsou ostatní podobná zařízení a pochopit jeho princip. Naskenovat lze za cca 7 minut 350 000 bodů bez textury, jelikož toto řešení nemá k sobě připojený fotoaparát. Pořízená data se ukládají ve formátu .txt (Pilík 2010).



Obr. 29: Dálkový pozemní skener od O. Pilíka (autor: O. Pilík).

Technické údaje:	
Zorné pole:	100°/180°
Úhlové rozlišení:	1° ... 0, 25°
Rozlišení:	1 mm – 1dm
Systematická chyba:	+/- 15 mm
Statistická chyba:	5 mm
Rozsah měření:	8m-160m
Datové rozhraní:	RS-232, RS-422
Datová přenosová rychlost:	9,6/ 19,2/ 38,4/ 500 kBaud

Tab. 3: Specifikace skeneru O.Pilíka..

Profesionálním zařízením na stejném principu měření doby letu paprsku je produkt od firmy Faro typu Laser Scanner Focus 3D, který zkoušela jako první pro dokumentaci památek Laboratoř geoinformatiky FŽP UJEP (obr. 30). Zařízení využívá pro vychýlení bodového laseru otáčející se zkosené zrcátko, jeho pracovní rozsah je 120 m, obsahuje pevný disk pro ukládání dat, nebo dokáže komunikovat přes síťové rozhraní Ethernet, a to drátově i bezdrátově. K ovládání bez počítače slouží vestavěný dotykový displej. Pro barevné skenování má integrovanou barevnou kameru. Systém je určen především ke skenování velkých vnitřních a vnějších prostor. Jeho cena se pohybuje okolo 1 200 000 Kč (*Produktový leták Faro Focus3D Laser Scanner*).



Specifications

Ranging unit

Unambiguity interval: 153.49m (503.58ft)

Range Focus^{3D} 120ⁱ: 0.6m - 120m indoor or outdoor with low ambient light and normal incidence to a 90% reflective surface

Range Focus^{3D} 20: 0.6m - 20m at normal incidence on >10% matte reflective surface

Measurement speed: 122,000 / 244,000 / 488,000 / 976,000 points/sec

Ranging error[±]: ±2mm at 10m and 25m, each at 90% and 10% reflectivity

Ranging noise[±]:

@10m - raw data: 0.6mm @ 90% refl. | 1.2mm @ 10% refl.

@10m - noise compressed[±]: 0.3mm @ 90% refl. | 0.6mm @ 10% refl.

@25m - raw data: 0.95mm @ 90% refl. | 2.2mm @ 10% refl.

@25m - noise compressed[±]: 0.5mm @ 90% refl. | 1.1mm @ 10% refl.

Colour unit

Resolution: Up to 70 megapixel colour

Dynamic colour feature: Automatic adaption of brightness

Deflection unit

Vertical field of view: 305°

Horizontal field of view: 360°

Vertical step size: 0.009° (40,960 3D pixels on 360°)

Horizontal step size: 0.009° (40,960 3D pixels on 360°)

Max. vertical scan speed: 5,820rpm or 97Hz

Laser (Optical transmitter)

Laser power (cw Ø): 20mW (Laser class 3R)

Wavelength: 905nm

Beam divergence: Typical 0.16mrad (0.009°)

Beam diameter at exit: 3.8mm, circular

Data handling and control

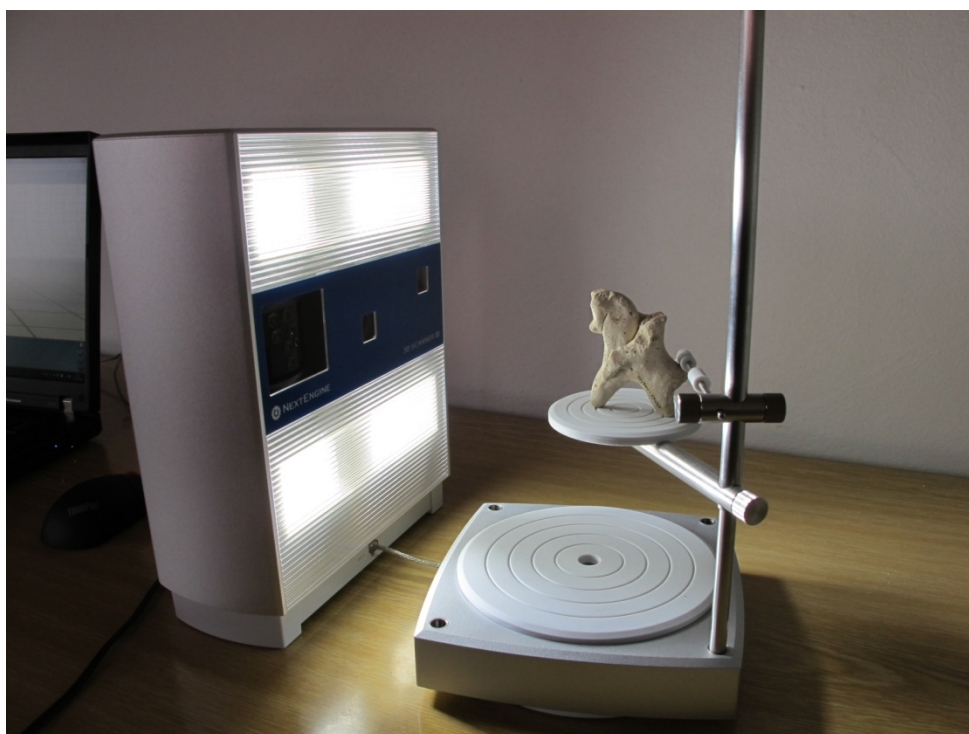
Data storage: SD, SDHC™, SDXC™; 32GB card included

Scanner control: Via touchscreen display

Obr. 30: Dálkový pozemní skener Faro Laser Scanner Focus 3D (zdroj: Faro).

Dalším z komerčních 3D skenerů je NextEngine HD v modelu 2020i, který pracuje s triangulační metodou pro získávání dat (obr. 31). Firma NextEngine byla založena už v roce 2000 a první výrobek byl zveřejněn v červnu 2006. Do konce července 2006 byly prodány 3D skenery za více než 1 milion dolarů. Skener dosáhl svojí velké popularity díky cenové politice firmy, která svůj produkt prodává, jak sama prezentuje, za 1/10 ceny ostatních podobných zařízení. Cenu za poslední model skeneru s vysokým rozlišením stanovila na cca 60 000 Kč. Právě proto toto zařízení vlastní mnoho institucí od designu až po umění a

archeologii. Namátkou jmenuji významné organizace jako je Louver, NASA, The History Channel a mnoho univerzit po celém světě. Skener je tzv. stolní, ale je možné upevnit jej na stativ. Objekty lze proto skenovat z jakékoliv pozice, plus je možné využívat dodané automatické točny pro 360° oskenování objektů, kdy točna unese maximální zátěž 9 kg. Skener sám o sobě váží 3,3 kg, a proto stativ na tuto zátěž musí být předem stavěný. Velikost samotného zařízení je 224 mm x 92 mm. Naskenované objekty jsou díky kamerám zaznamenány i s texturou a pro přisvětlení objektů slouží dvě malé zářivky pod a nad kamerami. K rychlému skenování NextEngine využívá patentované technologie MLT (Multistripe Laser Triangulation), kdy zároveň skenuje pomocí multilaserového paprsku, který obsahuje dva páry emitorů, pohybujících se horizontálně pomocí přesného krokového motoru. Pro nasnímání slouží dvě kamery, kdy jedná je pro makro skenování ve velkém rozlišení a druhá pro širokoúhlý záběr. Před kamerami se během různých fází skenování mění různé filtry před CMOS senzorem kamery. Každá kamera je pevně nastavena na určitou vzdálenost zaostření pro optimální kvalitu skenování, kdy ideální vzdálenost mezi skenerem a objektem je 45 cm a 16 cm pro makro. Velikosti snímané oblasti jsou cca 34 cm x 26 cm a pro makro záběr 13 cm X 10 cm. Laserové paprsky splňují kategorie třídy 2 a jsou tedy oku bezpečné. Spojení s počítačem je zabezpečeno pomocí rozhraní USB 2.0 a o napájení se stará elektrický zdroj 110 V nebo 240 V. Udávaná přesnost je pro širokoúhlý záběr 0,381 mm s rozlišením 75 DPI a pro makro 0,127 mm s rozlišením 200 DPI. Pro hustotu textury se uvádí hodnoty 150 DPI pro širokoúhlý a pro makro 400 DPI. Doba jednoho naskenovaného pohledu při největším rozlišení je cca 3 minuty. Skener má rychlost snímání maximálně 50 000 bodů za sekundu (*Guidi – Remondino – Morlando - Del Mastio – Uccheddu – Pelagotti, Často kladené otázky o NextEngine, Produktový leták NextEngine HD*). Tento typ skeneru jsem využil pro digitalizaci různých artefaktů.



Obr. 31: Skener NextEngine HD při záznamu textury horní obrázek a při průběhu skenování dolní obrázek.

Podobným zařízením jako předešlý přístroj je zařízení Handyscan 3D od firmy Creafom. Jedná se opět o triangulační metodu skenování, avšak s vyspělou patentovanou technologií snímání a vyhodnocení dat.

Tento skener je dražší, jeho pořizovací cena je okolo 500 000 Kč za nejnižší model. U HandyScanu je velkou předností jeho mobilita, přesnost a automatické pozicování. Zatím existují 4 modely HandyScanů, které se mezi sebou liší přesností skenování. Jeden z modelů má schopnost zaznamenat texturu objektu. HandyScan je tzv. ruční skener a jeho celková hmotnost se pohybuje okolo 1,3 kg. Objekt je snímán pomocí dvou až tří kamer podle zvoleného typu a laserového kříže. Použití HandyScanů se u nás v poslední době rozšiřuje, a to včetně použití pro dokumentaci památek. Jeden přístroj typu VIUScan s příslušenstvím vlastní Laboratoř geoinformatiky FŽP UJEP z prostředků MŠMT (Rozvojový projekt) a druhý typ ExaScan se 3 kamerami, který je přesnější, vlastní Centrum pro dokumentaci a digitalizaci FF UJEP. Od roku 2014 skener HandyScan VIUScan vlastní i KAR FF ZČU (obr. 32, tab 4). Skenery byly použity například v Egyptě na dokumentaci místních artefaktů a na některé typy památek u nás, například na Boží hrob u Velenic (*Suková – Brůna – Kroužek – Novotný – Kabelka – Hegrlík 2010, Podroužek 2010*). Cena HandyScan VIUScan je okolo jednoho milionu korun.



Obr. 32: HandyScany vlevo ExaScan, vpravo a dole VIUscan (zdroj: Creaform, autor).

3D scanner ExaScan	3D scanner VIUscan
3 kamery	2 kamery + barevná kamera na snímání textury
Hmotnost 1,25 kg	Hmotnost 1,3 kg
Rozměry 172 x 260 x 216 mm	Rozměry 172 x 260 x 216 mm
Snímání 18 snímků/s	Snímání 18 snímků/s
Laser II (eye safe)	Laser II (eye safe)
Rozlišení v ose Z 0,05 mm (0,002 in.)	Rozlišení v ose Z 0,1 mm (0,004 in.)
Přesnost až 40 μ m (0,002 in.)	Přesnost až 50 μ m (0,002 in.)
ISO20 μ m + 100 μ /m	ISO20 μ m + 200 μ /m

Tab. 4: Technické parametry HandyScanů.

Poslední novinkou v pozemním mobilním laserovém skenování je mobilní skener GEOSlam ZEB1 od firmy GEOSlam, která vznikla v roce 2012 mezi CSIRO a firmou 3D Laser Mapping (obr. 33). Skenery firmy GEOSlam využívají unikátní algoritmus Simultánní Lokalizace a Mapování (SLAM). Laserový skener funguje podobně jako pozemní laserové skenery, ale během skenování je možné se volně pohybovat a přesouvat svojí polohu bez toho, aby skener obsahoval GNSS aparaturu. Skenování je tedy možné i v interiéru. Algoritmus dokáže postupně spojovat jednotlivé skeny rychlostí 40 až 100 skenů za vteřinu. Každý sken je vybaven informacemi o poloze skeneru v okamžiku skenu, což zajišťuje vysokou přesnost vytvářených mračen bodů. Algoritmus dokonce dokáže porovnat tvary naskenovaných objektů a následně je vyrovnat a zkorigovat tak, aby skutečně odpovídaly realitě. Skenování je proto extrémně rychlé. Při skenování se pružná hlava se senzorem houpe do stran a přitom jsou do prostoru vysílány laserové pulzy. Skener nezaznamenává barvu či texturu mapovaného objektu.

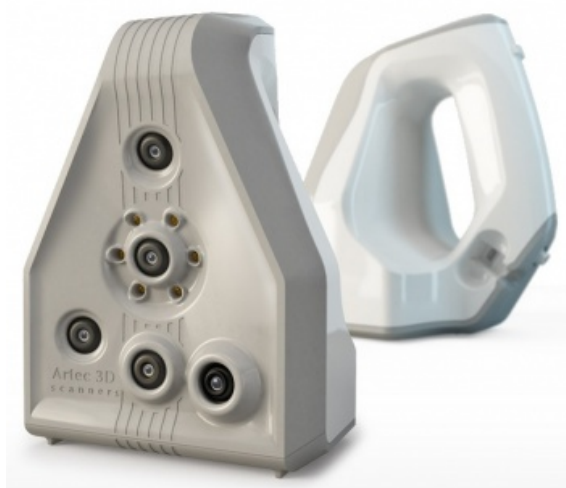


Technické Specifikace

- Rychlost sběru dat - 43200 bodů za sekundu
- Přesnost 3D měření - Typicky +/-0.1% (cca 7 mm v interiéru)
- Dosah - Až 30 m (15 m ve venkovním prostředí)
- Laser Class - Laser třídy 1 Bezpečný pro lidské oko
- Zorné pole - 270 x ~100 stupňů
- Hmotnost skenovací hlavy - 665 g
- Rozměry skenovací hlavy - 60 x 60 x 360 mm

Obr. 33 Mobilní skener GEOSlam ZEB1.

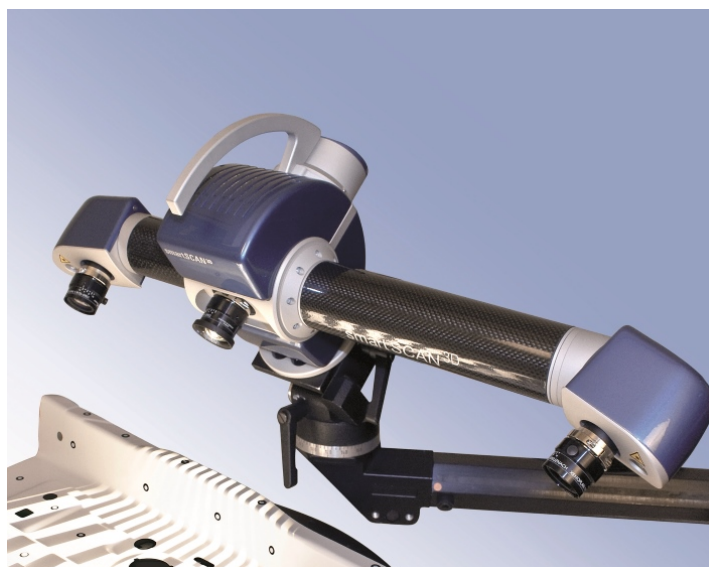
Favoritem mezi optickými skenery je firma Artec se svým inovovaným skenerem Space Spider (obr. 34). Optické skenery firma Artec vyrábí od roku 2008. Skener Spider je ruční přenosný skener, který pro skenování využívá strukturované světlo (zdrojem světla je modrá led dioda). 3D skener se hodí na skenování malých objektů včetně jejich textury. Ke zpracování a zpřesnění nasnímaných dat využívá vlastní software Artec Studio. Poslední verze skeneru Spider byla inovována v roce 2016 a to především zkrácenou dobu zahřátí na provozní teplotu přístroje, kde jsou snímkována data zaznamenaná v kvalitě zaručené výrobcem. Cena je okolo jednoho milionu korun.



Parametr	Popis
Typ 3D skeneru	ruční
Snímání barvy a textury	ano
Referenční značky	ne
3D rozlišení	0,1 mm
3D bodová přesnost	0,03 mm
3D přesnost na vzdálenost	0,03 (na vzdálenost 100cm) %
Rozlišení textury	1,3 Mpx
Zdroj světla	modré světlo
Pracovní vzdálenost	0,17 - 0,35 m
Zorné pole (bližší)	90 x 70 mm
Zorné pole (vzdálenější)	180 x 140 mm
Rychlost snímání	až 7,5 fps
Doba expozice	0,0005 s
Zpracování dat	ano
Kalibrace	ne
Výstupní formáty	AOP, ASC, CSV, OBJ, PLY, STL, WRL
Hlavní geometrická kamera	Machine Vision kamera
Rozlišení geometrie	neuvedeno px
Kamera pro snímání barvy	barevná kamera
Šířka	80 cm
Výška	125 cm
Hloubka	195 cm
Hmotnost	1,8 kg

Obr. 34 Ruční optický skener Space Spider.

Trojrozměrné skenery od firmy Breuckmann GmbH jsou jedny z nejlepších. Tato firma stála u zrodu skenovací technologie pomocí strukturovaného světla (firemní označení: 3D skener s proužkovou projekcí). Na trhu působí už 25 let, a proto má velké portfolio stále inovovaných skenerů. Skener SmartSCAN disponuje stereo kamerami a jedním světelným projektorem (obr. 35). Pro obsluhu a zpracování 3D dat je dodáván s vlastním softwarem. U skeneru jsou vyměnitelné objektivy, které určují parametry skenování. Například u objektivu FOV M-250 je dostupné zorné pole 205x150x120 mm, s rozlišitelností 0,125 mm a přesností snímání $\pm 0,020$ mm. Cena se také pohybuje okolo 1,5 milionu Kč.



Obr. 35 3D skener Breuckmann SmartSCAN C2.

7 SOFTWARE

K úpravě, zpracování, modifikování a vizualizování je vždy potřeba softwarů třetích stran, jelikož ty, které jsou dodávány se skenery či k produkci dat z obrazové korelace, nedokáží zpracovat veškeré potřebné úkony. Základní rozdělní softwaru je na volně dostupný (a tedy zdarma) a na komerční, který toho dokáže mnohem více, ale je vždy placený. Dostupnost potřebných programů bez finančních prostředků a zkušebních verzí je tedy někdy velmi složitá.

7.1 Editační a vizualizační programy

Software pro editaci a celkovou práci s 3D daty je velmi drahý, někdy i dražší než samotný 3D skener. Toto odvětví je stále velmi specifické, a proto se zde odráží vysoké náklady pro pořízení softwaru. Pro potřeby archeologie je tento software až příliš složitý a obsahuje nepřeberné množství možností, které téměř nikdy nevyužijeme v takové míře, jako ostatní technické obory. Některé firmy naštěstí poskytují speciální slevy na pořízení pro výzkum, vývoj či nekomerční použití, ale existují i jiné možnosti, kdy lze využít software zdarma.

K legálnímu využití softwaru musí být dodržena licenční ujednání každého konkrétního produktu. Licence se může lišit podle rozhodnutí a podmínek autora či majitele. Existuje celá řada softwarových licencí, ale nejvíce zajímavé jsou licence, které umožňují používání a šíření zdarma. Tyto jsou označovány pojmem svobodný software. Právě pro archeologii, ochranu a dokumentaci památek je toto nejlepší cesta, jak vlastnit a využívat různé druhy speciálních programů.

Nejznámější je typ licence s otevřeným zdrojem dat (Open Source). Tato licence poskytuje uživatelům zdrojový kód využívat, prohlížet a upravovat. Je zde možnost software nekomerčně využívat a dále šířit. Jako příklad Open Source softwaru mohu uvést například programovací jazyk Java, kancelářský software OpenOffice.org, 3D grafický editor Blender a vektorový editor Inkscape. Webový prohlížeč a program pro PTM je napsaný právě v jazyku Java (*opensource.org*).

Další podstatnou licencí je GNU General Public License. Poslední změny licence, která existuje již od roku 1989, byly ve verzi 3 z roku 2007. I tato licence poskytuje práva svobodného softwaru a používá copyleft k zajištění ochrany těchto svobod i pokud je dílo změněno či k něčemu přidáno. Copyleft vznikl proto, aby autor kupříkladu neodebral svobodu softwaru a tím pádem by případní uživatelé tuto svobodu ztratili a nemohli by dál se softwarem pracovat a nakládat podle své potřeby (*GNU*). Licenci GNU využívá například velmi oblíbený 3D editor MeshLab.

Začátek vývoje se datuje do roku 2005 pod Univerzitou v Pisa a nyní je šířen v aktuální verzi 1.3.3. Podobný program jako je MeshLab je CloudCompare ve verzi 2.6.2, který náskok MeshLabu rychle dohání a obsahuje stejnou licenci.

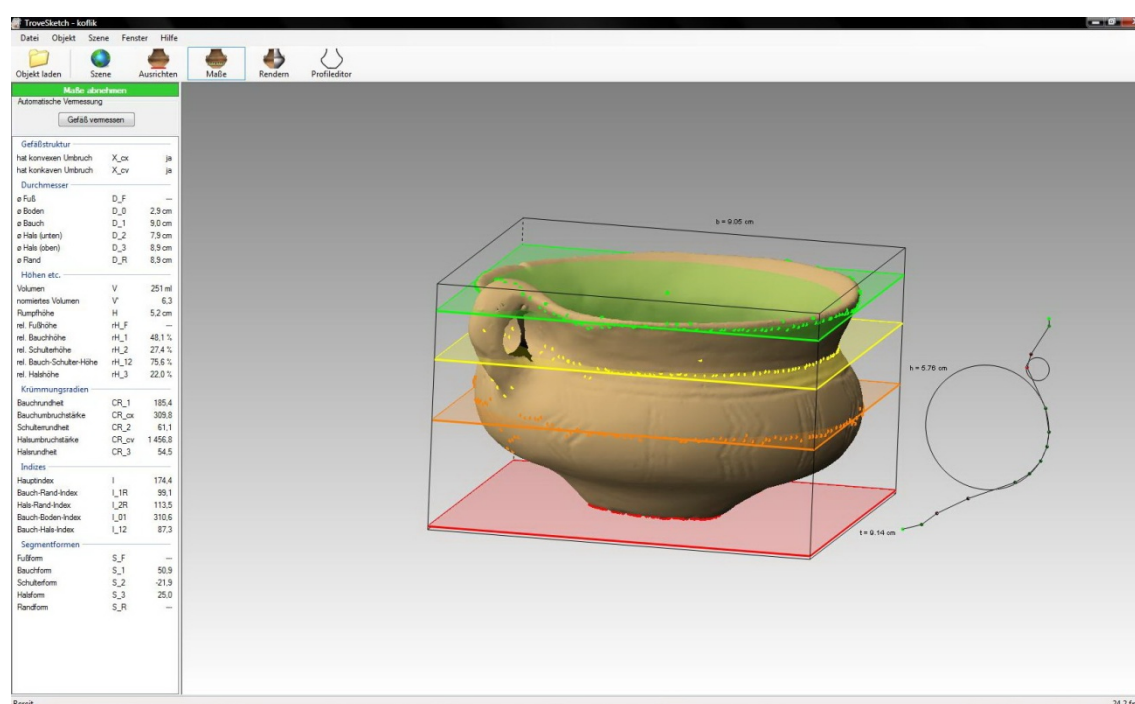
Ostatní nesvobodný software je potřeba zakoupit nebo využít možnosti demo, trial (na zkoušku), evolution (vývojové) či studentské verze. Vyjmenované verze jsou většinou k dispozici zdarma nebo výměnou za poskytnutí osobních informací.

Pro vytváření modelů jsem také zkusil jiné programy jako například free software MeshLab nebo CloudCompare a také komerční trial verze Geomagic Studio 2014, SolidWorks 2010 a Rhinoceros 5.0. Nejvíce mi ale vyhovovalo ovládání a možnosti v programu Geomagic Studio 2014. V základním rozsahu vytváření a editování modelů jsou všechny programy velice podobné a záleží jen na dalších schopnostech a kvalitě pracování s daty. Komerční programy mají větší možnosti a dokáží pracovat s větším obsahem dat s větší přesností. Tuto výhodu spatřuji například při práci s daty pro strojírenství a kovovýrobu, kde se pracuje s přesně obráběnými součástkami a musí být dodržena určitá přesnost výrobku.

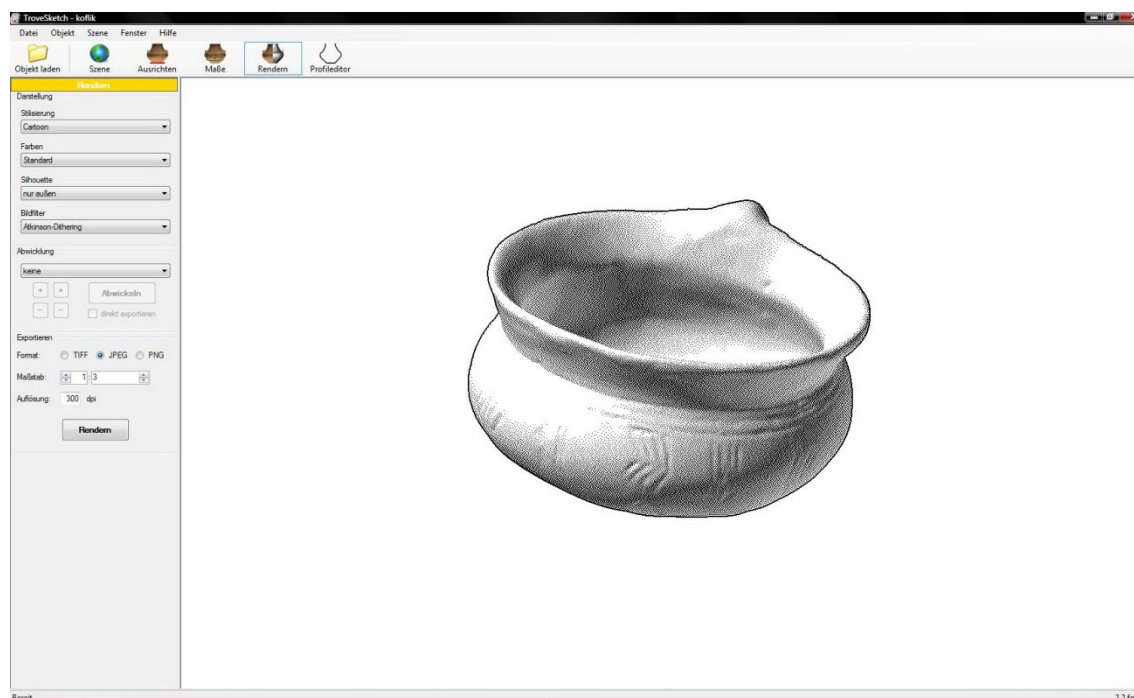
7.2 Speciální programy pro trojrozměrná archeologická data

Jediným specializovaným softwarem pro práci s 3D daty a k archeologickým účelům, s kterým jsem se setkal v roce 2011, byl program TroveSketch V0.9 od firmy 3DInsight GmbH. Po technické stránce byl program vytvořen na Katedře počítačové grafiky a vizualizace na Vysokém učení technickém v Chemnitzu pod vedením G. Brunnetta a C. Hörra a po vědecké stránce projekt zaštil T. Westphalen ze Státního úřadu pro archeologii v Sasku. Program vznikl pro rychlou, levnou a kvalitní dokumentaci velkých objemů archeologických nálezů, první beta verze byla prezentována v říjnu 2006. Primárně je určený pro dokumentaci keramických nádob, ale pro vizualizaci a profilování dokáže

využít jakýkoliv digitální model. Program umí také automaticky zaznamenat hlavní rozměry nádob, jako jsou například výška, maximální průměr, výšky jednotlivých segmentů nádoby a důležité údaje pro deskriptivní popis a typologii nádob (obr. 36). Dále pak umí vytvářet nespočet alternativ vizuálního a ilustračního podání artefaktu a nabízí možnost vytváření jakýkoliv profilů (obr. 37).

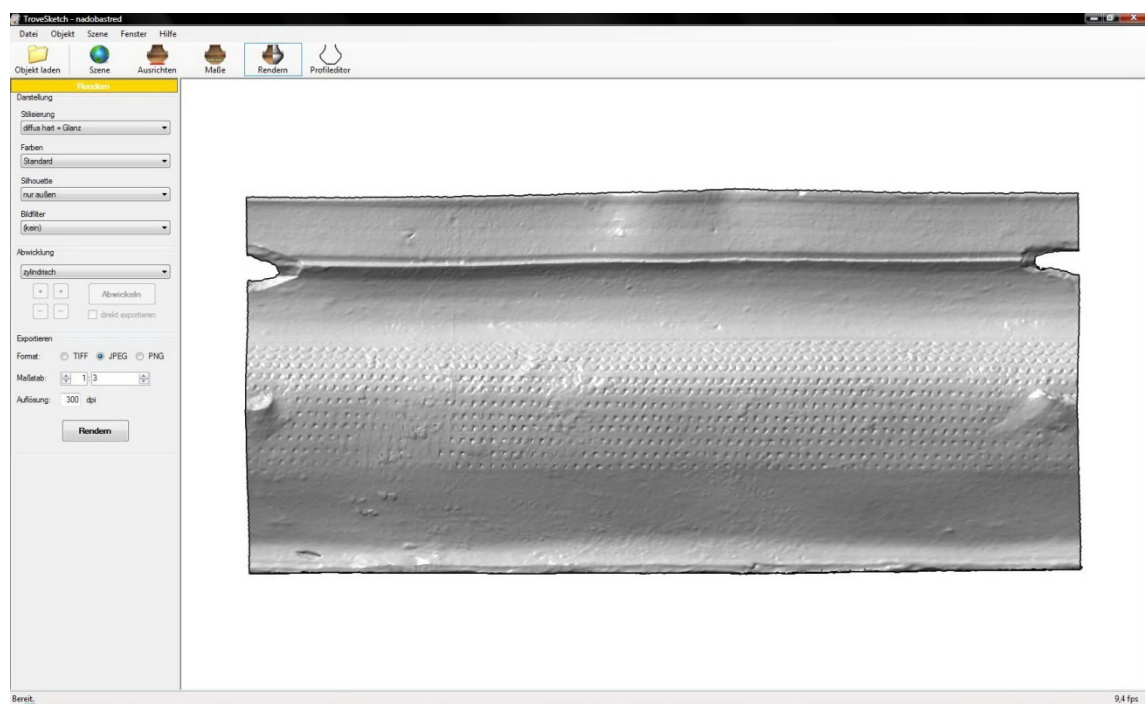
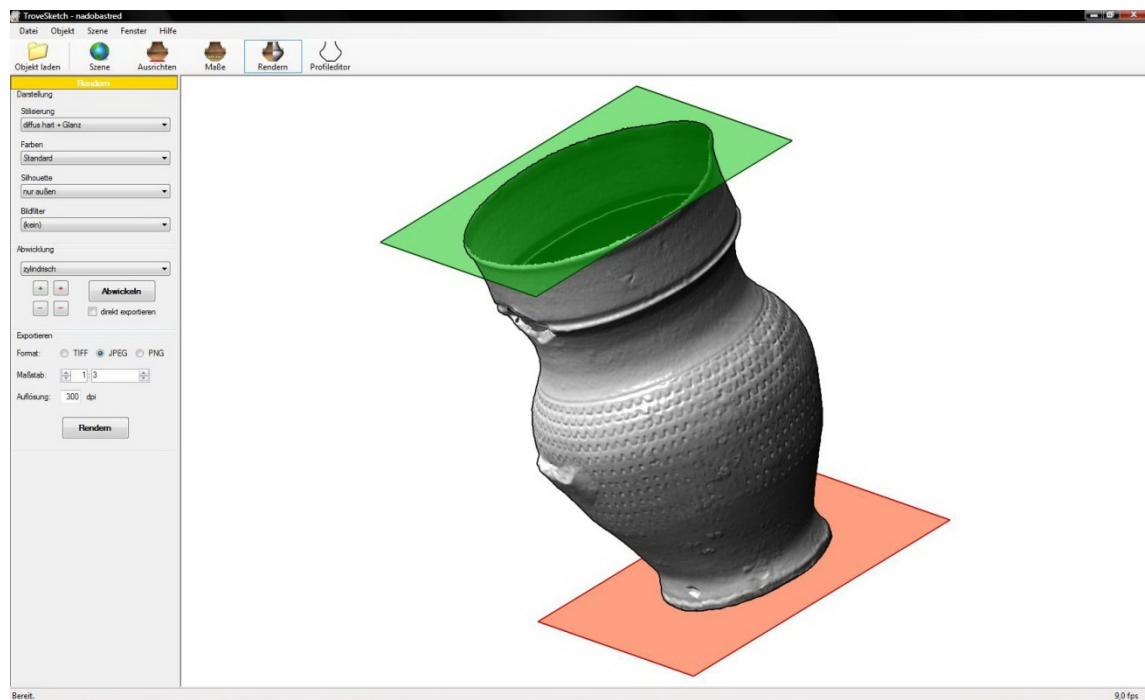


Obr. 36: Automatische deskripcie keramiky.



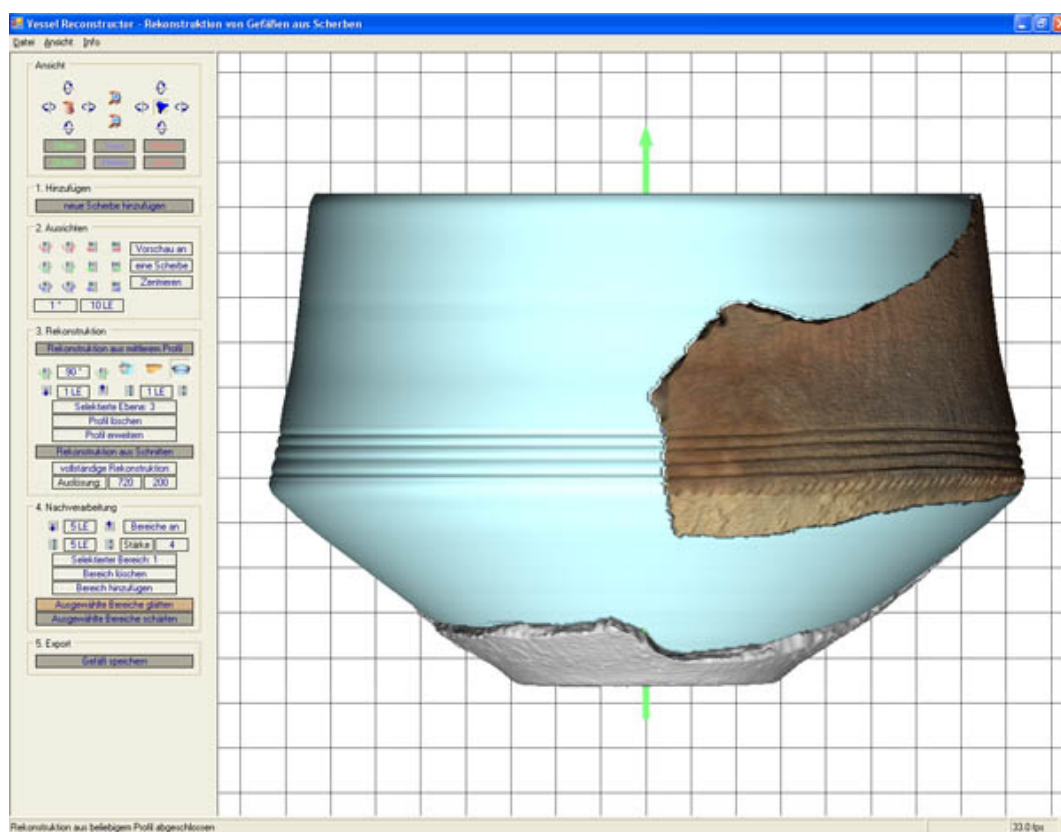
Obr. 37. Ukázka vizualizačního stylu.

Pro nádoby, které mají výzdobu či nějaký reliéf, je možnost rozvinutí povrchu do plochy, aby byla výzdoba celá v jednom pohledu a mohlo se s ní dále pracovat. Rozvinout objekt můžeme válcově nebo kónicky s nastavením jakékoliv stylizace zobrazení. Pro rozvinutí si můžeme určit horní a dolní hranici, která určuje výšku zájmového rozvinutí objektu (obr. 38).



Obr. 38 Rozvinutí nádoby.

Druhý speciální program je také od firmy 3DInsight, která vyvinula program pro 3D rekonstrukci nádob z několika střeplů, aby mohl být dopočítán objem, vytvořen profil nádoby, z níž zbylo jen torzo atd. Vessel Reconstructor umožňuje vytvořit virtuální rekonstrukci nádob (obr. 39).



Obr. 39: TroveSketch (zdroj: TroveSketch).

TroveSketch je dobře provedený program pro práci s 3D modely, uzpůsobený pro potřeby archeologů. K dokumentaci nádob se dle mého názoru velice osvědčil a záleží, jak velké bude jeho rozšíření v budoucnosti, když vezmeme v úvahu jeho cenu, která za 1 rok pronajmutí činí 1555 euro a koupě programu vyjde na 4200 euro. Některé základní dovednosti, jako je rozvinutí a vytvoření řezu objektem, umí i bezplatné programy. Pro deskripci artefaktu jsem se zatím s ničím tak sofistikovaným nesešel a pro stylizaci zobrazení zatím nejsou ostatní programy tak daleko ve vývoji jako TroveSketch. Trojrozměrný záznam keramických střeplů nebo nádob bude časem standardně využívanou archeologickou metodou (Karasik - Smilansky 2008).

8 OPRÁVNĚNÍ A PRÁVO

Problematika ochrany práva je například i s publikováním vlastních vytvořených dat. Problém nastává, když svá autorská díla jako jsou fotografie, videa, zvukové nahrávky, 3D modely atd. neopatří autor žádnou licenci. Pro tato díla následně platí ustanovení autorského zákona, kdy nikdo bez souhlasu autora nesmí s dílem jakkoliv nakládat. Proto vznikla nová licence Creative Commons (CC), která si zakládá na přesném vymezení vztahu, mezi autorem a osobou, která by dílo chtěla použít. Licence Creative Commons vznikla proto, aby byla možnost autorská díla zveřejnit a legálně sdílet (CC). Licence držitelům autorských práv umožňuje poskytnout k dispozici některá práva na užívání díla veřejností, zatímco jiná práva jim stále náleží. Existují 4 základní vlastnosti licence (*Licence CC, CC prvky*).



Uveďte autora (zkratka *by*): Společný prvek pro všechny licence. Uživatel má povinnost uvést údaje o autorovi a dílu, a to způsobem jaký autor určil. Pokud toto není uvedeno, je nutné uvést přinejmenším jméno či pseudonym, název díla a odkaz na původní licenci. Pokud bude šířeno upravené dílo, musí být uvedeno, jakým způsobem je dílo upraveno.



Zachovejte licenci (*sa*): Upravené licencované dílo musí být vystaveno pod stejnou nebo slučitelnou licenci.



Neužívejte dílo komerčně (*nc*): S dílem může být nakládáno pouze pro nekomerční účely, přičemž za nekomerční účel lze považovat výměnu díla za jiné prostřednictvím výměnných sítí. Při šíření díla nesmí plynout uživateli žádný zisk.



Nezasahujte do díla (nd): Je zakázána jakákoliv úprava, změna či doplnění díla. Rovněž je zakázáno jeho část nebo celek zpracovat s dílem jiným.

Autorská práva a duševní vlastnictví jsou ve světě chráněny zákony konkrétních států i dohodami nadnárodních organizací, jako je například Světová obchodní organizace (WTO). Autorská práva se vztahují i na 3D digitalizaci předmětů a 3D tisk.

Licenci CC například využívá web Sketchfab. Když se autor rozhodne poskytnout svoje 3D digitální modely ostatním, vybere si případnou variantu či kombinaci CC licence. Na webu Sketchfab mám realizováno svoje virtuální muzeum (viz kapitola 11.1).

9 SBĚR 3D DAT A JEJICH PROBLEMATIKA

3D digitalizace má u některých materiálů omezené limity pro jejich zaznamenání. Obecně se jedná o problémy s lesklými předměty (sklo, porcelán, polychromie atd.), mokřými předměty, které se také lesknou a černými lesklými povrchy (laky, plasty, uhlí atd.; *Brůna - Brejcha – Marek - Větrovská 2015, 26*).

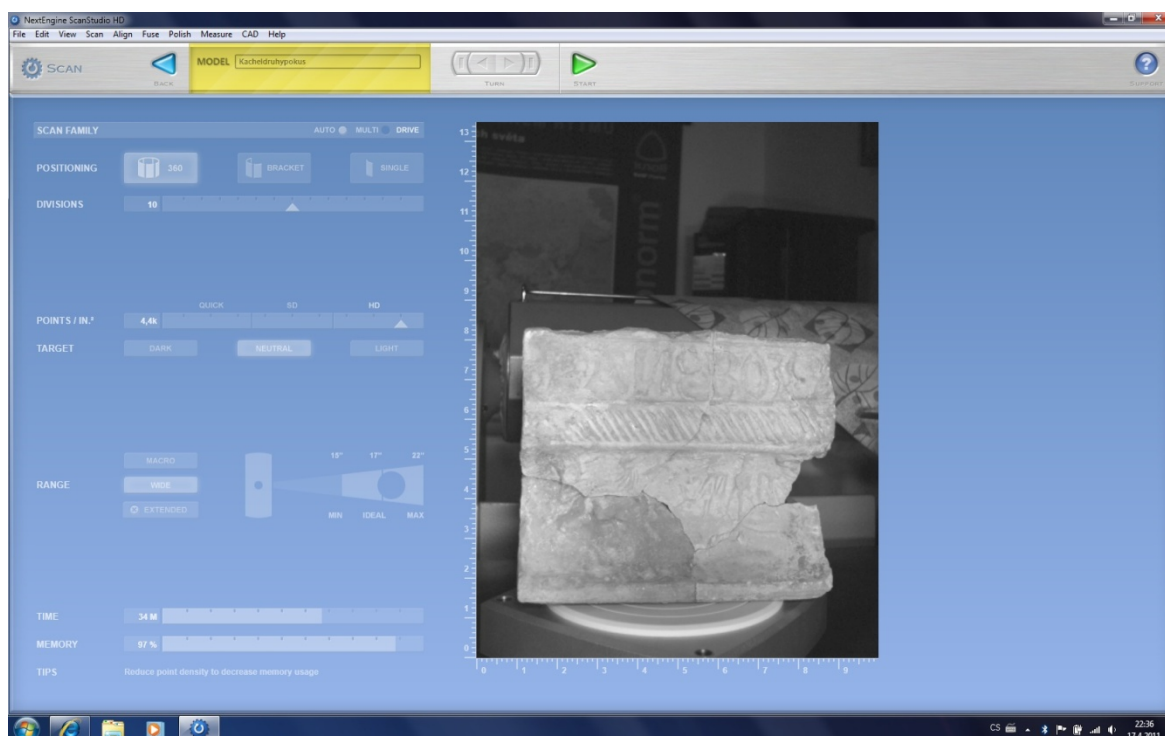
9.1 Metadata

Při produkci 3D dat (například trojrozměrnými skenery či metodou obrazové korelace) vznikají skrytá metadata, tedy data o datech. Metadata nesou informace o primárních 3D datech a jejich vzniku. Problém je, že metadata nejsou zaznamenávána a nikdo již z 3D digitálních modelů nezjistí jejich genezi vzniku ani pozdější úpravy pro celkové zhodnocení kvality. Většinou se ani nearchivují primární surové nezpracované skeny, které by mohly napomoci k informacím o zpracování. Metadata by tedy měla obsahovat informace o přístroji či metodě produkci 3D dat, nastavení přístroje či softwaru k sběru 3D dat, překážkách při skenování či snímkování, softwaru pro editaci, technice

zvolené k editaci (zjednodušování, vyhlazení, odstranění hrotů atd.). Celková struktura by měla být standardizovaná.

9.2 Trojrozměrné skenování se skenery NextEngine a HandyScan VIUscan

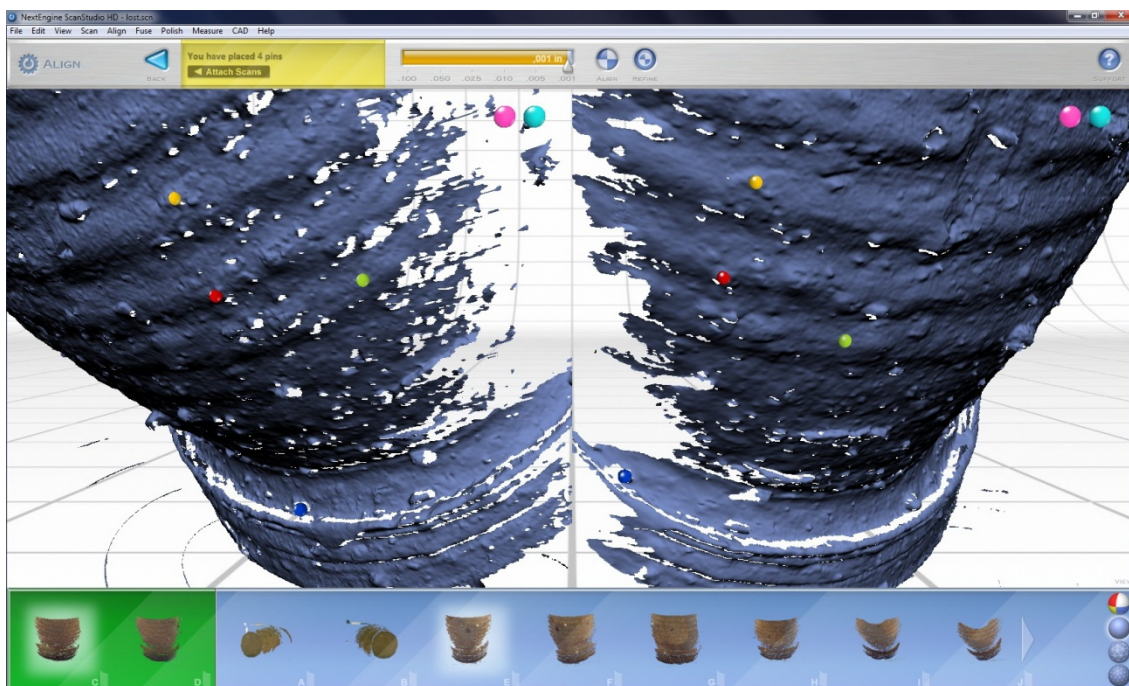
Movité artefakty jsem se rozhodl naskenovat pomocí skeneru NextEngine, který mám k dispozici a nebyl problém se s ním kamkoliv dopravit. Po vybalení a zapojení všech nezbytných komponentů skeneru do počítače se spustí dodávaný obslužný program ScanStudio HD, který řídí skenování a také obsahuje základní editační nástroje pro vytváření modelů. ScanStudio HD jsem využíval v poslední dostupné verzi 1.3.0 v 64 bitovém i 32 bitovém provedení. Software má lištu s hlavní nabídkou a také významové ikony pro rychlou orientaci. Postup skenování objektů by měl být následující: S prvním spuštěním programu by měla být provedena kontrola základního nastavení pro všechny skenované pohledy, které budou zaznamenány. Jde o nastavení módu textury, kdy máme na výběr z monochromatické, RGB nebo multispektrální barvy. V základním nastavení lze také vypnout záznam textury nebo automatické spojování skenů zaznamenaných pomocí točny. Hned na začátku skenování si musíme rozmyslet, jak velkou přesnost a rozlišení budeme chtít docílit u zvoleného skenovaného předmětu. Toto rozhodnutí nám může určit sám předmět podle své velikosti a členitosti. Můžeme se rozhodnout, zda se chceme naskenovat objekt najednou nebo po částech, které později spojíme a jak velký detail na objektu chceme zaznamenat. Podle tohoto rozhodnutí umístíme předmět před skener v předem zvolené vzdálenosti pro skenování. V ScanStudiosu klikneme na Scan, kdy se nám zobrazí další volby pro skenování (obr. 40).



Obr. 40 Nastavení voleb skenování.

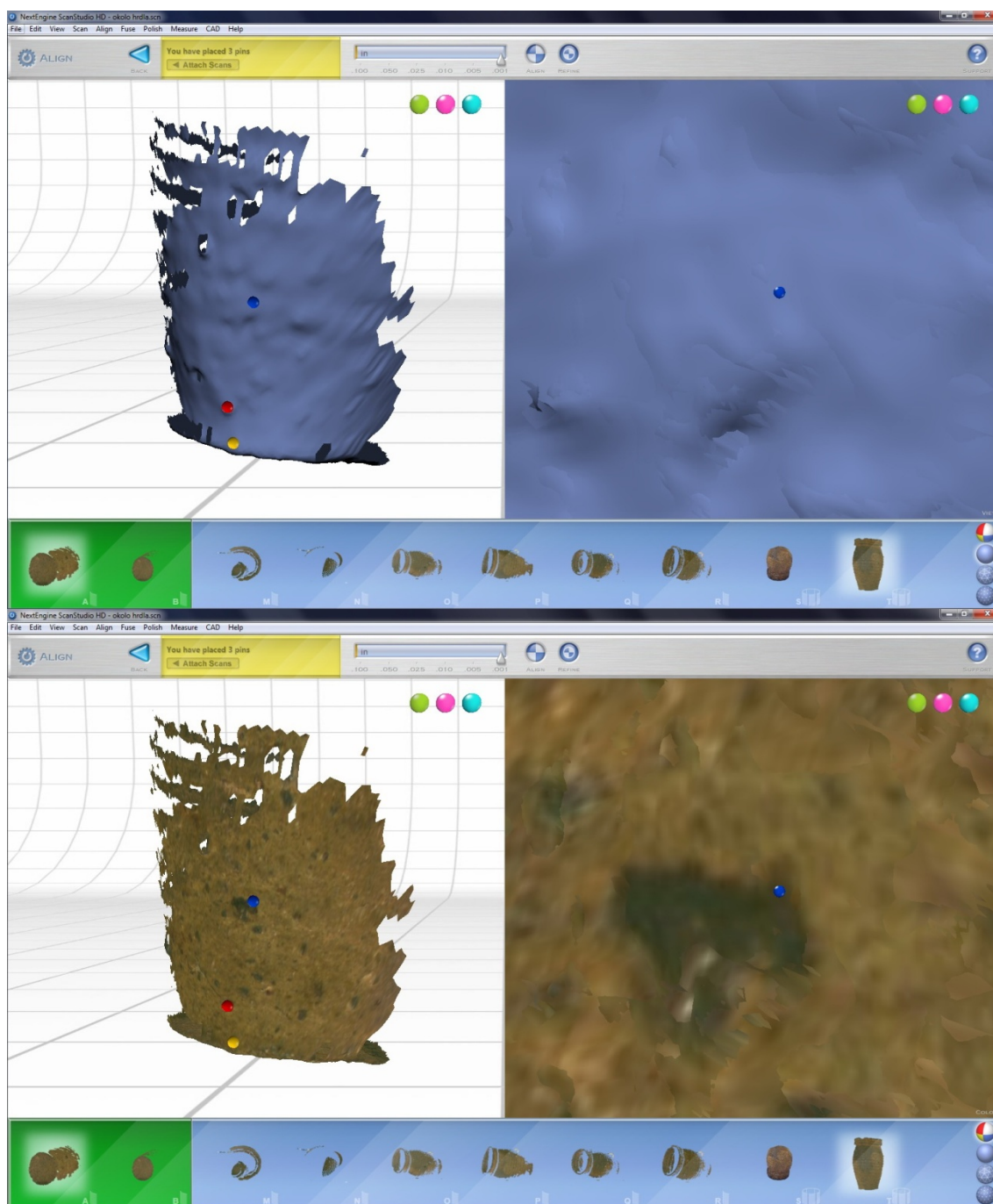
Můžeme si vybrat mezi skenováním na 360° pomocí automatické točny, skenování s volbou počtů kroků do 360° ve formě jednotlivých skenů nebo rozpětí, kdy je objekt naskenován na 3 pohledy, jeden centrální podle našeho uvážení a potom zleva a druhý z pravé strany objektu o zvolený počet kroků od vybraného centrálního skenu. Dále je zde možnost jednoho oskenování podle našeho uvážení. Při zvolení jedné z možností skenování by mělo být pamatováno na to, že je potřeba naskenovat celý povrch objektu pokud možno s přesahem na jiný sken, aby se později mohly všechny skeny spojit do jednoho celku. Naskenovaný pohled modelu se někdy označuje jako shell nebo pouze jako sken, využívat budu termín sken. Poté si navolíme dosah dle umístění objektu před skenerem a vybereme si, jaké bude výsledné rozlišení skenů. Zvolné rozlišení a počet oskenování objektu bude ovlivňovat celkový čas do konce úkolu, který se ukazuje dole společně se zatížením RAM počítače během skenování. Největšího počtu získaných dat (40 000 bodů na palec čtvereční) dosáhneme nastavením na největší rozlišení HD a makro záběr. Po naskenování celého objektu s dostatečným množstvím skenů se přesuneme do nabídky Align, kde skeny navzájem spojíme. S použitím

automatické točny se skupina skenů spojí automaticky. Lze to také provést ručně. Ke spojení nebo také ztotožnění dochází, když na každém skenu ručně zvolíme minimálně 3 stejné body, které jsou vidět a jsou stejné na prvním i druhém skenu (obr. 41).



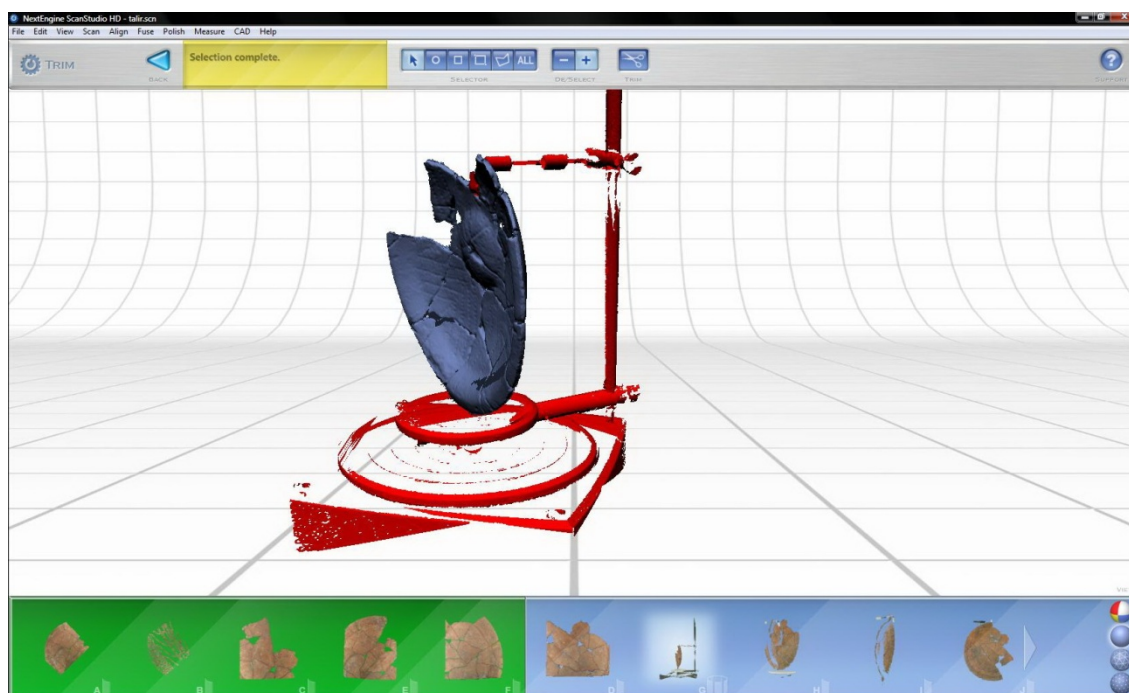
Obr. 41 Sjednocování skenů.

Body jsou označeny barvami a maximálně jich můžeme nadefinovat 9. Při využití pouze 3 nebo i více bodů bychom se měli snažit o jejich umístění do trojúhelníku, aby bylo docíleno správného spojení a návaznosti. K identifikaci stejného místa na obou skenech objektu nám mohou sloužit výrazné prvky na povrchu, textura nebo uměle označené značky. Někdy je problém tyto výrazné prvky najít na obou naskenovaných modelech. (obr. 42)



Obr. 42: Nahoře sjednocování sken pomoci mesh mesh, dole pomoci textury.

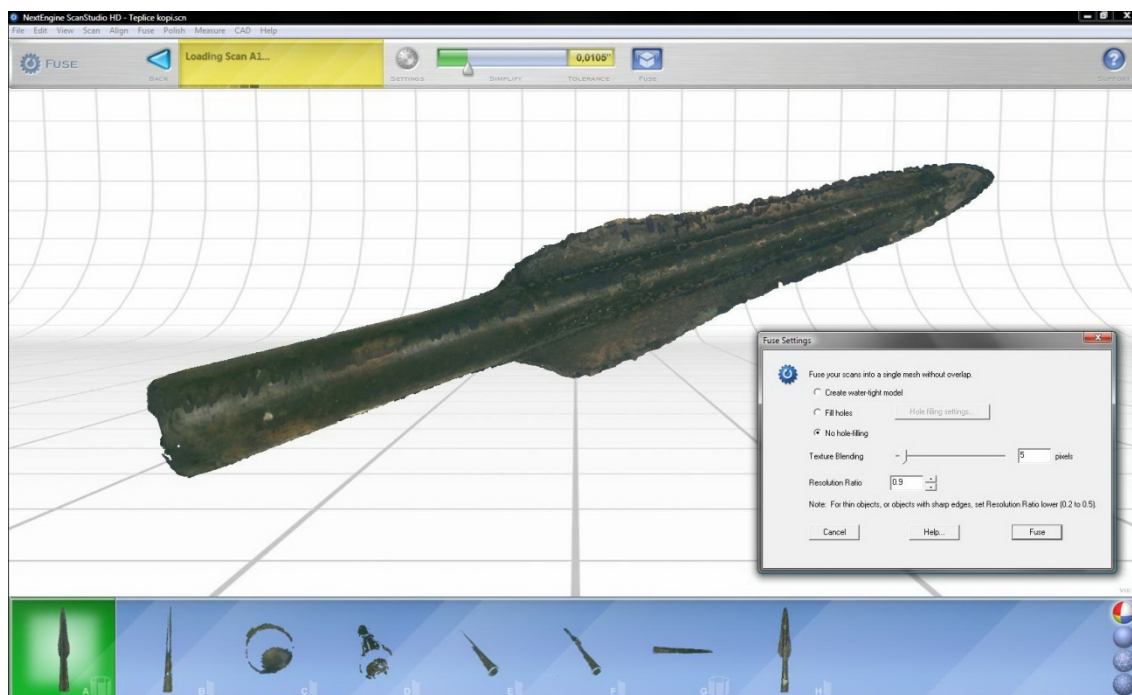
Před spojením nebo po spojení je také možné ořezat naskenovaný model o nadbytečné části, které byly naskenovány nad rámec potřeb, jako například podložka, držadlo objektu atd. Vybraná část se označí a za pomoci Trim (obr. 43) se z modelu odstraní. Lze rovněž využít automatického vystřihnutí pomoci Auto-Trim, které ale může být použito pouze na neupravený model.



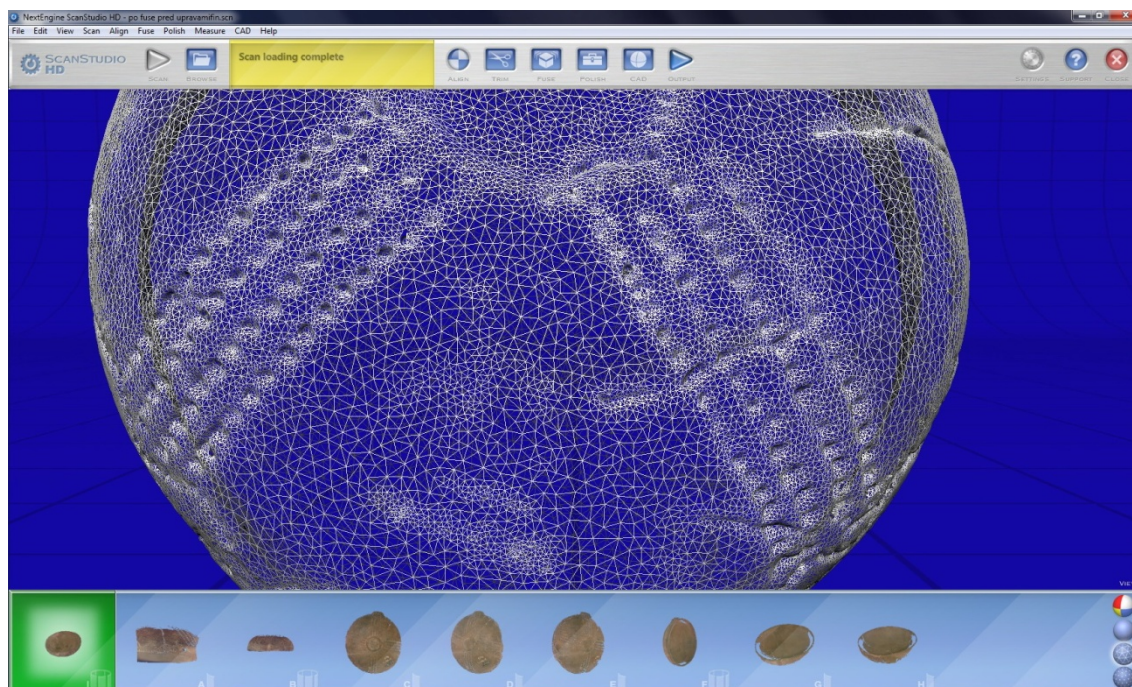
Obr. 43: Ořez nadbytečných částí modelu.

Po spojení všech skenů se na výsledném modelu mohou vyskytnout nepřesnosti, způsobené spojením surových dat do polygonové sítě. Skener sice naskenuje mračno bodů, ale z něho hned vygeneruje polygonovou síť mesh. Síť se skládá z trojúhelníků o definované velikosti stran podle hustoty bodů v mračnu. Proto je potřeba po úpravách znovu přepočítat výsledný povrch modelů ze spojených skenů. Tuto funkci je ve ScanStudiosu možno provést více způsoby. Buď pomocí více účelné nabídky Fuse (obr. 44) nebo z podnabídky Volume Merge Scans, kdy dojde k přepočítání povrchu a spojení mračna bodů pouze tam, kde se navzájem nepřekrývají původní skeny. Výsledný model má menší počet naskenovaných bodů, než kdyby byly spojeny všechny použité skeny dohromady. K tomuto dochází také při použití funkce Fuse pro zmenšení objemu výsledných dat, kdy je ale v nabídce možné zjednodušit model podle velikosti detailů. Většinou se skenuje na nejlepší rozlišení, aby byly zaznamenány všechny detaily, neboť výsledný sken obsahuje statisíce bodů a celkový model několik milionů. Pro zachování přesného tvaru modelu není tolik dat zapotřebí a výsledný model je zjednodušován. Jednoduché tvary obsahují méně dat podle zadané hodnoty a složité

tvary si zachování svoji složitou geometrii a tím i více záznamů o tvaru (obr. 45).



Obr. 44 Nastavení funkce Fuse.



Obr. 45 Zjednodušená síť talíře.

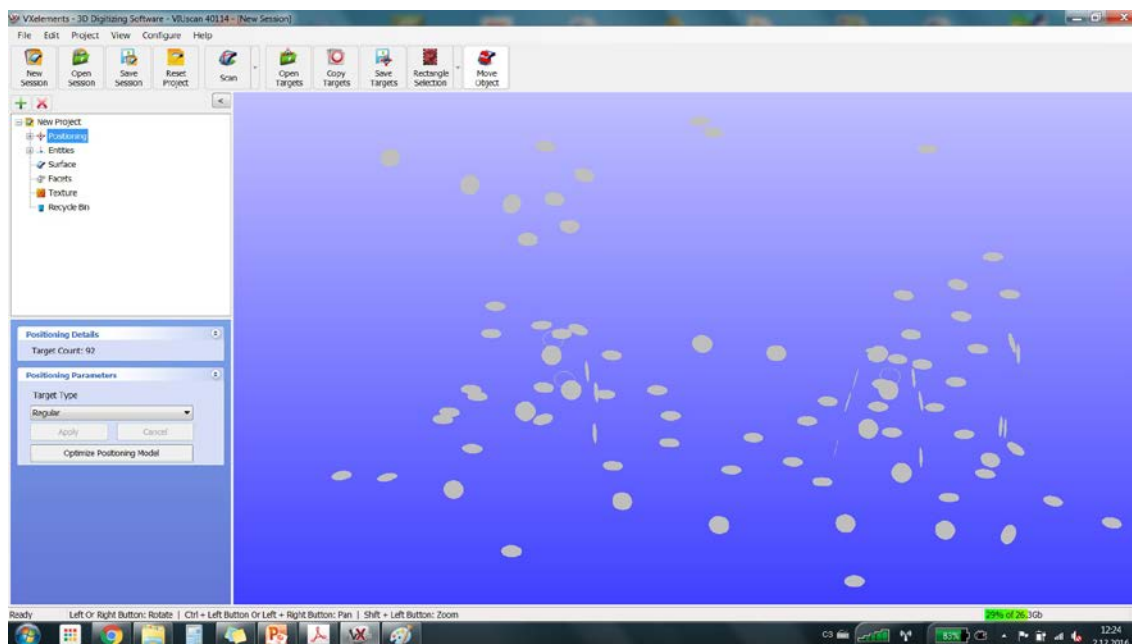
Dále je zde možnost automatického záplatování děr vzniklých při přepočítání nebo během naskenování dotyčného místa z důvodu nedostatečného nebo špatného úhlu dohledu kamery či odrazu nebo pohlcení laserových paprsků. Po přepočítání by mělo následovat vylepšení modelů pomocí nabídky Polish, kde je možné vyčištění modelů od defektů, opětovné zalepení vzniklých děr buď ručně, nebo automaticky a také vyhlazení povrchu a zjednodušení vzniklé polygonové sítě. Vzniklý výsledný model s texturou můžeme uložit ve formátu .obj, .ply, .wrl nebo bez textury .stl, .xyz. Použitím těchto základních kroků by měl bez problémů vzniknout výsledný model. Texturu NextEngine zaznamenává při začátku každého skenu. Aby textura na předmětu byla stejnoměrně nasvícena a bez stínů, rozsvítí horní a spodní světlo mezi kamerou. Tuto kompozici si skener nafotí jako fotografii a ohraničí si pouze tu část, která byla naskenována a má optimální teplotu barvy pro hladké spojení ostatních textur. Poté je na části modelu namapován jen tento výřez z fotky. Celá fotka se ale uchovává a ukládá spolu s modelem do určeného výstupního formátu. Se spojováním a mapováním textur vzniká ale problém v jejich kvalitě.

Ve stejné kategorii triangulačních laserových skenerů je i HandyScan VIUscan. Který je o dost dražší než NextEngine ale obsahuje tzv. samopozicování. Veškeré nastavování a zpracování 3D dat proběhlo v programu Vxelements 2.0 Objekt je snímán pomocí tří kamer a laserového kříže. Pro určení vzájemné polohy skeneru a snímaného skeneru slouží na objektu či vně nalepené reflexní poziční značky. Poziční značky mají průměr 6 mm a jsou umístěny v síti. Mohou být od sebe navzájem vzdáleny od 3 až 10 cm. Určení polohy probíhá pomocí stereoskopického vidění dvou kamer, proto skener musí vidět vždy minimálně 3 body a během pohybu se skenerem je potřeba vidět 4 značky (obr. 46.)



Obr. 46 Trojrozměrné Skenování HandyScan VIUscan.

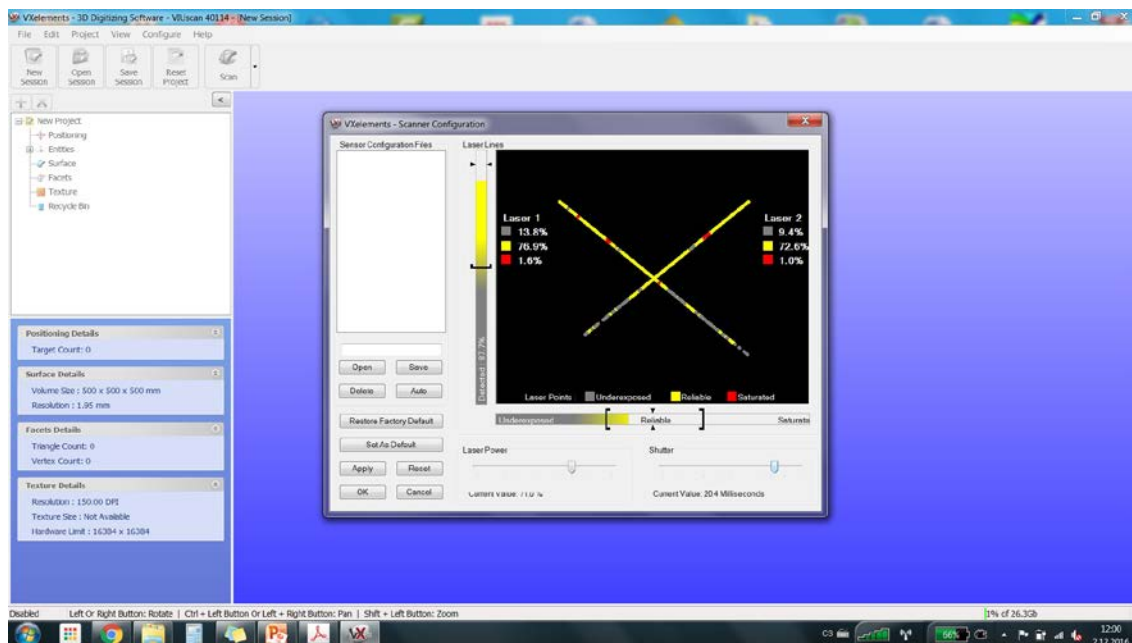
Při skenování je nejdříve nasnímána síť bodů, aby se skener mohl později orientovat v prostoru. Pomocí identifikace každého bodu v závislosti na jejich jedinečném rozmístění mezi sebou je skener schopen vrátit se na jakékoliv místo a dosbírat potřebné informace, které skenuje prostřednictvím laserového kříže a dvou kamer (obr 47.)



Obr. 47 Na snímkováná síť pozičních značek.

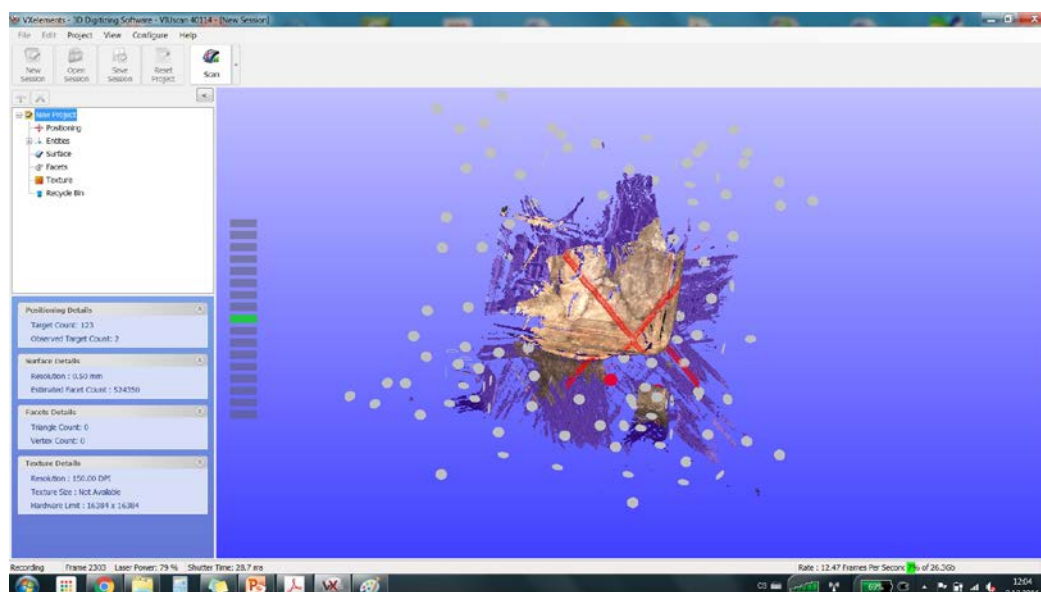
Data jsou vyhodnocována v reálném čase na počítači, kde je generována polygonová síť z mračka naskenovaných bodů. V případě vynechání

některého nenaskenovaného místa, které je ihned vidět na počítači, je možné se k němu kdykoliv vrátit, dokud jsou na objektu nebo na podložce nalepeny poziční značky. V ovládacím programu skeneru se mohou optimalizovat laserové paprsky pro různé typy objektů, kdy se poté naskenuje jen určitá část objektu podle odrazivosti laserové stopy. (obr. 48).



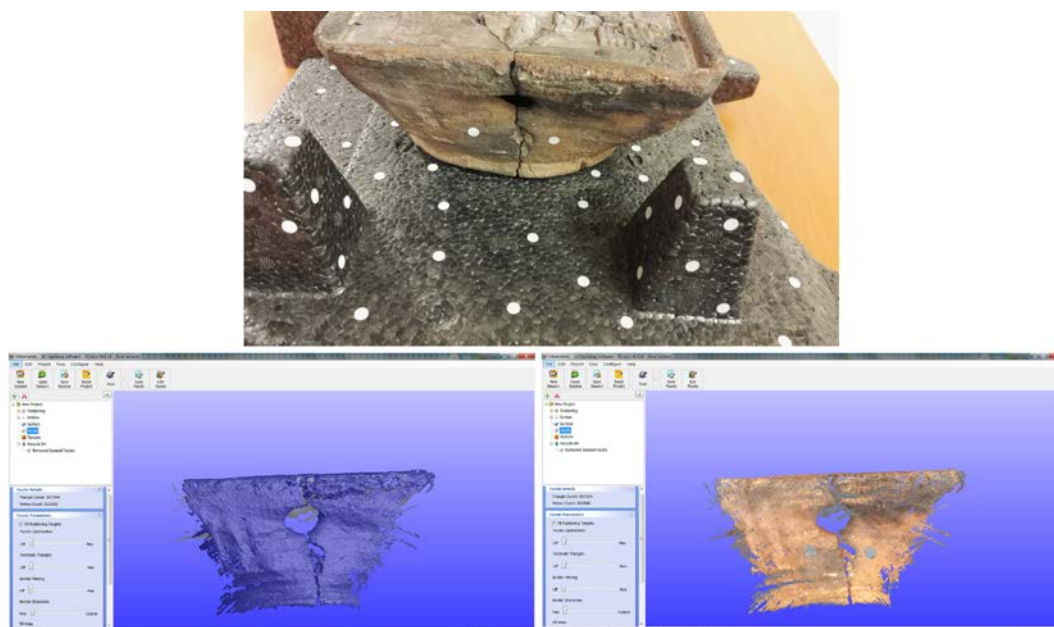
Obr 48. Nastavení laserové stopy pro skenování.

Okolo kamer je celkem 8 nebo více diod, které slouží k osvětlení reflexních pozičních značek a nasvětlení případné zaznamenané textury. Optimální přesnosti při skenování se dosahuje při vzdálenosti okolo 20 cm od povrchu, kterou indikuje pruh v programu podle barvy přiblížení či oddálení nebo signalizační diody přímo na skeneru (obr. 49).



Obr 49. Průběh 3D skenování atefaktu.

Poziční značky by měly být lepeny na místa, která jsou podobná svému okolí. Pokud by se toto nestalo, značka by zakryla část textury nebo reliéfu povrchu. Místo pod značkou je interpolováno podle svého nejbližšího okolí a i na zaznamenané textuře jsou proto místa pod ní bez informací (obr. 50).



Obr. 50 Ukázka nevhodně rozmístěných pozičních značek.

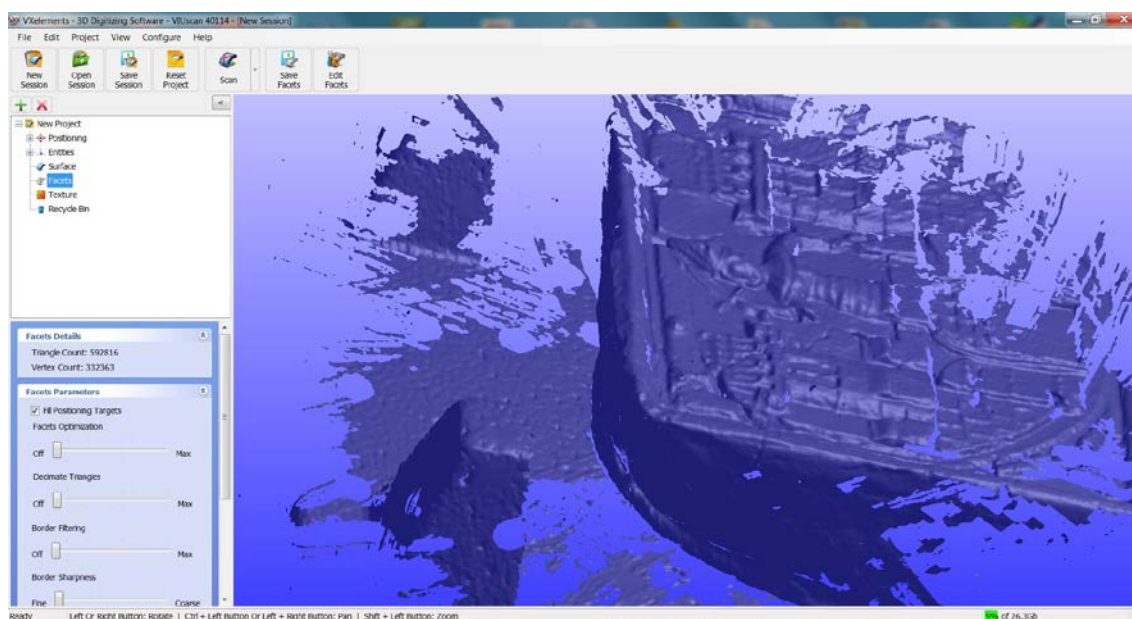
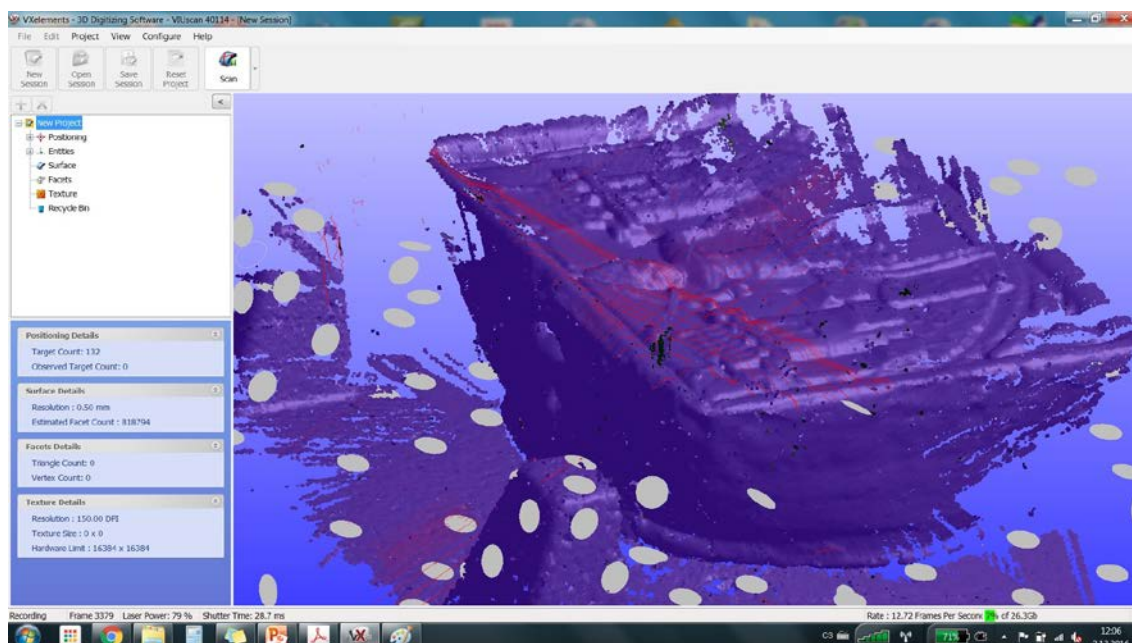
Značky vždy nemusí být umístěny na povrchu objektu a mohou být nalepeny na skle před snímaným objektem nebo umístěny v niťové síti nad povrchem, skener umí zaznamenat povrch do cca 15 cm od značek (obr. 51). Toto se hodí pro exponáty v muzeích či většinou všech artefaktů kde poziční značky nemohou být nalepeny či by pevně nedržely.



Obr. 51 Ukázka 3D skenování skrz sklo s pozičními značkami.

Skener dokáže zaznamenat povrch v nejmenším rozlišení 0,2 mm a texturu v maximálním rozlišení 250 DPI. Nastavením na tyto hodnoty skenování trvá pomalu a se skenerem se musí pohybovat pomalu. Také je toto nastavení velmi náročné na paměť RAM, kterou se doporučuje mít ve velikosti minimálně 16 GB. Snížením rozlišení či úplně vypnutím záznamu textury se vše urychlí a zjednoduší. Skener nedokáže zanamemat texturu ve formě fotografie ale obarvuje nasnímané body či interpolované fasetky podle realné skutečnosti. Výsledná textura je bezešvá ale nedokáže se vyrovnat textuře vysokým rozlišením z obrazové korelace. Pro skenování je vhodné mít umístěny poziční značky mimo objekt a skenovat jednotlivé pohledy na artefakt, které se potom v editačním programu pospojují. Pro náhled při skenování slouží nespočítaný povrch a po skončení skenování a vylepšení sesbíraných dat

je využít tradiční náhled na povrch v interpolované polygonové síti (obr. 52).

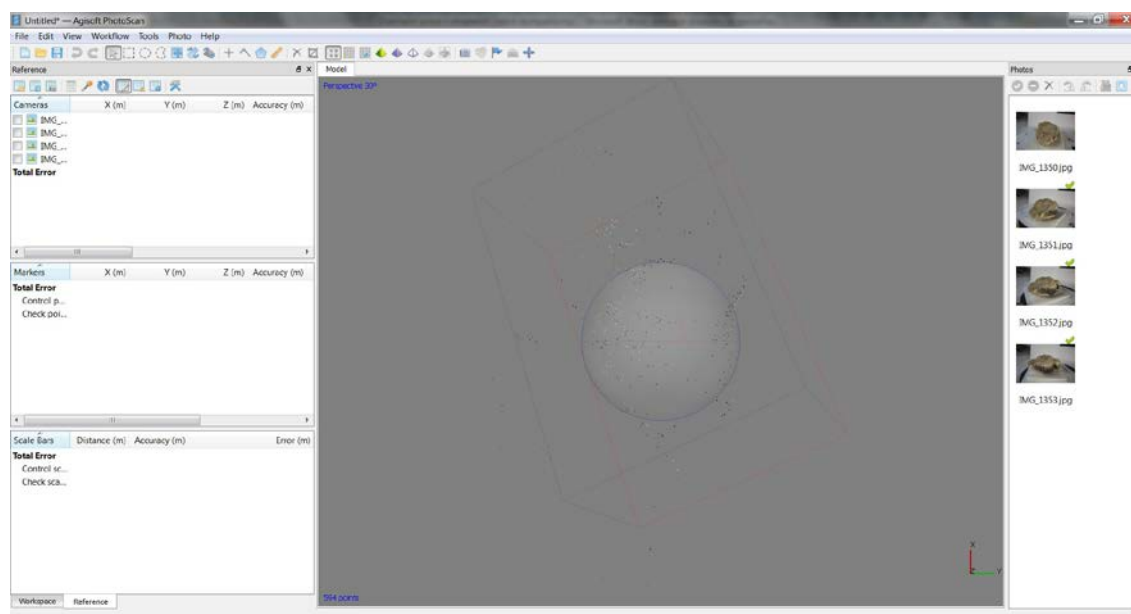


Obr 52. Ukázka náhledu na naskenovaná 3D data (nahore nespočítaný povrch, dole polygonová síť).

VElements dokáže jednoduché editování dat a to jak manuálně tak automaticky. Polygonovou síť dokáže optimalizovat, zjednodušit, umazat, odstranit odlehlé hodnoty, odstranit hroty atd.

9.3 Sběr dat a jejich vyhodnocení technikou obrazové korelace

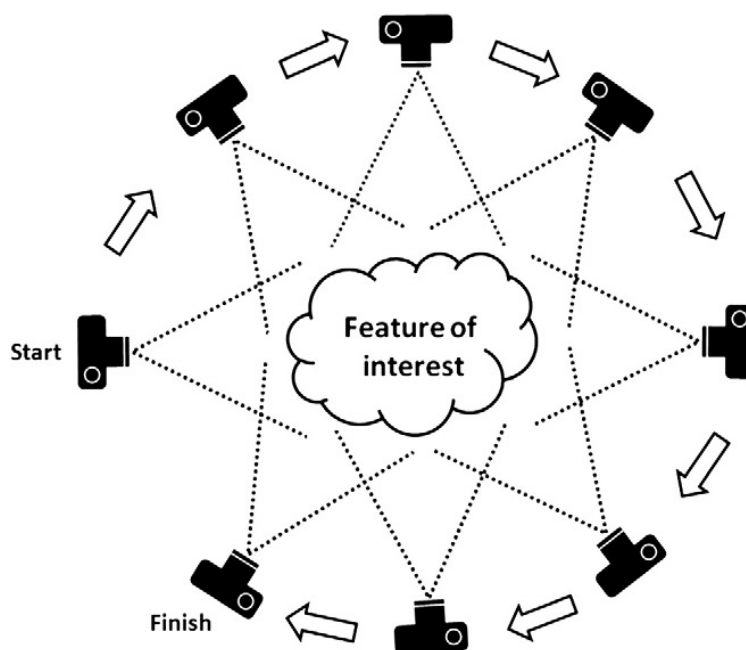
Pro metodu obrazové korelace je možné využít mnoho programů od volných distribucí až po komerční (např. 123D Catch, VisualSFM, PMVS, Micmac, PhotoScan, Recap atd.) Jejich přesnost a rychlost zpracování dat se mnohdy velice liší a byla vždy podrobně testovaná (srov. *Eltner - Kaiser – Castillo - Rock - Neugirg - Abellán 2016; Galizia - Santagati 2013*). Nejvíce kvalitní výsledky ze všech testů produkuje komerční software Photoscan od Agisoftu. V nejbližší době se představí nový software Reality Capture, který bude ještě rychlejší a kvalitnější. Představím zde základní kroky pro získání kvalitních dat z využívaného programu Photoscan Professional 1.2.5 build 2735 (obr. 53).



Obr. 53 Program Photoscan.

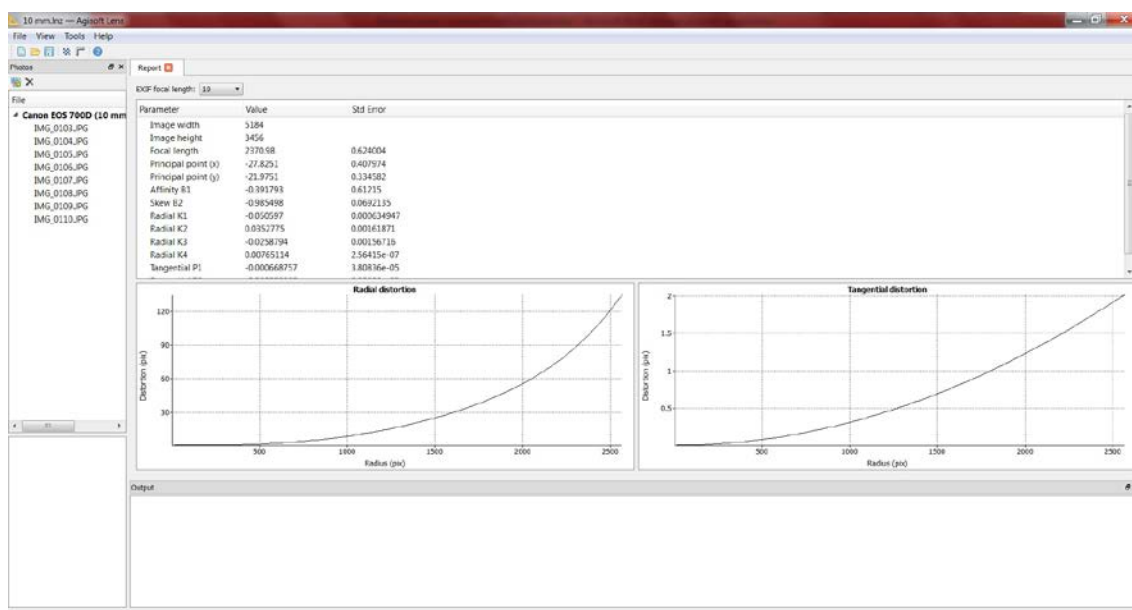
Prvním krokem k 3D digitálnímu modelu je pořízení série fotografií, které se navzájem překrývají v minimálně 60 %. Metodika snímkování vychází z pojmu SfM (Structure from Motion). Při snímkování se

pohybujeme, a tedy každý snímek je pořízen z jiného stanoviska (obr. 54).



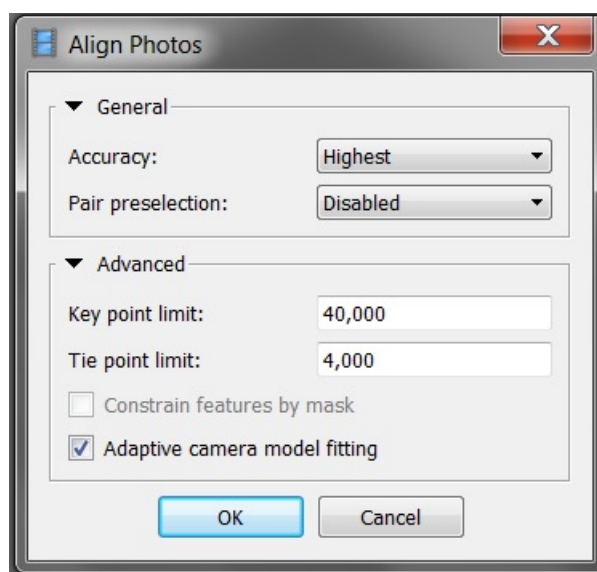
Obr. 54 Schéma snímkování metodou SfM.

Při snímkování se nedoporučuje využívat transfokátor, snímky musejí být ostré a bez digitálního šumu. Před využíváním Photoscanu je dobré si fotoaparát s objektivem, který jsme používali, zkalibrovat pomocí programu Agisoft Lens. Zobrazená černobílá šachovnice na monitoru se nafotí z vícera směrů a po zpracování programem se nám vypíše kalibrační hodnoty objektivu, které se poté využívají v projektu Photoscanu (obr. 55).



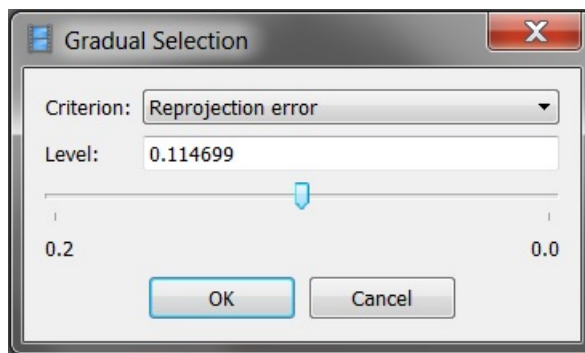
Obr. 55 Program Agisoft Lens – výsledek kalibrace.

Po načtení fotografií je možné snímky vymaskovat tak, aby byla později počítána pouze oblast zájmu (urychlení výpočtu). Prvním krokem je vypočítání zarovnání všech snímků a zjištění vnitřní a vnější orientace snímků. Možný je výběr z několika kroků kvality výpočtu. Další volbou je hledání vzájemných stereo párů či nastavení počtu spojovacích bodů. (obr. 56).



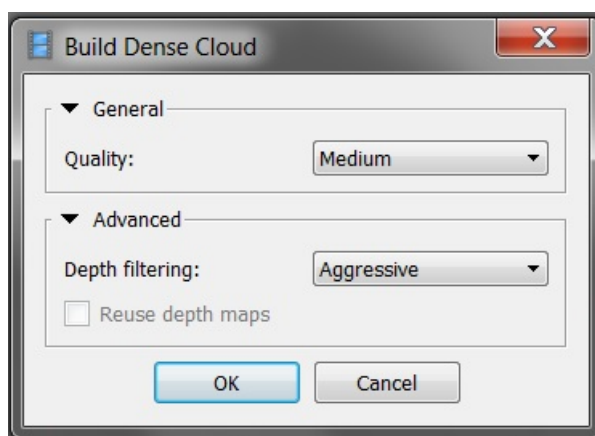
Obr 56 Nastavení zarovnání snímků.

Po výpočtu zarovnání vznikne řídké mračno bodů. Poté může být nahrán kalibrační soubor použitého objektivu a fotoaparátu a model optimalizován dle kalibrace. V tomto kroku se doporučuje zkontrolovat oblast zájmu, dle potřeby ji natočit či změnit její velikost. Také je dobré uskutečnit odstranění vyšších reprojekčních chyb a vyšších chyb rekonstrukční nejistoty (obr 57.)



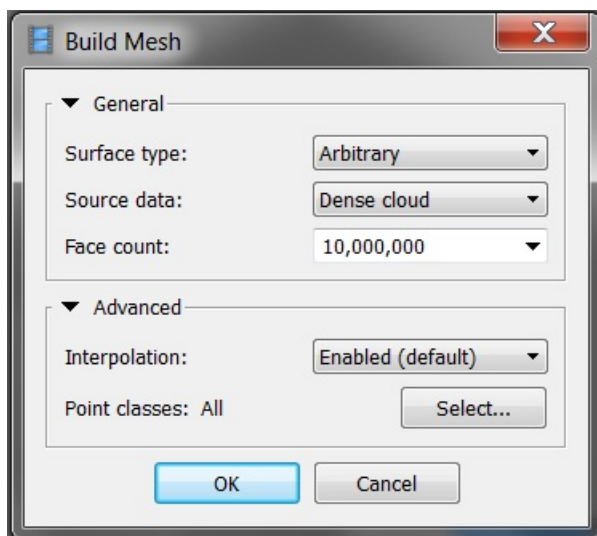
Obr. 57 Výběr hodnoty reprojekční chyby.

Druhým krokem je výpočet hustého mračna bodů. Nastavit lze opět jeho kvalitu od nízké až po ultra vysokou (obr. 58).



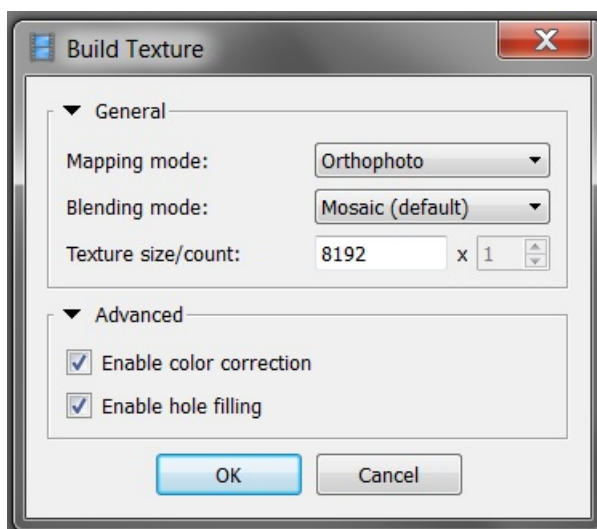
Obr. 58 Nastavení výpočtu hustého mračna bodů.

Třetím krokem je výpočet interpolace z mračna bodů na polygonovou síť. Nastavit lze volbu tzv. arbitrary, která vypočítá libovolné mračno bodů, nebo je možné nastavit výškové pole (obr. 59). Další volbou je maximální počet interpolovaných fasetek pro 3D model.



Obr. 59. Nastavení výpočtu polygonové sítě.

Posledním základním krokem je výpočet textury. Textura se může vypočítat pro celý 3D model v různých nastaveních pro uložení (obr. 60.). Dále je možné počítat DEM, ortofotoplan pro výpočet pohledu z osy z.



Obr. 60. Nastavení výpočtu textury.

10 OBECNÉ SOFTWAREVÉ ZPRACOVÁNÍ 3D DAT ZE SKENERŮ

Při importu 3D dat do programu Geomagic Studio 2014 je prvním krokem jejich manuální očištění od objektů, které nejsou součástí 3D modelu. Po očištění je potřeba spojit jednotlivé skeny do jednoho přesného celku. Princip spojení je obdobný jako ve ScanStudio, kdy se vyhledávají stejné body pro sjednocení. Zde se tato operace nazývá registrace a lze provést nejdříve ruční - spojení skenů pomocí 1 až 9 bodů. Výsledek spojení se zobrazuje ihned. Body mohou být přibližně na stejném místě, jelikož po ruční registraci lze použít globální registraci, kdy si nastavíme toleranci spojení a velikost modelu, který se má zohlednit ve spojení. Program přesně dané skeny spojí do výsledné pozice podle nastavení. Tato metoda je ovšem velice rychlá a přesná pouze tehdy, když se skeny překrývají a mají společné části. Dalším krokem je odstranění hrotů, které se nacházejí na povrchu 3D modelu. Poté se může opravit celková topologie polygonové sítě. Posledními kroky jsou zjednodušování modelu a nastavení správné globální orientace.

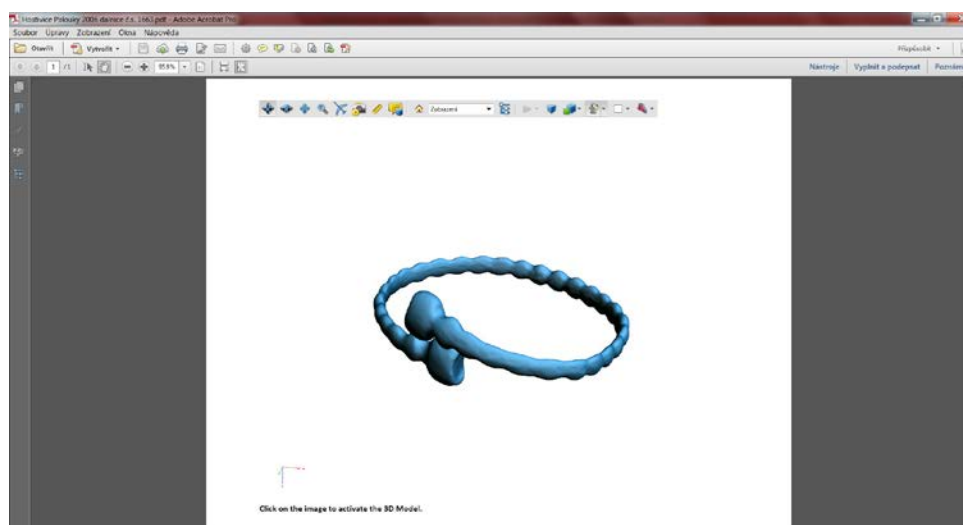
Dále lze provádět editační možnosti v mnoha nastaveních, jako je oříznutí, vyhlazení, změna tvaru atd. Také lze pracovat přímo s mračnem bodů pomocí funkce Převést na body, kdy lze body oříznout, redukovat nerovnosti, stínovat body atd. a poté prostřednictvím funkce Wrap zpět převést mračno bodů na mnohoúhelníkovou síť. Toto se někdy hodí, ale nejvíce potřebné je to pro práci s daty z dálkového pozemního skeneru. Program nabízí nepřeberné možnosti práce s 3D daty.

11 PREZENTACE 3D DAT

11.1 Digitální zveřejnění objektů

Digitální modely vytvořené pro prezentační nebo jiné účely, by měly být v nějaké dostupné formě zveřejněny. Možností jak toto uskutečnit je

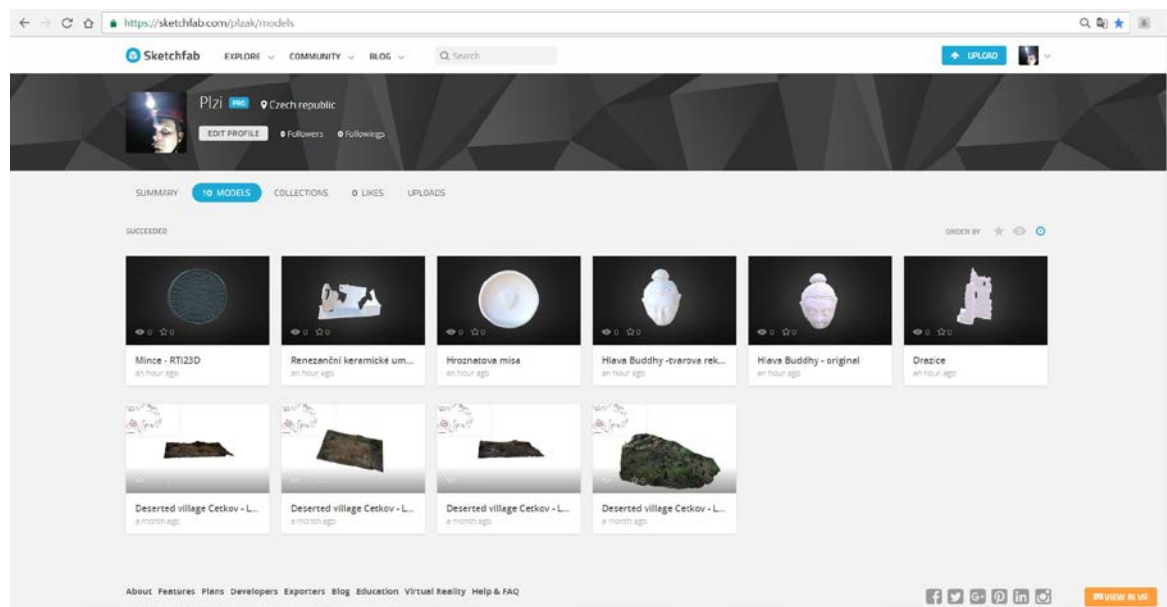
více. První možnost zpřístupnění je umístit model na server, kde půjde stáhnout. Problém je, že většina uživatelů nemá standardně nainstalovaný žádný odpovídající prohlížeč pro 3D formáty modelů. Proto by u modelu měl být odkaz, kde lze nějaký prohlížeč zdarma stáhnout a využít. Poskytnout model s sebou také přináší otázku práv a vlastnictví digitálních dat, proto je lepší model zpřístupnit online prohlížečem přímo na stránkách, odkud nebude možné jej stáhnout. Online prohlížečů je celá řada, mohou být postaveny v Java jazyku nebo například C++ atd. Pro jednoduché šíření a prohlížení dat také vznikl 3D pdf formát, který otevře každý Adobe Reader od verze X. V 3D pdf prostředí si model můžeme otáčet, zvětšovat, zmenšovat, měnit osvětlení, měnit styly vizualizace a odměřovat různé části. V placené verzi Adobe Acrobat lze na modelu definovat řezy a tyto pohledy ukládat pro pozdější potřebu. Dokumenty v pdf formátu se velice dobře šíří a umožňuje ochranu dat, kdy s modelem nelze jinak disponovat (obr 61.).



Obr. 61 3D digitální model bronzového náramku z arch. výzkumu Hostivice – Palouky v 3D pdf.

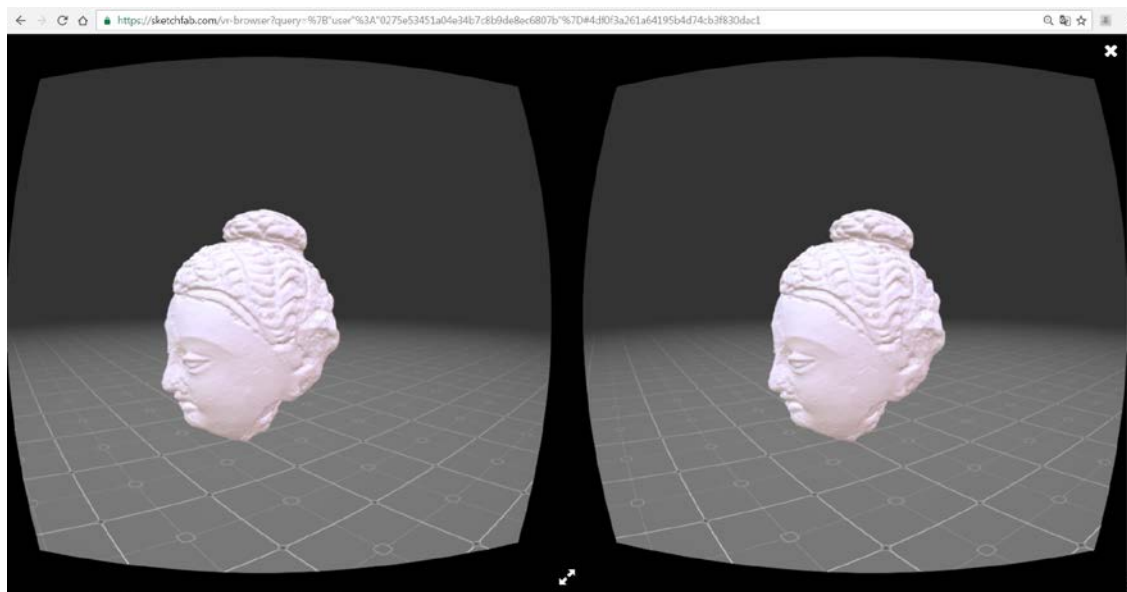
Soubory 3D pdf jsou nejjednodušším šířením digitálních 3D modelů. Hodí se také do digitálních publikací, které jsou vydávány i v digitální formě např. IANSA (Interdisciplinaria Archaeologica - Natural Sciences in Archaeology) či DAACH (Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage).

Pro zveřejnění a zkoušku různých prohlížečů jsem se rozhodl dokončené modely umístit do virtuálního muzea na webu Sketchfab. <https://sketchfab.com/plzak/collections> (obr. 62). Velkou výhodou je uživatelské prostředí pro upload, sdílení a prohlížení 3D digitálních modelů. Jedná se o klasické virtuální muzeum k prohlížení digitálních dat s možností umístění odkazu přímo na model a popisu toho místa.



Obr. 62 Virtuální muzeum Sketchfab – vlastní 3D modely.

Poslední novinkou webu je možnost prohlížení 3D digitálních modelů ve virtuální realitě (VR) prostřednictvím levného zařízení Cardboard (mobilního telefonu), či zatím stále drahého VR headsetu. Cardboard je kartonový držák (brýle) pro mobilní telefon, který obsahuje dvě čočky k vytvoření stereoskopického vjemu z obrazovky telefonu, kde je promítán, pro každé oko zvlášť, digitální obsah (obr. 63). Při prohlížení ve VR je možné se volně rozhlížet, či se posouvat pomocí kurzorů po digitální ploše.



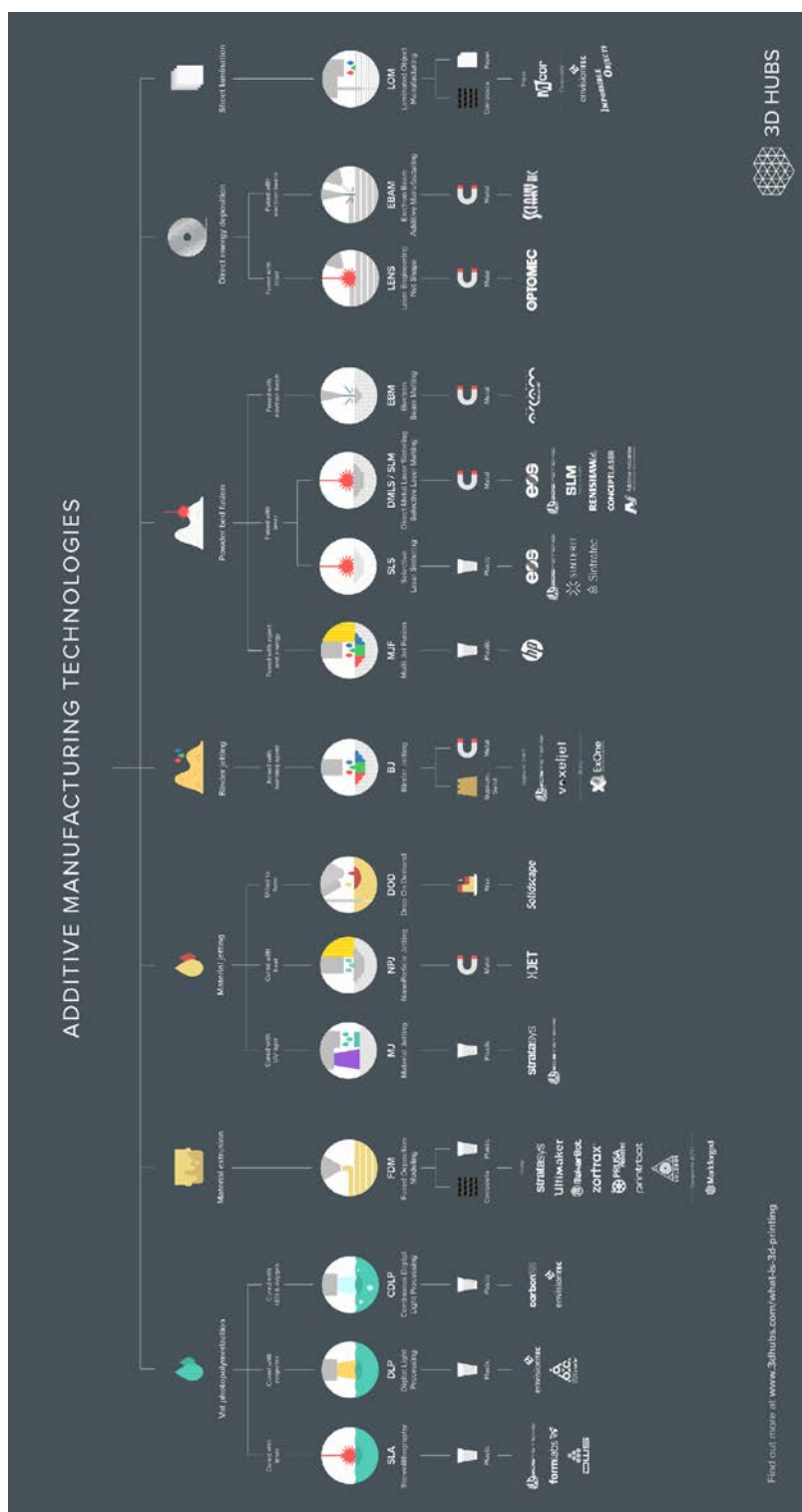
Obr. 63 Náhled VR pro Cardboard „brýle“ v Sketchfab.

11.2 Fyzické modelování replik objektů

Při digitální prezentaci modelů existuje spousta možností, jak data digitálně přiblížit k lidem. Pro většinu populace je však stále přívětivější se modelu fyzicky dotknout a otočit ho podle potřeby, než dívat se na digitální 2D či 3D obrazy. Hmatový vjem je pro nás stále důležitý a potřebný. Díky němu si dokážeme věci lépe představit v 3D prostoru a daleko lépe pochopíme určité souvislosti. Pro archeologické památky, které jsou někdy křehké nebo cenné, je problém umožnit lidem tento důležitý vjem a proto bychom se měli snažit vyrábět jejich repliky. Repliky, které jsou na výrobu velice levné ve srovnání s cenou unikátního artefaktu, hodí se pro účely popularizace na výstavách, ve školách, pro nevidomé nebo také pro badatelské účely. Pokud nebereme na vědomí možnosti otisků, odlitků a modelace podle předlohy máme ještě moderní možnost trojrozměrného tisku z digitálních dat, které jsme získali například pomocí laserového skenování, které je velice přesné bez případné nevhodné interpretace či doplnění modelu o některý nepatřičný detail.

Rapid prototyping (3D tisk) neboli rychlé prototypování dokáže vytisknout jakýkoliv digitální trojrozměrný model prostřednictvím nanášení materiálu ve velmi tenkých vrstvách na sebe. Rapid prototyping vznikl počátkem osmdesátých let, kdy byla využita metoda stereolitografie, která byla základem pro další novější metody. Její princip je v nanášení jednotlivých vrstev materiálu na sebe, kdy každá vrstva materiálu odpovídá jednomu řezu digitálního modelu. Při stereolitografii jsou jednotlivé vrstvy tvořeny pomocí laseru, který postupně vytvrzuje hladinu tekutého polymeru v nádobě, kde se budoucí model modeluje na posuvném stole, který se pohybuje vždy o jednu vrstvu níže, aby tekutá pryskyřice byla na povrchu modelu a mohla být znovu vytvrzena. Stejného principu využívá většina metod 3D tisku. Postupem času vznikaly lepší technologie a utvářely se nové metody trojrozměrného tisku. Postupně se změnil nanášený materiál a způsob jeho tmelení. Metody lze rozdělit na 3 hlavní oblasti dle použitého materiálu a to na fotopolymerové, pevnolátkové a práškové. Ve skupině fotopolymerové se nachází nejstarší technologie Stereolitografie (SLA), Solid Ground Curing (SGC) a Polyjet. SGC metoda je skoro stejná jako stereolitografie až na to, že dokáže vytvrdit vrstvu celou najednou. Polyjet metoda je podobná předešlé, ale tiskárna na stůl nanáší vytvrditelnou pryskyřici či polymer za pomoci mnoha tenkých trysek, dokáže tak vytvářet tenké stěny modelu a pomocný podpůrný materiál lze jednoduchým opláchnutím vodní tryskou odstranit. Ve skupině pevnolátkové je metoda Laminated Object Manufacturing (LOM, obr.), která vytváří model prostřednictvím vzájemně nalepených vrstev folií. Foliové vrstvy jsou k sobě přilepeny přílnavým nátěrem pouze tam, kde se tvoří model. Po každém nanesení vrstvy je obrys modelu oříznut laserem nebo přesným nožem. Nadbytečný materiál lze poskočením modelování z modelu postupně odloupat, neboť vrstvy nejsou s ničím spojeny. Další metodou je Fused Deposition Modeling (FDM), kde se vrstvy nanášejí pomocí natavování, přesná tryska roztaví plastický materiál umístěný v cívce (filament) a postupně jej nanáší na desku stolu. Většinou se jedná o netoxický materiál jako je ABS, PLA, polykarbonát atd. V práškové oblasti trojrozměrného tisku existuje metoda

Selective Laser Sintering (SLS). SLS metoda také tvoří model formou tenkých vrstev, ale materiál je ve formě jemného prášku, který se natavuje laserovým paprskem. Prášek je nanášen ve vrstvách vertikální posuvnou deskou na celý povrch pracovního prostoru a poté je nataven pouze tam, kde se má tvořit budoucí model. Ostatní prášek okolo slouží jako podpora pro model. Práškový materiál může být z plastů, kovu, keramiky a speciálního písku. Poslední metodou je Three Dimensional Printing (3DP), kde se na předem nanesenou vrstvu prášku na bázi škrobu znovu nanese prostřednictvím tiskové hlavy barevná vodní kapalina opět tam, kde se má modelovat a materiál se vytvrdí. Jinou možností je použití prášku na bázi sádry. Modely lze také tvořit opačnou metodou, kdy se materiál odebírá. Obrábění se provádí na CNC (Computer Numeric Control) obráběcích centrech, které jsou řízeny počítačem. Obrábět lze plasty, dřevo a kovy. Pro repliky artefaktů lze vzít v úvahu jen dřevo nebo plast. Nevýhodou obrábění je časová náročnost, kdy se odfrézuje materiál po velmi malých částech a duté nebo více složité části nejdou obrobit (*Zajacová 2009, Rozinek 2009*). Technologie 3D tisku se stále vylepšují a vznikají nové materiály a postupy, jak z nich tisknout. Jako přehled technologií zde uvádím přehledné schéma (obr. 64).

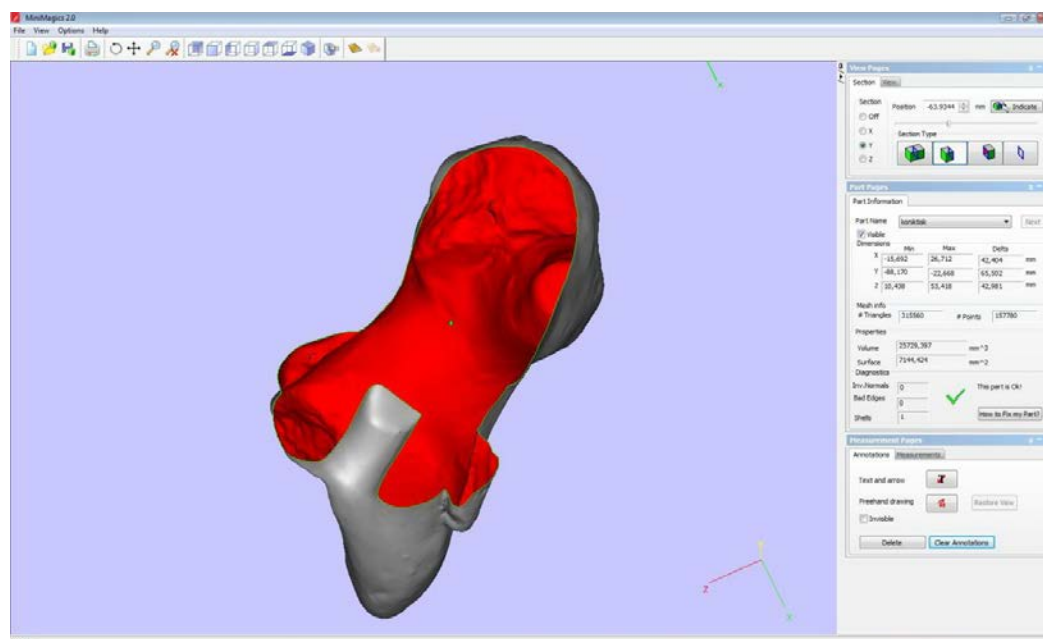


Obr. 64 Schéma technologií 3D tisku (zdroj: 3Dhubs).

Jednotlivé technologie se liší v rychlosti a kvalitě výroby - někdy může trvat vytisknout model i několik dní. Použité materiály jsou různě pevné a někdy potřebují po vytisknutí speciální úpravu povrchu pro

celkové zpevnění nebo ochranu a také má každý jinou tepelnou a mechanickou odolnost. Některé materiály mohou měnit své vlastnosti, mohou se trochu roztáhnout čí zmenšit. Proto je potřeba zvolit si pro 3D tisk artefaktů správně vhodnou technologii tisku. Jde nám především o zvolení nejmenší tloušťky jednotlivých vrstev, aby model byl do směru osy z co nejvíce přesný a přechody nebyly znát. Také záleží na ceně tisku a odolnosti repliky. V možnostech dnešních tiskáren je vhodné využít technologii 3DP s práškem na bázi sádry a poté povrch modelu například napustit epoxidovou pryskyřicí pro větší odolnost. Tiskárny od firmy Z Corporation mohou také každou vrstvu o minimální tloušťce 0,089 mm obarvit až do 6 milionů barevných odstínů.

Pro vytvoření repliky z 3D digitálního modelu pomoci 3D tisku platí určitá pravidla. Pouze tak může 3D tiskárna bez problémů repliku vytisknout. Většinou se využívá binární formát .stl, který vznikl jako nativní formát pro stereolitografický CAD software. Model by měl být takzvaně vodotěsný, neměl by obsahovat žádné „mikrodíry“ nebo díry, které nechce, aby model měl. Formát STL (Standard Triangulation Language) aproximuje povrch modelu jako trojúhelníky, kdy každá trojúhelníková ploška je definována normálovou a třemi vrcholy. Normála je vektor, který určuje rub a líc dané plochy. Pro správný tisk je nutné, aby všechny normály, měli nastavený směr ven z objektu. Počet trojúhelníků v modelu by měl být vyvážený, aby byly zachovány potřebné detaily modelu a nedocházelo k nežádoucímu zkreslení. Není také špatné, abychom model diagnostovali před odesláním do tisku v některém programu pro 3D tisk jako například MiniMagics (obr. 65), který umožňuje zkontrolovat normály, špatné hrany, vypočítat celkový objem a povrch použitého materiálu a hlavně zkontrolovat model po vrstvách k tisku. Rozhodnutí z jaké strany se model začne tisknout většinou určí obsluha tiskárny, jelikož má větší praktické zkušenosti s tímto problémem.



Obr. 65: Kontrola modelu před tiskem v MiniMagics.

K aplikaci a k testování 3D tisku jsem si vybral artefakt hračku koníka, která byla nalezena na archeologickém výzkumu ulice Bedřicha Smetany ve Starém Plzenci. Datována je do 2. poloviny 13. století, nyní je umístěna v depozitáři Západočeského institutu pro ochranu a dokumentaci památek. Artefakt, který se nedochoval v původním stavu, znázorňuje jezdce na koni. Kůň je poškozen, chybí mu dvě nohy a část pozadí, jezdec od pasu výše také chybí. Z trupu se zachovala pravá ruka, která se drží naznačené hřívy koně. Artefakt je vyroben z jemně plavené hlíny. Tvarově nebyl artefakt složitý k naskenování. Největším problémem byl otvor o průměru 7 mm na hrudi pro nasazení případné násady. V originálu artefaktu je otvor hluboký cca 2,5 cm a postupně se zužuje. Pro nemožnost naskenování celého otvoru jsem oskenoval jen okraj do hloubky cca 0,5 cm a zbytek do hloubky cca 1,3 cm jsem domodeloval ručně. Původní hloubku otvoru jsem nechtěl ztvárnit z toho důvodu, že jsem neznal správný tvar postupného zúžení. Problém se také naskytl v oblasti hůře dostupného místa mezi tělem jezdce a hlavou koně, kdy bylo toto místo navíc kryto nataženou pravou rukou. Místo bylo potřeba uměle domodelovat, neboť nebylo možné naskenovat původní povrch. Na modelu hračky byly poté opraveny možné chyby v síti mesh, aby byl

připraven pro 3D tisk. Objem potřebné hmoty pro tisk koně byl spočítán na 26 cm³. Naskenovaný model původně obsahoval 500 000 bodů ale po zjednodušení do tisku, kdy se jeho kvalita nezměnila, měl pouhých 157 780 bodů a složená mesh síť 315 560 trojúhelníků. Pro 3D tisk jsem si vybral technologii 3DP a plnobarevnou 3D tiskárnu ZCorporation Spectrum Z510. Tiskárna tiskne rychlostí 24 mm za hodinu pomocí 4 tiskových hlav, z níž každá hlava obsahuje 1216 trysek. Síla vrstev je 0,089 mm a maximální rozměr tisknutého modelu je 254 x 356 x 203 mm s horizontálním rozlišením 540 x 600 DPI. Model byl vytisknut bez textury, i když tuto možnost tiskárna zvládá s 24 bitovou barevnou hloubkou. Materiálem pro výrobu byl prášek na bázi sádry, který byl po vytisknutí modelu infiltrován pryskyřicí pro zlepšení mechanické odolnosti (3D tiskárna Z510, obr. 66). Vytisknutý model se nyní hodí pro prezentaci široké veřejnosti bez strachu z poškození originálu. Dále je možné artefakt neomezeně duplikovat, tisknout zvětšeniny či zmenšeniny nebo zaslat digitální model na velkou vzdálenost někomu jinému, který si model vytiskne pro případnou prezentaci.



Obr. 66: Hračka „koník“ – vlevo 3D digitální model, vpravo replika z 3D tisku.

Druhou testovanou technologií 3D tisku byla FDM. Technologie FDM se postupem času rozšířila a stala se z ní dostupná technologie 3D tisku pro všechna odvětví. 3D tiskáren disponujících technologií tisku FDM je celá řada a liší se podle kvality tisku, zpracování a typu materiálu, z něhož dokáží tisknout. Pro rychlou orientaci mezi výrobci a typy 3D tiskáren doporučuji stránky projektu 3Dhub¹⁶. Testovaná 3D tiskárna Zortrax M200 se umístila na žebříčku kvalit na horních místech (např. zvítězila v prestižní kategorii 3D Hub Plug 'n' Play 2016, obr.67). Tiskárna umí tisknout z materiálu ABS s nejmenší vrstvou tisku 0,09 mm. Tisková plocha je o velikosti 200 x 200 x 180 mm. Tiskárna umí poloautomatickou kalibraci osy Z a tisková podložka je perforovaná pro bezproblémové pevné přilnutí předmětu během tisku.

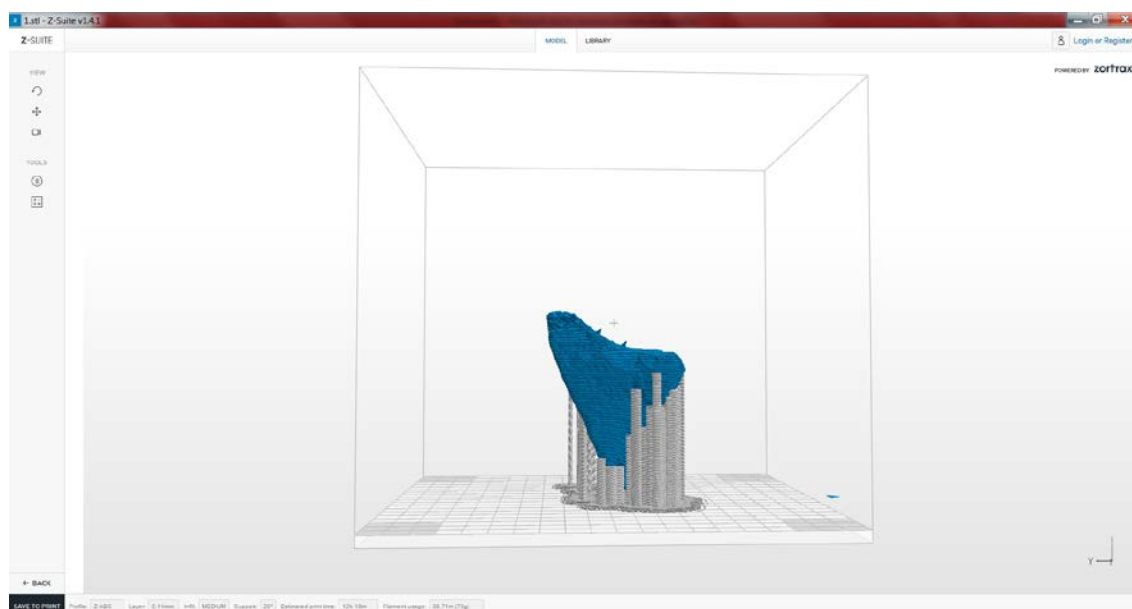


Obr. 67 3D tiskárna Zortrax M200.

3D tiskárnu jsem měl volně k dispozici a mohl jsem ji testovat. Příklad je ve vlastnictví Biologické laboratoře KSA FF ZČU. K 3D tiskárně

¹⁶ <https://www.3dhubs.com>

je dodáván software Z-Suite, který slouží jako nástroj pro přípravu 3D modelů do tiskárny. Uživatel se rozhodne, jak 3D digitální model umístí na tiskovou plochu, protože od toho se odvíjí potřeba generace podpor, spotřeba materiálu, čas 3D tisku atd. Program 3D digitální model rozřeže na požadovanou sílu tisknuté vrstvy, případně automaticky přidá odstranitelné podpory pro tisk převisů a míst, která by se během tisku mohla zhroutit. Je možné navolit typ výplně 3D modelu od plného po jeho obrys bez výplně. Takto připravený 3D model, přeložený do strojového kódu tiskárny (gcode), se poté nahraje na SD kartu a vloží do tiskárny (obr 68.).



Obr. 68 Prostředí programu Z-Suite, ukázka připraveného 3D modelu pro 3D tisk.

3D digitální modely by se měly k tisku umisťovat tak, aby nebyla potřeba generovat podpurný materiál, nebo ho bylo co nejméně. Pro repliky artefaktů je důležitá jejich geometrická reálnost, proto se nastavuje nejmenší vrstva tisku, která zaručuje plynulé přechody v zaoblených částech artefaktů. Pro úsporu materiálu (filamentu) se vyplatí nastavovat výplň modelu na nejmenší, která také zkrátí čas potřebný k 3D tisku. U středně velkých artefaktů je doba tisku s tímto nastavením okolo 24 hodin a spotřebou cca 150 g materiálu. Barva povrchu 3D modelu je závislá na

zvolené barvě filamentu, který se vyrábí v široké barevné škále. 3D tisk probíhá nejdříve tiskem raftu, který přilne k podložce a teprve na něm se bude 3D digitální model tisknout. Postupně se tisknou tenké vrstvy modelu i podpor, a tak model pomalu přibývá na ose Z. Po vytištění je model ostrou špachtlí odstraněn z podložky a postupně a opatrně jsou z něho vylamovány podpory a raft. Vše jde snadno, bez vynaložení síly. Během 3D tisku mohou nastat komplikace, které celý tisk zničí. Většinou se jedná o problémy technického rázu tiskárny, či obecnou problematiku 3D tisku technologií FDM. Vhodnou údržbou, správným nastavením a stálým prostředím při tisku se tyto neduhy dají odstranit. Pro otestování 3D tisku jsem vytiskl několik artefaktů. Jedná se o repliky komorového kachle, dlaždice vyšehradského typu, willendorfskou venuši, hlavy Buddy a digitální model reliéfu (obr. 69).



Obr. 69 Trojrozměrně vytisknuté 3D digitální modely, technologie FDM.

Trojrozměrný tisk má určitě velkou budoucnost. Technologie tisku nám umožňuje produkovat repliky různé kvality a z různých materiálů.

II. ČÁST PRÁCE

12 PŘÍPADOVÉ STUDIE

Vybrané případové studie se vážou k tématu práce a v praxi ověřují reálné možnosti využití trojrozměrných metod v archeologii. Jednotlivé studie prezentují metodiku dokumentace a zpracování 3D dat do uceleného celku s konkrétním výsledkem. Záměrně jsou vybrány takové typy, které v širokém spektru trojrozměrného prostředí demonstrují rozdílné druhy aplikace, digitalizace, techniky a metodiky využitelné pro řešení konkrétních cílů v archeologii.

12.1 Dokumentace mincí výpočetní fotografickou metodou RTI

Tato studie demonstruje, že i tradiční dokumentování může být inovováno bez potřeby drahého technického vybavení. Změnou způsobu snímkování digitálních fotografií a speciálního softwaru je možné získat více informací i z dvojrozměrné dokumentace (*Plizák 2016*). Poté je možné i z této dokumentace rekonstruovat velmi přesné trojrozměrné modely povrchu.

12.1.1 Úvod

Základní postup v numizmatických studiích je dokumentace a identifikace zkoumaných mincí. Vzhledem k tomu, že mince jsou většinou malých rozměrů s nízkým reliéfním vyobrazením s různou úrovní zachování, je tento úkol někdy velice obtížný. K rozpoznání setřených nápisů a číslic je někdy potřeba velké představivosti a zkušenosti badatele. Tradičními nástroji pro určení a přečtení jsou proto lupa, mikroskop a digitální fotoaparát. Při fotografické dokumentaci se velice často používá šikmého osvětlení, které zvýrazňuje kontury a vržené stíny dotvářejí plastičnost povrchu. Z tohoto důvodu jsou mince fotografovány z

více směrů, aby byly lépe čitelné a povrch lépe vynikl. Tato metoda je ale z pohledu fotografa velice subjektivní, protože nikdy nedokáže plně zachytit veškeré potřebné směry k reálnému zdokumentování a z hlediska časové náročnosti je pomalá. Jednou z možností, jak zaznamenat více informací z fotografií, je využívání výpočetní fotografie. Nejznámější technologií z této skupiny je focení s vysokým dynamickým rozsahem (High Dynamic Range) či multispektrální snímkování a trojrozměrná fotogrammetrie. Do výpočetní fotografie také patří zobrazovací technika, takzvané zobrazení transformací odrazu (Reflectance Transformation Imaging), která se těší velké popularitě v mnoha oborech. Tato nenáročná fotografická metoda zachycuje detail povrchu i s informacemi o jeho barevnosti a odrazivosti. Rovněž dokáže zdůraznit povrchovou strukturu foceného předmětu. Výrazná výhoda techniky RTI tkví ve způsobu prohlížení nasnímkovaného předmětu. Badatel má možnost zkoumat objekt díky interaktivnímu osvětlení z jakéhokoliv směru a pozorovat, jak světlo interaguje s povrchem i prostřednictvím různých filtrů, které značně zdůrazňují jeho topografii. Dynamické osvětlení může odhalit na materiálu a barevnosti povrchu detaily, které by se konvenční fotografií nepodařilo zachytit.

Největších úspěchů technika RTI dosáhla ve studiu paleobotanických a paleontologických fosilií, ve studiu traseologie na pravěkých kamenných nástrojích, skalního umění, ve studiu klínového písma na hliněných tabulkách, při analýze povrchové textury olejomalby a v dokumentaci velkých numismatických sbírek (srov. *Earl a kol. 2010, 2011; Hameeuw a kol. 2011; Kotoula a kol. 2013; Mudge a kol. 2006*). Obliba této techniky i v prostředí institucí jako jsou muzea je zapříčiněná její rychlou a především levnou aplikací díky volnému šíření v licenční formě GNU (Gnu General Public License version 3).

12.1.2 Historie vývoje a vzniku techniky RTI

Původní vizualizační technologie polynomického mapování textury (Polynomial Texture Mapping) byla vyvinuta pro herní průmysl, kde měla

za úkol efektivním výpočetním způsobem vytvářet realističtější zážitek pro hráče ve formě správného vykreslení odraženého světla od různých objektů a materiálu, a tak získávat kvalitní fotorealistické textury pro texturování 3D povrchů (*Lehoux 2013, 112*). Vizualizační technologií PTM se začal v roce 2001 ve výzkumných laboratořích firmy Hewlett Packard zabývat Tom Malzbender (*Malzbender a kol. 2000, 2001*). První aplikací v ochraně kulturního dědictví a předvedení silné stránky techniky PTM bylo v roce 2005 v laboratořích HP nasnímkování mechanismu z Antikythéry, kde se díky této technice zobrazily značky na fragmentech ozubeného soukolí¹⁷ a tudíž je bylo možné přečíst. Software pro techniku snímání PTM na stránkách firmy HP je stále volný k distribuci, a proto tento matematický algoritmus mohl být dále třetí stranou vyvíjen a dále se mohl šířit¹⁸. Od roku 2006 Tom Malzbender navázal spolupráci s neziskovou organizací Cultural Heritage Imaging a díky této spolupráci vznikla komplexní technika RTI s vlastním technickým zázemím. CHI zdarma poskytuje software, návody, případové studie a ukázková data pro RTI a to stále pod stejnou licencí GNU jako původní PTM¹⁹.

12.1.3 Reflectance Transformation Imaging

Technika výpočetního fotografování metodou RTI využívá sekvenci statických digitálních fotografií objektu z konstantní polohy fotoaparátu, kdy každá jednotlivá fotografie je osvětlena z jiného úhlu. Z této sekvence snímků je poté syntetizován matematický model povrchu snímkaného objektu. Výstupem je tedy jeden syntetizovaný 2D snímek s trojrozměrnými informacemi o skutečném povrchu (jedná se o 2,5 D reprezentaci povrchu objektu). Vnímání snímku ve třech rozměrech umožňuje uživateli interaktivní nastavení osvětlení předmětu z různých

¹⁷ WWW stránky projektu:

http://www.hpl.hp.com/research/ptm/antikythera_mechanism/full_resolution_ptm.htm
<http://www.antikythera-mechanism.gr/>

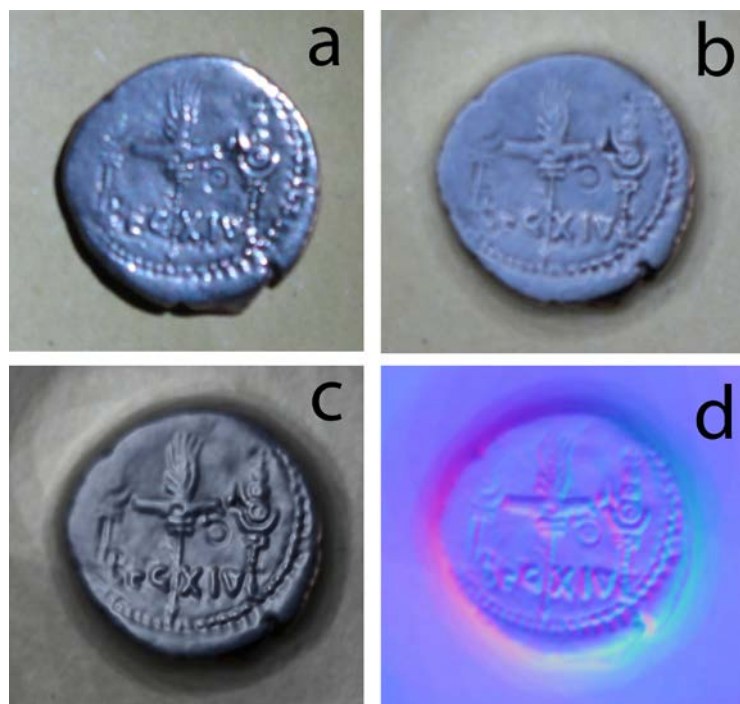
¹⁸ WWW stránky projektu:

<http://www.hpl.hp.com/research/ptm/>

¹⁹ WWW stránky projektu:

<http://culturalheritageimaging.org/>

směrů. Díky použití různých renderovacích filtrů je možné dále zvýšit kontrast mezi vysokým a nízkým reliéfem, nebo nezávisle nastavit hodnoty odrazivosti nebo barevnosti povrchu, aniž by to ovlivnilo topografické informace snímaného objektu (obr. 70).



Obr. 70: Denár, Markus Antonius, legie 14 (a – vstupní fotografie, b – syntetizovaná fotografie s kolmým osvětlením, c – zobrazení se zrcadlovým posílením, d – vizualizace normálové mapy).

Pro generování RTI snímků existuje vícero metod. První základní verze je využití kopule (hemisféry), kde jsou v pravidelném intervalu umístěna světla či blesky, které postupně po jednom osvětlují snímkaný objekt položený uprostřed hemisféry. Ten snímá pevně zafixovaný fotoaparát otvorem ve středu jejího pláště. Většinou se jedná o zautomatizovaný proces snímání. Druhou možností je focení na základě odrazu, které vyžaduje pouze pevně umístěný fotoaparát, lesklou kouli umístěnou vedle snímkaného objektu a pohyblivý světelný zdroj. Ten se udržuje v konstantní vzdálenosti od středu snímkaného objektu ve vzdálenosti přibližně trojnásobku délky objektu. Pro každý zaznamenaný snímek se zdroj světla přesune ručně na jinou pozici. Na lesklé kouli jsou poté ve formě odlesku zaznamenané jedinečné pozice

světla pro každý snímek. Ačkoli je tato metoda časově náročnější, protože uživatel musí pokaždé přemístit zdroj světla a udržovat jeho nastavenou vzdálenost od objektu, vyžaduje tato metoda méně specializované školení a vybavení, takže je jednodušší a méně nákladná. Vybavení je také lépe transportovatelné a často je také vhodnější do terénních podmínek, kdy dokáže zachytit objekty jakékoliv velikosti (s vhodným zdrojem světla).

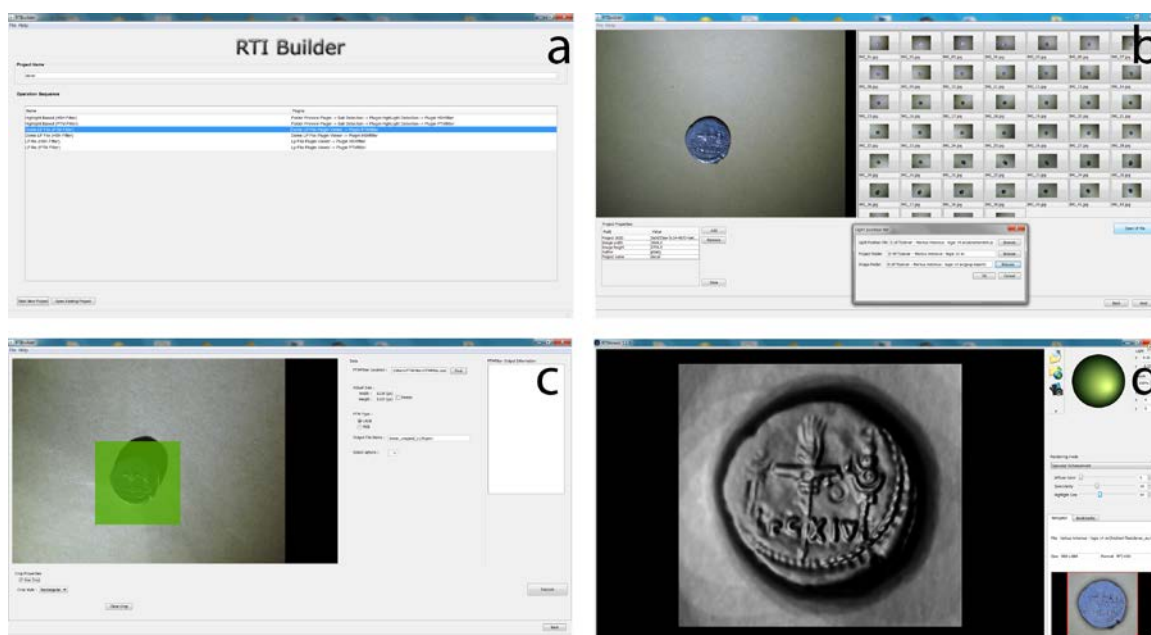
12.1.4 Metodika tvorby a prohlížení souborů RTI

Prvním krokem pro tvorbu RTI snímků je stáhnutí a nainstalování softwaru RTIBuilder a k prohlížení výsledků software RTIViewer. Pro spuštění programů musí být také nainstalován programovací jazyk Java. K využití původní techniky PTM je nutné nakopírovat její původní zdroj z HP Labs do složky programu RTIBuilder. Podrobný manuál s odkazy na software je dostupný na stránkách CHI ²⁰.

Při spuštění RTIBuilder je potřeba zadat název projektu a vybrat si metodu, kterou si budu přát aplikovat. Na výběr je metoda na bázi odrazů nebo metoda využívající světlený dome (hemisféru). Obě metody je možné vypočítat jak s původní PTM technikou, tak i s novou HSH (Hemispherical Harmonics) pro vznik RTI souboru. K využití světlené hemisféry je nutné nejdříve vytvořit soubor LP (light positions). Soubor obsahuje souřadnice světel v hemisféře, které osvětlují focený objekt. Pro definování souřadnic světel se v hemisféře nasnímkuje černá či červená lesklá koule v celé sérii osvětlení. V projektu vytvoření LP souboru se tyto snímky načtou a na jednom z nich se definuje oblast pro automatickou identifikaci koule na ostatních snímcích. Po identifikaci koule na všech snímcích se detekují vzniklé světelné odrazy z postupně rozsvíceného osvětlení. Vygenerované světelné pozice pro jednotlivé snímky se poté uloží do souboru LP. Tento krok se pro využití světelné hemisféry aplikuje pouze jednou a poté se už jen využívá vzniklý soubor se souřadnicemi světel. Velikost focené koule ovšem musí zhruba odpovídat velikosti

²⁰ http://culturalheritageimaging.org/What_We_Offer/Downloads/

objektů, které poté budou dokumentovány. Nafocené snímky ze světelné hemisféry se otevřou v metodě využívající PTM výpočet a poté se definuje umístění souboru LP, umístění celého projektu a umístění zdrojových fotografií. Před vytvořením syntetizovaného snímku je možné definovat oblast oříznutí a snímek tak zmenšit. Zvolením výpočtu metodou PTM je při prohlížení možné vybrat si z více možností zobrazení. Aplikováním metody RTI je výpočet přesnější, ale pro prohlížení jsou poté na výběr jen dvě možnosti zobrazení (obr. 71).

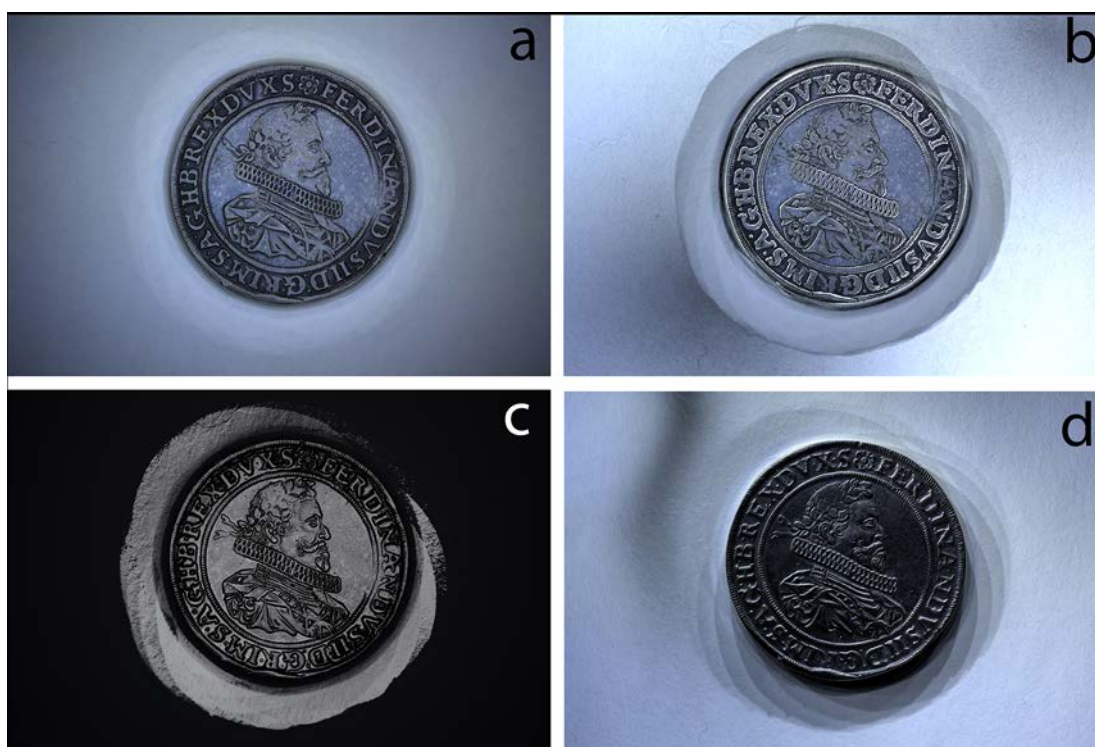


Obr. 71: Software pro snímky RTI (a – výběr metod, b – načtení 46 vstupních fotografií a určení cesty k projektu, c – finální ořez a tvorba RTI snímku, d - prohlížeč pro RTI snímky s vizualizací zrcadlového posílení).

Metoda na základě odrazů je podobná metodě s hemisférou, ale není k ní potřeba vybavení v podobě světelné hemisféry. Na snímcích je vedle dokumentovaného objektu umístěna lesklá koule, která zachycuje pozice osvětlení formou odlesků. Po načtení fotografií se detekují jedna až dvě koule a na nich se identifikují světelné odrazy pro výpočet souřadnic zdroje osvětlení, které z důvodu ručního umístění osvětlení budou vždy pro každý snímáný objekt unikátní. Před vytvořením syntetizovaného snímku se označí zájmová oblast a ze snímků se oříznou nadbytečné části.

Optimální počet jednotlivých snímků s unikátními pozicemi osvětlení se udává od 15 do 65. Při metodě na bázi odlesků by pozice světelných zdrojů měly pokrýt celou plochu pomyslné virtuální polokoule okolo objektu. Celková datová velikost syntetizovaného snímku je přibližně násobkem datové velikosti všech použitých snímků do výpočtu.

Prohlížeč syntetizovaných snímků RTIViewer umožňuje měnit směr osvětlení tak, jak uživatel potřebuje. Osvětlení je dopočítáno v plném rozsahu a je možné nasvítit si minci z jakéhokoliv úhlu. Důležitou možností jsou renderovací módy, kdy pro metodu PTM je na výběr 10 možností a pro metodu RTI jen tři. Nejzásadnější možností vizualizací je matematické posílení zrcadlení (specular enhancement), které zobrazuje tvar povrchu se zvýšenou odrazivostí (obr. 72). Parametry zobrazení je možné také upravovat dle vlastní volby. Zobrazený předmět je možné si přibližovat a nalezený detail lze v určitém směru osvětlení a nastavené vizualizaci uložit ve formě záložky s popisem pro pozdější rychlejší vyhledání.



Obr. 72: Habsburské soustátí – vév. Slezsko, Ferdinand II., tolar 1632, mincovna Vratislav, prům. 44,5 mm (a – vstupní fotografie, b – syntetizovaná fotografie)

s difuzním osvětlením, c – zobrazení se zrcadlovým posílením, d – zobrazení se statickým multi světlem).

12.1.5 Produkce 3D digitálních modelů mincí

Pro trojrozměrné zdokumentování mince s nízkým reliéfem a značnými detaily je potřeba speciální hardware. Pro 3D skenování to znamená takový, který dosahuje velmi vysoké přesnosti zvláště v ose z (většinou méně než 0,1 mm). Namátkou jsou to 3D skenery Msurf mobile od NanoFocus AG, RangeVision (obr. 73), Mephisto EOSScan. Pro 3D dokumentaci mincí by mohla být využita i mikro CT. Vždy se ale jedná o nákladné hardwarové vybavení a o nejednoduché řešení (zmatnění povrchu mince pro skenování) pro docílení co nejkvalitnějšího trojrozměrného modelu dokumentované mince.

Hlavní geometrická kamera	IDS 1,3 Mpix – 2 Mpix
3D bodová přesnost	0.085 mm - 0.03 mm
3D rozlišení standard	0.35 mm - 0.05 mm
3D rozlišení advanced	0.3 mm - 0.043 mm
Pracovní vzdálenost	63 mm - 400 mm



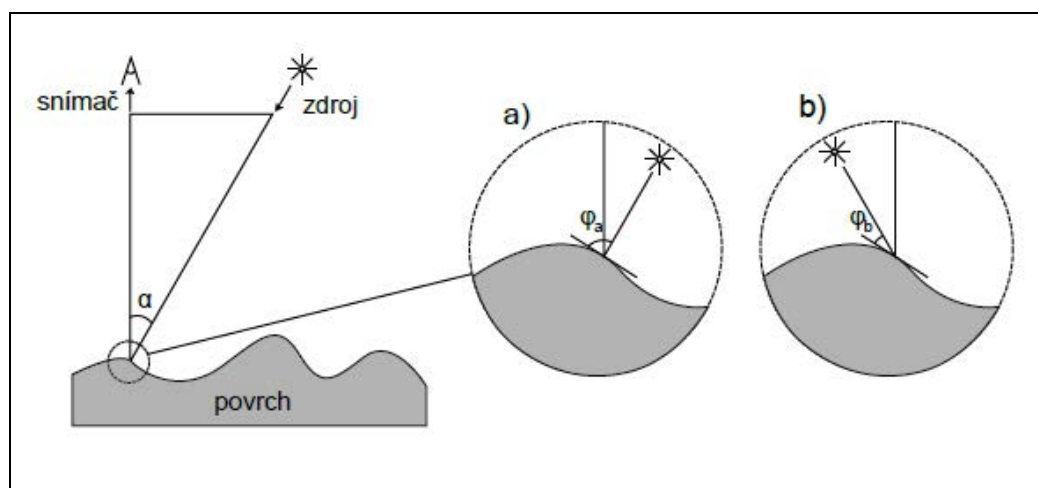
Obr. 73 Technické parametry optického skeneru RangeVision (vlevo) a skenování povrchu mince Habsburské soustátí (vpravo).

Trojrozměrných digitálních modelů mincí je možné dosáhnout i rekonstrukcí povrchu z normálové mapy. Při rekonstrukci 3D povrchu se nejedná o skutečný povrch mince, ale o matematicky vypočítaný povrch

z dat dvojrozměrné normálové mapy (normálového vektoru; *Pintus - Malzbender - Wang - Bergman - Nachlieli - Ruckenstein 2010*). Normálová mapa je bitmapový obrázek, který obsahuje absolutní hodnoty normál uložené v RGB pro simulaci 3D povrchu.

12.1.5.1 Rekonstrukce povrchu s využitím obyčejného stolního skeneru

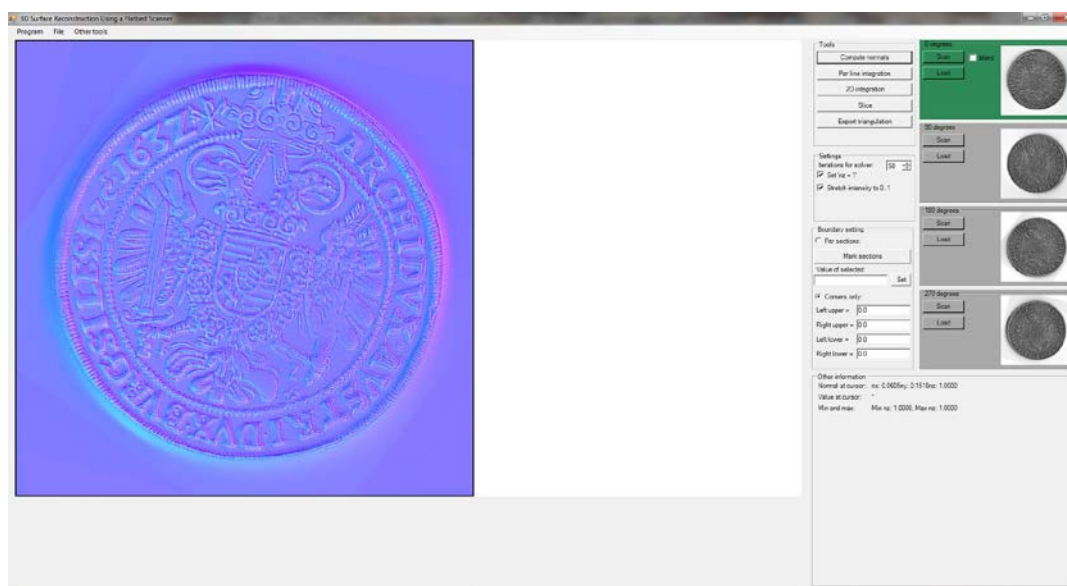
Při této rekonstrukci povrchu se vytváří normálová mapa téměř plochých objektů za pomoci obyčejného stolního skeneru. Každý bod na povrchu je možné rekonstruovat z normálového vektoru, jelikož snímač skeneru je vertikálně zarovnan s deskou skeneru a světelný zdroj je umístěn pod stejným úhlem (*Nedvěd 2013; obr. 74*).



Obr. 74 Umístění snímače a zdroje světla ve skeneru (zdroj: Nedvěd 2013).

Napsaný, ale nezveřejněný program (Scanner Surface Reconstruction build 2013.08.03) od O. Nedvěda je úzce specializovaný pro využití na konkrétních typech skenerů a sloužil jako praktická implementace funkčnosti matematických vzorců v jeho diplomové práci. Pro skenování mincí na stolním skeneru se proto nehodí každý skener a záleží na umístění snímače a jeho technologii snímání (snímač by měl být osazen kolmo k snímávaným objektům a zdroj světla pod neměnným úhlem). Tato informace je ale od výrobců skenerů nedostupná a je nutné skenery prakticky otestovat. Většinou jsou využitelné skenery staršího

data výroby (funkčně odzkoušený typ HP PSC 1315). Limitem využití skenerů je velikost skenované plochy (většinou A4) a hloubka ostrosti, která je u všech stolních skenerů do maximální vzdálenosti 4 mm, a to z důvodu předpokládaného využití pro skenování papírových dokumentů. Proto je důležité skenovat většinou ploché objekty s výškovým rozdílem maximálně do 4 mm (optimální zaostření u stolních skenerů je okolo 3 mm).



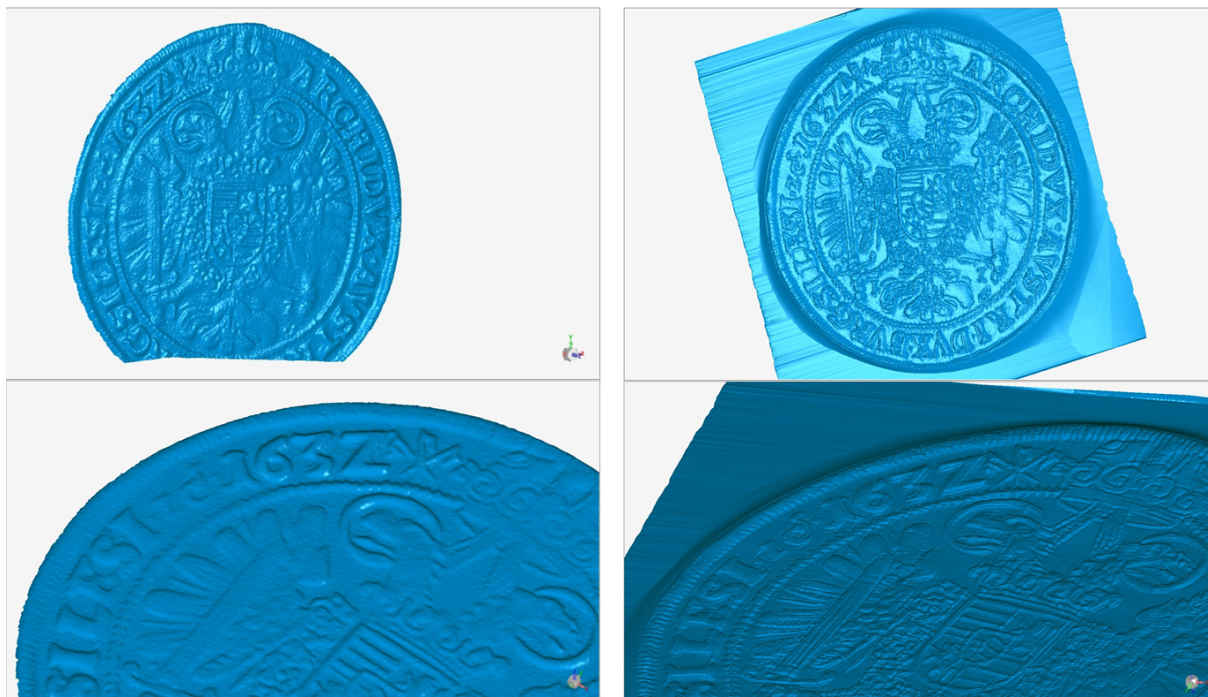
Obr. 75 Výpočet normálové mapy mince.

Pro výpočet normálové mapy je potřeba daný objekt nasnímat ve čtyřech polohách (vždy pootočených o 90°), kdy jsou poté tyto snímky na sebe manuálně vyrovnány a otočeny do pozice 0° (obr. 75). Poté se navolí počet výpočetních iterací algoritmu pro výpočet výškové mapy, která může být vizualizována třemi způsoby (obr. 76).



Obr. 76 Výpočet výškové mapy mince (vizualizace podle odstínů šedé: tmavě šedá - výškové minimum, světle šedá - výškové maximum).

Export 3D modelu je ve formátu .obj bez textury. Metoda rekonstrukce povrchu využitím stolního skeneru má několik limitů a úskalí už při fázi skenování objektů. Prvním je malá hloubka ostroty a tedy pro větší rozdíl výšky reliéfu či nerovnosti na povrchu je nemožné naskenovat ostré snímky. Druhým omezením jsou ostré hrany a přechody, které při skenování ve čtyřech směrech vytváří stíny. V místech, kde se nacházejí stíny, jsou vypočítány nekorektní normály a poté také chyby na povrchu. Při posouzení kvality rekonstrukce povrchu oproti naskenovanému povrchu mince (při skenování byla zmatněna bílým křídovým práškem) jsou vidět různé detaily, které povrchová úprava pro skenování zamaskovala (obr. 77). Jedná se o různé zdobné rýhování a zpracování detailu reliéfu.



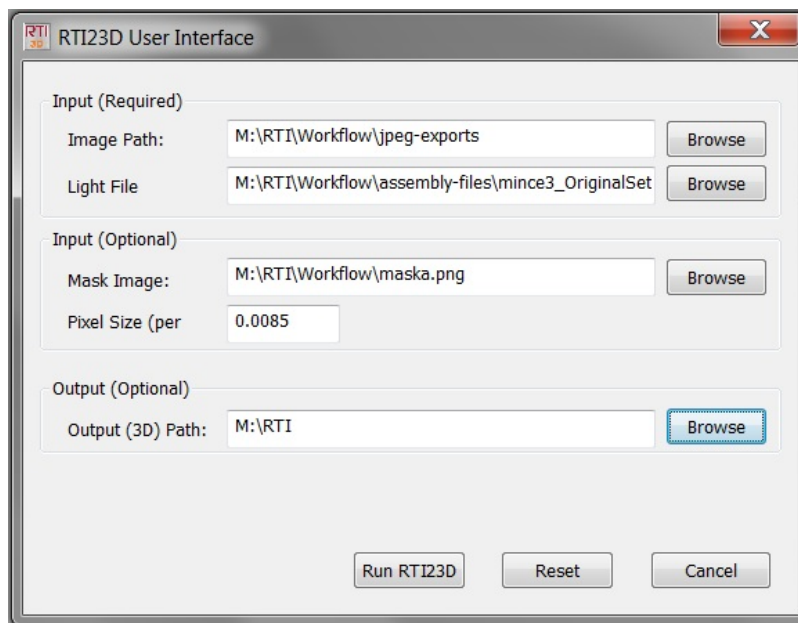
Obr. 77 3D digitální model mince Habsburské soustátí – vév. Slezsko, Ferdinand II. (av.), tolar 1632, mincovna Vratislav, prům. 44,5 mm (vlevo naskenovaný skenerem RangeVision, vpravo rekonstruovaný povrch s využitím stolního skeneru).

12.1.5.2 Rekonstrukce povrchu s využitím normálové mapy z RTI

Výhodou této metody je využití precizní normálové mapy z metody snímkování RTI (je jedním z možných výstupů), kdy normálová mapa je vypočítaná z mnoha snímků pořízených pod jiným směrem osvětlení. Tímto je eliminován vznik stínů od ostrých hran a přechodů. Také díky fotografování objektu digitální zrcadlovkou jsou snímky ostré (různá volba hloubky ostroty) a ve vysokém rozlišení.

Rekonstrukce povrchu je opět založena na výpočtu z normálového vektoru, který je produkován metodou RTI v podobě normálové mapy. Aplikovaný RTI projekt mince byl syntetizován ze 46 fotografií nasnímkovaných ve světelném domě zrcadlovkou Canon 750D s makro objektivem 60 mm. Program RTI23D napsal Ruggero Pintus z programu

Yale's Computer Science v rámci staršího projektu Photometric Stereo using Scanning electron Microscopes. Pro výpočet 3D modelu se do programu zadá cesta RTI projektu se zdrojovými daty, fotografie, lp souborem a volitelně je možné nastavit masku objektu (*Pintus 2015; obr 78*).



Obr. 78 Uživatelské prostředí programu RTI23D.

Výsledkem jsou dva obrázky a precizní rekonstrukce povrchu v 3D digitálním modelu ve formátu .ply který z projektu RTI přejal texturu pro 3D model (obr. 79).



Obr. 79 3D digitální model mince Habsburské soustátí – vév. Slezsko, Ferdinand II. (rv.); textura pro 3D model, normálová mapa, 3D digitální model bez textury.

Trojrozměrný model mince je velice kvalitní a je možné nalézt i mělké škrábance na povrchu, nedokonalosti při výrobě a ražbě, které by průměrný 3D skener nebyl schopen zaznamenat (obr 80).



Obr 80. Detail mince a jeho povrchu.

12.1.6 Závěr

Využitím mnoha druhů vizualizací a možností uživatelského nasvětlení by tento typ dokumentace mincí mohl sloužit také jako částečná digitální náhrada fyzického originálu v případech, kdy přístup k artefaktu je často omezen, anebo je nežádoucí jeho opakované vystavování či fyzické zkoumání. Zaznamenané detailní informace o povrchu mincí a jejich možné matematické vylepšení ve formě zrcadlového posílení zjednodušuje analýzu mincí a jejich případnou čitelnost. RTI vizualizace je možné umístit na webové stránky a tím zpřístupnit mince pro případné badatele ve vysoké kvalitě s možností podrobného vizuálního zkoumání. RTI snímkování je také vhodné pro fázi konzervace mincí, kdy jednoduše a kvalitně zaznamená informace o povrchu před konzervací a po ní. K zaznamenanému stavu je poté možnost se v průběhu času vrátit a zhodnotit čitelnost mince či její případné defekty, či monitorovat změny po ošetření.

V zásadě se jedná o metodu dokumentace, která je velice jednoduchá, rychlá a není k ní potřeba speciálního vybavení. Díky interaktivnímu osvětlení s několika druhy vizualizací je tento typ dokumentace vhodný pro podrobné zkoumání povrchu mincí a podobně členitých artefaktů.

Rekonstrukce povrchu z normálové mapy je vizuálně velice precizní metodou. Nesmíme ale zapomínat, že se jedná pouze o rekonstrukci na základě dat získaných odlišnými metodami, které už v samém počátku mohou skrývat nesprávné hodnoty. Výsledky nedosahují obecných parametrů přesnosti a kvalit jako u skenování a jsou proto nespolehlivá (skutečná velikost objektu je zde potlačena). Přesto pro svoje vizuální klady je velice vhodná pro zaznamenání mikrodetailů na artefaktech, které bychom jinými levnými metodami zatím jen stěží dokázali.

Je zřejmé, že inovativních pokroků je možné dosáhnout „pouze“ vytvořením nových matematických algoritmů a z nich uživatelsky přívětivých programů. Problém je tedy jen v podpoře a směřování technicky zdatných programátorů a vědců do otázek ochrany a analýzy kulturního dědictví.

12.2 Analýza přesnosti repliky fragmentu reliéfního kachle

Původním záměrem bylo analýzu využít pro digitální porovnání formy (kadlubu) a originálů kachlů či dlažby. Během shromažďování materiálu jsem shledal, že formy ze dřeva se na našem území prakticky nedochovaly. Hliněné formy kachlů s reliéfní zdobou přední stranou s čelní vyhřívací stěnou jsou dochovány ve zlomcích (*Ernée – Vitanovský 2003, 548*). Problematická je také otázka smrštění hlíny při sušení a výpalu (*Vlach 2011, 76*).

12.2.1 Úvod

Vytvářet kopie originálních artefaktů je někdy potřeba jak z bezpečnostních, tak vzdělávacích účelů. Vystavené artefakty jsou příliš cenné a nelze je adekvátně ochránit, nebo jsou natolik unikátní, že vystavit jejich kopii je jediným řešením pro edukaci návštěvníků muzeí. Proto přesnost repliky a její barevnost je velice žádaná, aby byla zachována co největší autenticita.

12.2.2 Analýza přesnosti

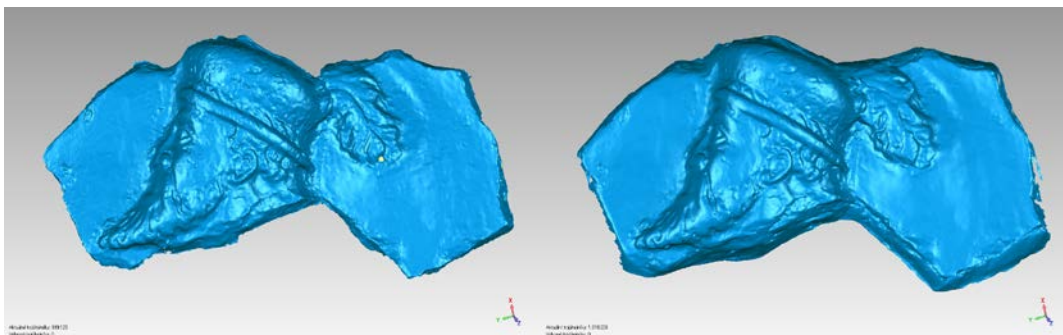
Pro tuto analýzu byl zvolen originál fragmentu reliéfního kachle z regionálního muzea Mariánská Týnice a jeho replika, vytvořená pro výukové účely. Záměrem bylo zjistit, jak velké rozdíly dosahuje replika od originálu.

Výroba kopie byla velice profesionální a forma byla vyrobena pomocí silikonového dvousložkového kaučuku (Lukopren). Odlitek byl vyroben ze sádrové hmoty a barevně kolorován (obr. 81).

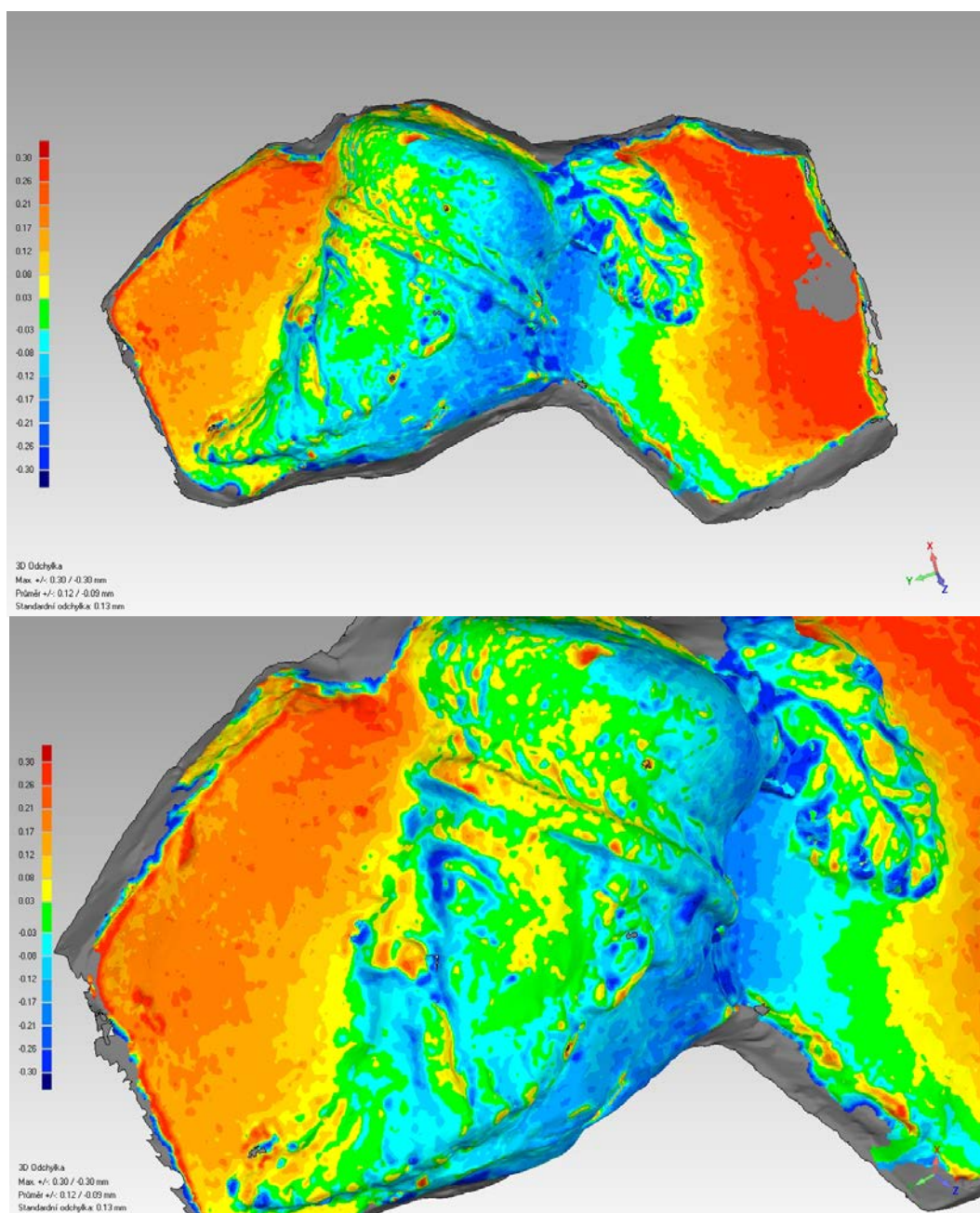


Obr. 81 Fragment reliéfního kachle (vlevo originál, uprostřed kopie, vpravo forma na odlití).

Kopie i originál byly trojrozměrně naskenovány metodou laserového triangulačního skenování skenerem NextEngine HD (obr. 82). Poté byly oba modely navzájem polohově zarovnané (registrovány) a v programu Geomagic Studio 2014 byla provedena trojrozměrná analýza odchylek. Rozsah barevného spektra odchylek byl nastaven na $\pm 0,3$ mm (obr. 83).



Obr.82 3D model fragmentu reliéfního kachle (vlevo originál, vpravo kopie).



Obr. 83 Analýza odchylek 3D modelů fragmentu kachle.

12.2.3 Závěr

Analýza odchylek vypočítala průměrnou přesnost originálu od kopie fragmentu na rozsah hodnot od 0,12 do – 0,09 se standardní odchylkou 0,13 mm. Patrné je, že vyšší hodnoty až 0,3 mm jsou na okrajích ploch fragmentu. To bylo způsobeno pravděpodobně důsledkem tlačení originálu do formy, kdy tato místa kladla větší odpor. Okraje kopie nejsou zanalyzovány, neboť ve formě jsou uměle vytaženy. Hlavička se pohybuje v toleranci průměru hodnot odchylek, a proto můžeme konstatovat, že kopie dosahuje vysoké přesnosti. Věrohodnost barevného provedení nebyla zkoumána.

Analýza odchylek je obsažena skoro v každém editačním programu pro práci s 3D daty. Její nevýhodou je její zaměření do průmyslového odvětví, kde se očekávají odchylky v řádech mikrometrů. Větší odchylky způsobují nepřesné zarovnání objektů a tedy pokaždé jinak vyhodnocenou analýzu. Při velkých odlišnostech a zarovnání mimo povrch porovnaného objektu jsou místa zcela bez analýzy. Otázka využití analýzy odchylek je v nalezení vhodných artefaktů, které se nějakým způsobem, procesem nebo činností mohou jen mírně lišit. Většinou by se mohlo jednat o odlévací formy (kokily) a produkty vyrobené přímo z nich (bronzová industrie). I když také zde je problém s velkými odchylkami, neboť finální odlitek byl vždy upravován odstraněním nálitků a povrch byl upraven leštěním. Aplikace analýzy je tedy v archeologii velice diskutabilní a je potřeba každý příklad řádně otestovat.

12.3 Virtuální složení fragmentů keramiky na příkladu renezančního keramického umyvadla

Bezchybné virtuální skládání je vysněným cílem všech programátorů a vědců, zabývajících se trojrozměrným digitálním prostředím. V podstatě se vždy jedná pouze o vyvinutí vhodného softwarového algoritmu, který dokáže rozpoznat lomy či části objektu a složí jakékoliv druhy artefaktů. Vytvoření vhodného softwaru je spíše

problematikou techniků, avšak testování a zpětná vazba by mohly být otázkou pro archeology.

12.3.1 Úvod

Moderní dokumentační metody v oboru archeologie dospěly do fáze využívání trojrozměrného zaznamenávání reality. Pro tuto novou epochu digitalizace archeologických situací a artefaktů jsou využívány rozličné nové metody sběru dat a moderní přístroje. Pro přesné zaznamenání jemných struktur či ornamentů na povrchu artefaktů jsou většinou využívány triangulační laserové skenery či optické skenery s technologií strukturovaného světla. Pro méně přesné detaily, ale stále dobře popsanou geometrii povrchu, jsou stále více využívány metody fotogrammetrie s nejvíce využívaným algoritmem Structure from Motion (*Torres a kol. 2012*).

Naskenované či nasnímkané a zpracované artefakty ve formě trojrozměrných digitálních modelů mohou být dále využity obdobně, jako se tradičně pracuje s archeologickým materiálem. Po očištění a popsání je prvním krokem pro studium keramických střepů či jiných fragmentů jejich slepení do logických původních celků. Někdy je možné složit i celý původní tvar artefaktu či alespoň jeho velkou část i bez chybějících dílů. Slepování a hledání správných dílků, které do sebe pasují, je složitá a hlavně časově náročná práce. Proto se hledají různé možnosti, jak tuto práci zjednodušit či zautomatizovat. Jednotlivé fragmenty jsou většinou trojrozměrně naskenovány, aby byl přesně zaznamenán i povrch lomu jednotlivých stran a poté se na těchto modelech testují matematické algoritmy pro správné geometrické složení původního tvaru artefaktu. Ideálním řešením problému je automatické složení, které je ovšem velice složité a proto se většinou využívá poloautomatické či někdy jen virtuální manuální složení.

12.3.2 Automatické postupy virtuálního složení fragmentů

Složení 3D modelů fragmentů automatickým způsobem se v mnoha případech řeší pomocí rekonstrukce založené pouze na geometrii fragmentů, protože informace o jejich původním barevném vzhledu je většinou natolik poškozená, či spolu fragmenty barevně nekorespondují, že nemůže být použita. Analyzovány jsou pouze geometrie lomových ploch, kdy jeden fragment může obsahovat libovolný počet lomových ploch. Určením správných lomových ploch na fragmentu a nalezením stejné dvojice ploch lze opět složit 3D objekt. Největším problémem je ovšem globální pozice každého fragmentu ve vztahu k jinému a jejich interakce, kdy se navzájem nesmí proniknout (*Huang a kol. 2006, 569*). Podobných matematických algoritmů, založených na odlišných přístupech, je v poslední době zkoušeno vícero (srov. *Brown a kol. 2012; Oxholm - Nishino 2013; Zheng a kol. 2014*).

12.3.3 Poloautomatické postupy virtuálního složení fragmentů

Poloautomatické postupy fungují v základu na stejných principech jako automatické, ale využívají v procesu skládání i lidský mozek, který má velkou prostorovou představivost a je zatím tím nejdokonalejším počítačem na světě. Operátor archeolog manuálně určuje, jaké lomové plochy jednotlivých fragmentů spolu k sobě patří a program je poté na sebe zkouší bezchybně napasovat. Celý proces je velice efektivní a vizuálně interaktivní, protože umožňuje zohlednit jak odborné znalosti archeologa, tak kvalitu a rychlost automatických algoritmů (*Mellado a kol. 2010; Mellado 2012*).

Operátor v ruce drží trackovací zařízení, kterým v reálném čase může s virtuálním fragmentem na monitoru posouvat a pootáčet. Jedna ruka vždy představuje práci s jedním virtuálním objektem a pomocí nožního pedálu se mezi zvolenými objekty přepíná. Počítač neustále dopočítává shodu objektů dle uživatele, který neustále určuje přibližnou

počáteční relevantní pozici a orientaci mezi dvěma fragmenty (*Mellado a kol. 2010, 34*).

12.3.4 Manuální postupy virtuálního složení fragmentů

Bez speciálního softwaru pro nalezení správných fragmentů se lze také obejít a to použitím své vlastní prostorové představivosti. Tento způsob je časově náročnější, avšak dobře demonstruje složitost procesů, s nimiž se jinak musí samostatně vypořádat matematické algoritmy.

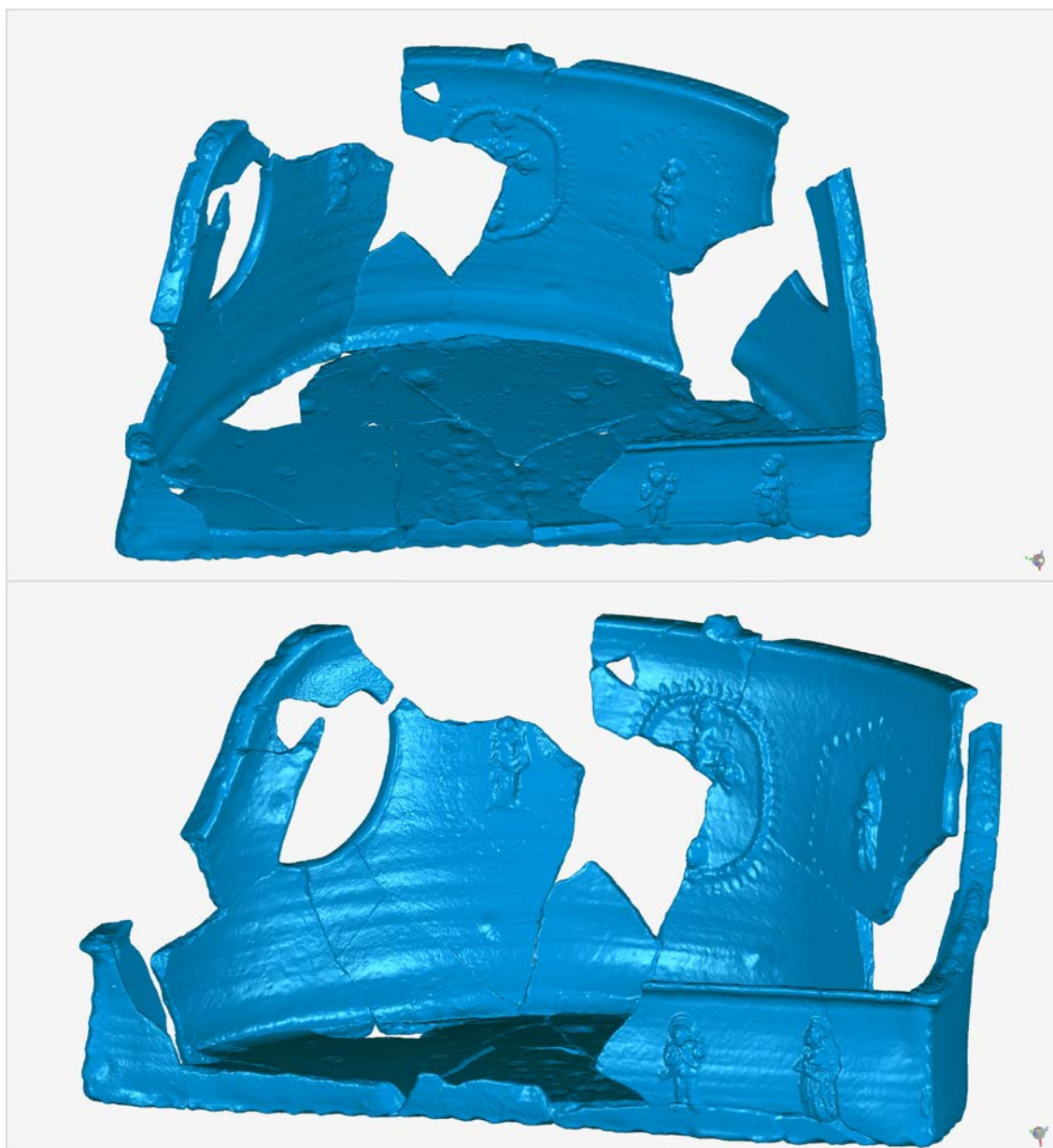
Vhodným materiálem, na němž bylo příhodné vyzkoušet metodu manuálního složení, byl nález renezančního umyvadla při výzkumu na parcele městského domu č. 55 na Latránu v Českém Krumlově. Dvacet sedm střepů umyvadla bylo nalezeno v zásypu studny v hloubce 12m. Dle analogií a provenience výroby lze umyvadlo relativně datovat do období konce 16. a počátku 17. století. Umyvadlo je bohatě zdobeno náboženskými motivy a představuje vrchol luxusu, jaký si mohl dopřát zámožný měšťan nebo šlechtic (*Preusz 2013, 290 – 294; Preusz a kol. 2014*).



Obr. 84 Keramické fragmenty renezančního umyvadla

Všechny střepy umyvadla byly už jednou sestaveny a slepeny do jednoho celku, ovšem vlivem časté manipulace, vlastní vahou plochého materiálu a chybějících střepů jako celkové opory, se umyvadlo vždy fragmentovalo do primárního stavu *in situ*. Proto byl zvolen způsob trojrozměrné dokumentace bohatě zdobeného umyvadla a jeho virtuálního složení do jednoho celku. Celkem bylo 3D naskenováno 11 střepů, které představují velice kvalitně slepené celky z původních 27 střepů (obr. 84). Od záznamu textury 3D modelu bylo upuštěno, jelikož keramické umyvadlo bylo opatřeno krycí transparentní olovnatou zelenou glazurou, která už při trojrozměrném laserovém skenování představovala určitý problém (odlesky, zrcadlení). Proto by kvalita celkové textury byla rovněž neuspokojivá. Naskenované jednotlivé střepy byly poté manuálně

ve virtuálním prostředí zorientovány tak, aby geometricky navazovaly na ostatní střepy ve svém okolí. Nejnáročnější při celkové registraci střepů bylo zachování jejich celkové velikosti, protože střepy měly možnost se navzájem prolínat a porušovat své fyzické hranice. Vzniklý 3D digitální model složeného keramického umyvadla lze poté prezentovat uživateli jako 3D pdf, či tento soubor přímo publikovat v článku, který se vydává i v digitální variantě (viz *Preusz a kol. 2014*; obr. 85).



Obr. 85 Trojrozměrný digitální model složeného umyvadla – bez textury.

12.3.5 Shrnutí

Bezchybné zvládnutí automatických postupů je velkou výzvou pro výzkumné instituce. Ovšem zatím jsou stále publikovány pouze ty studie, které mají vyřešenou technickou část problému na určitých umělých modelových datech. Reálné funkční aplikace programů z terénních dat zatím nejsou k dispozici a ani pro testovací možnosti nejsou volně dostupné.

Pro poloautomatické postupy jsou také nedostupné softwarové aplikace a navíc je potřeba hardwarového zařízení pro manipulaci s virtuálními daty.

Častým problémem v rozšíření programů odborníkům je také časově náročné trojrozměrné skenování všech fragmentů a tudíž lze pozorovat celkovou časovou neefektivnost oproti tradičním postupům. Nezpracovaných fyzických střepů či fragmentů je v každé instituci skutečně mnoho, ale převést toto množství do trojrozměrného digitálního prostředí je zatím značně náročný úkol.

Výhodu lze spatřovat v činnostech, kde lze jen těžko fyzicky pohybovat či přesouvat těžké fragmenty. Největší uplatnění manuálního digitálního skládání se nalézá například při dokumentaci architektury, např. v případě rozpadlých antických chrámů a jejich sloupů (Gregor a kol. 2014). Dalším příkladem je podvodní archeologie a virtuální skládání trojrozměrně zdokumentovaných, těžko dostupných artefaktů, zarostlých v korálech. Opakovanou manipulací s křehkými artefakty by mohlo dojít k nenávratnému poškození, proto je tento způsob práce vhodný také například pro části fresek (*Benedict a kol. 2010; Pintus a kol. 2014*).

12.4 Virtuální hmotová rekonstrukce artefaktu hlavy Buddhy z lokality Mes Aynak

Digitální rekonstrukce artefaktů je velice složitá. Při modelování a rekonstrukci objektu je velice tenká hranice mezi zachováním původního stavu a umělým neoriginálním domodelováním objektu. Digitální rekonstrukce proto musí být velice citlivá a při modelování v digitální hlíně je nutno využívat pouze jasnou předlohu ze stranově symetrického artefaktu či velice podobné předlohy. V opačném případě se jedná o uměleckou tvorbu a výrobu nového objektu.

12.4.1 Úvod

Lokalita Mes Aynak je situována 40 km jihovýchodně od Kábulu v provincii Lógar v Afganistánu. Celosvětově známou se stala až po oprávněné medializaci hrozby jejího totálního zničení. Ohrožení trvá i nadále z důvodu plánovaného otevření povrchového měděného dolu, který bude svou rozlohou zřejmě největší na světě. Důl má tuto archeologickou lokalitu pohlit, jelikož druhé největší ložisko mědi na světě se nachází přímo pod ní. Čínská společnost Metallurgical Group Corporation, která získala absolutní těžební právo a podporu od Ministerstva dolů a ropy a vlády Afganistánu, svůj projekt zahájila už v roce 2009. Archeologické práce pod vedením Archeologického institutu v Kábulu začali o rok později a trvají s přestávkami do dnes (Machat – Petzet – Ziesemer 2014, 18). Prozkoumáno je nyní maximálně 10 % plochy. S lokalitou je díky dokumentu „Saving Mes Aynak“ z roku 2014, natočenému americkým filmovým režisérem Brentem Huffmanem, spojený afgánský archeolog Qadi Temori. Dokument zachycuje beznaděj vůči záchraně budhistického kláštera a ostatních památek vzhledem k plánům afgánské vlády a čínské korporace (*Mes Aynak1, Saving Mes Aynak*).

Mes Aynak (v překladu „Malý měděný důl“) je v odborné literatuře zaznamenán jako archeologická lokalita od roku 1963. Po starověkém dolování mědi pátrala v roce 1976 expedice profesora Gérarda Fussmana, která toto využití doložila už do období Kušánské říše. Díky dostupnému zdroji mědi a vhodné lokaci podél staré hedvábné stezky, která spojovala Asii se Středozemním moře, byl Mes Aynak důležitou obchodní a kulturní křižovatkou už v době bronzové. Doposavad se ze skromného archeologického poznání v údolí Aynak nalézají 19 samostatných areálů aktivit (opevněné tvrže, opevněné kláštery, budhistické stúpy, Zoroastrismický chrám ohně, starodávné měděné doly, hutě, mincovny a hornická obydlí). V Mes Aynak jsou zatím identifikovány budhistické kláštery a další stavby z rané éry buddhismu v Afganistánu. Horizont osídlení se ale předpokládá už od 3. století před naším letopočtem. Mezi nalezenými artefakty se objevují i důležité nálezy jako jsou mince, sklo, dochované dřevěné předměty, rukopisy atd. Všechny tyto archeologicko-historické materiály jsou v bezprostředním nebezpečí zničením budoucí těžbou, která určitě někdy nastane (*Benard – Sugarman – Rehm 2012, Engel 2011*).

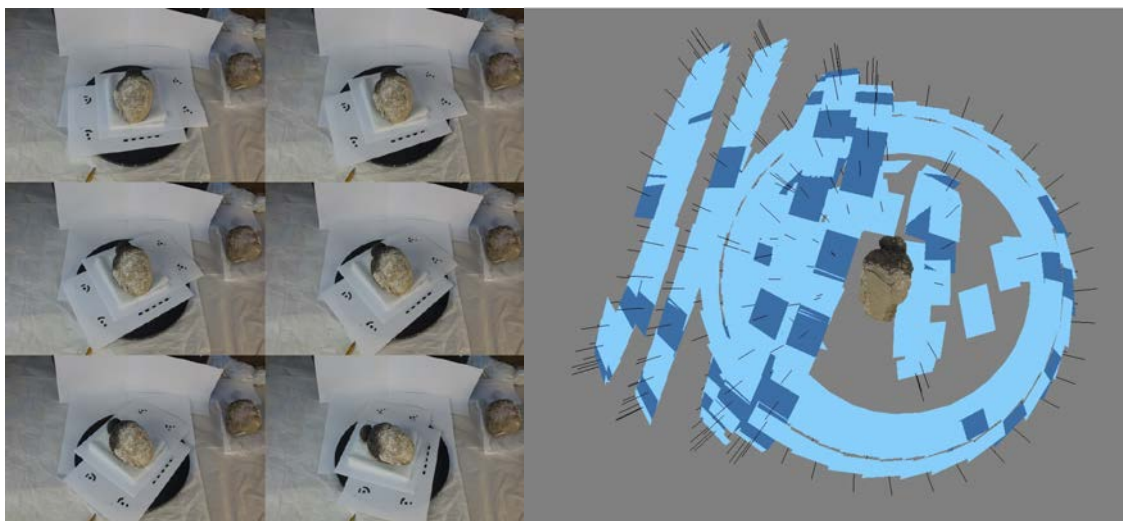
Pro budoucí zachování kulturního dědictví z lokality budhistického kláštera v Mes Aynak, byl pro ukázkou vybrán jeden artefakt (obr. 86), který byl trojrozměrně zdigitalizován a digitálně hmotově rekonstruován do své pravděpodobné původní podoby (pouze na základě dochovaných tvarových spojitostí). Tento počín vznikl pro plánovanou výstavu Národního muzea v Praze „Afgánistán – zachráněné poklady buddhismu“, která byla zapůjčena z Afganistánu.



Obr. 86 Hlava Buddhy – polychromovaný štuk na hliněném jádru 4. – 7. století
n.l.

12.4.2 Trojrozměrná digitalizace hlavy Buddhy

Z důvodu velikosti hlavy Buddhy (10 x 10 x 15 cm), jejího tvarového a povrchového poškození byl pro 3D digitalizaci zvolen algoritmus tzv. *image based modeling*. Jako reprezentant algoritmu byl využit software Agisoft Photoscan Pro. Nasnímáno bylo pro celkové pokrytí hlavy v několika úrovních celkem 309 digitálních fotografií s několika referenčními měřítky a body pro výpočet skutečného rozměru (obr. 87).



Obr. 87 Ukázka sekvence fotografií z jedné části úrovně snímování (vlevo), celkové rozložení úrovní a všech fotografií (vpravo).

Výpočet mračna bodů byl nastaven nanejpšší kvalitu a výsledná délková chyba byla 0,057 mm (v porovnání s 3D laserovým skenem). Konečný 3D digitální model hlavy byl správně globálně orientován a texturován na celkovou velikost textury 8K (obr. 88).



Obr.88 3D digitální model originální hlavy Buddy.

12.4.3 Virtuální hmotová rekonstrukce

Virtuální hmotová rekonstrukce vznikla na zjednodušeném 3D digitálním modelu bez textury. Hmotová rekonstrukce probíhala v programu Geomagic Freeform Plus, který využívá tzv. hybridní modelování. S 3D modely je možné pracovat jako s organickou hmotou ve formě digitální hlíny či tradičně v NURBS plochách či v polygonové síti (obr. 89).



Obr. 89 Uživatelské prostředí v Geomagic Freeform Plus.

Ručním domodelováním byla postihnuta jen ta místa, která bylo možné s velkou jistotou ztotožnit s málo porušenými tvary na druhé straně tváře hlavy a tak zamezit vlastní intenci imaginace. Při podrobném zkoumání byla zjištěna nesymetričnost některých rysů tváře (např. pravého oka a levého ucha), které byly zachovány i v rekonstrukci (obr. 90).



Obr. 90 Virtuální rekonstrukce 3D digitálního modelu hlavy Buddy.

12.4.4 Fyzické porovnání originálu a rekonstrukce

Trojrozměrný digitální model hlavy a její virtuální hmotová rekonstrukce byla trojrozměrně vytisknuta v měřítku 1:1 pro fyzické porovnání obou 3D modelů. Modely byly trojrozměrně vytisknuty technologií FDM z šedého filamentu (termoplast ABS) na tiskárně Zortrax M200 se silou vrstvy 0,09 mm. Tisk jednoho 3D modelu probíhal 25 hodin a bylo spotřebováno (včetně podpůrného materiálu) cca 138 g filamentu (obr. 91).



Obr. 91 Trojrozměrně vytisknutý 3D model originálu hlavy Buddhy.

12.4.5 Shrnutí

Díky specializovanému programu je možné pracovat s 3D daty jako s digitální hlínou (hybridní modelování). Vzhledem k této velké inovaci je zpracování povrchu a tvaru 3D digitálních modelů přirozenější a intuitivnější. Pro virtuální trojrozměrnou rekonstrukci je tento druh modelování zcela zásadní. U programu existuje možnost připojení externího haptického zařízení, které zlepšuje vjem modelace o zpětnou vazbu (je možné cítit odpor, který klade modelovací nástroj do digitální hlíny). Tento typ zpracování 3D digitálních povrchů se velice osvědčil právě pro úpravy a modifikaci 3D digitálních artefaktů. Pro náročnější změny je potřeba určité umělecké cítění a představivost.

Na zdigitalizované hlavě Buddhy se virtuální rekonstrukcí úspěšně podařilo spravit praskliny v hlíně, očistit povrch a domodelovat chybějící části tváře podle nesymetrické předlohy druhé strany. Výsledný tvarový vzhled hlavy je pravděpodobná původní podoba. Pro fyzické porovnání byly oba 3D modely vytisknuty a bylo možné rychle porovnat stav před a po virtuální rekonstrukci.

Virtuální rekonstrukce je časově náročnou metodou, ale přináší obecné výhody digitálních technologií. Veškeré úpravy a změny jsou vratné, nehrozí poškození originálu, zároveň je vytvořena replika originálu a je možné rychle a levně testovat různé styly, procesy a formy. Jednoznačným závěrem je, že tato metoda má v budoucnosti velké uplatnění a určitě se bude dále rozšiřovat a zdokonalovat.

12.5 Vznik 3D modelu metodou obrazové korelace a vznik virtuální rekonstrukce nádoby na příkladu fotografií z Iráku

Trojrozměrná digitalizace technikou SfM je v terénu velice efektivní. V případech, kdy nelze kulturní dědictví odvézt ze země svého původu z důvodu jeho ochrany, je 3D digitalizace velice vhodná.

12.5.1 Úvod

V posledních několika málo letech se metody průsekové fotogrammetrie zcela změnila a byly vymyšleny nové rychlé a přesné algoritmy pro registraci digitálních snímků, výpočet mračna trojrozměrných bodů a jejich interpolaci. Z původního vyhodnocování z jednoho snímku či stereo páru a složitého manuálního zpracování se fotogrammetrie vyvinula v efektivní nástroj jako zdroj rychlého a levného převodu dat do 3D prostoru. Metoda už je prakticky automatická a pracuje s vícero stereo páry, které využívají různé matematické algoritmy (např. SfM – Structure from motion). Nejznámější bezplatné aplikace jsou 123D Catch, ReCap Photo (oba od firmy Autodesk), Bundler, VisualSFM, CMVS, atd. Jejich využití, je jak ze vzduchu, kdy zájmovou lokalitu nasnímkuje bezpilotní letoun, tak pozemní, kdy se o snímkování objektu stará fotograf. Tyto metody jsou čím dál více využívány, ale zároveň jsou v ně kladeny velké naděje a při nesprávně dodržené metodice snímkování je výsledkem většinou zklamáním. Dodržením standartních postupů a využitím vhodné fototechniky lze fotogrammetrií získat realistické trojrozměrné digitální modely.

12.5.2 Produkce 3D modelu z fotografií a přibližná rekonstrukce nádoby

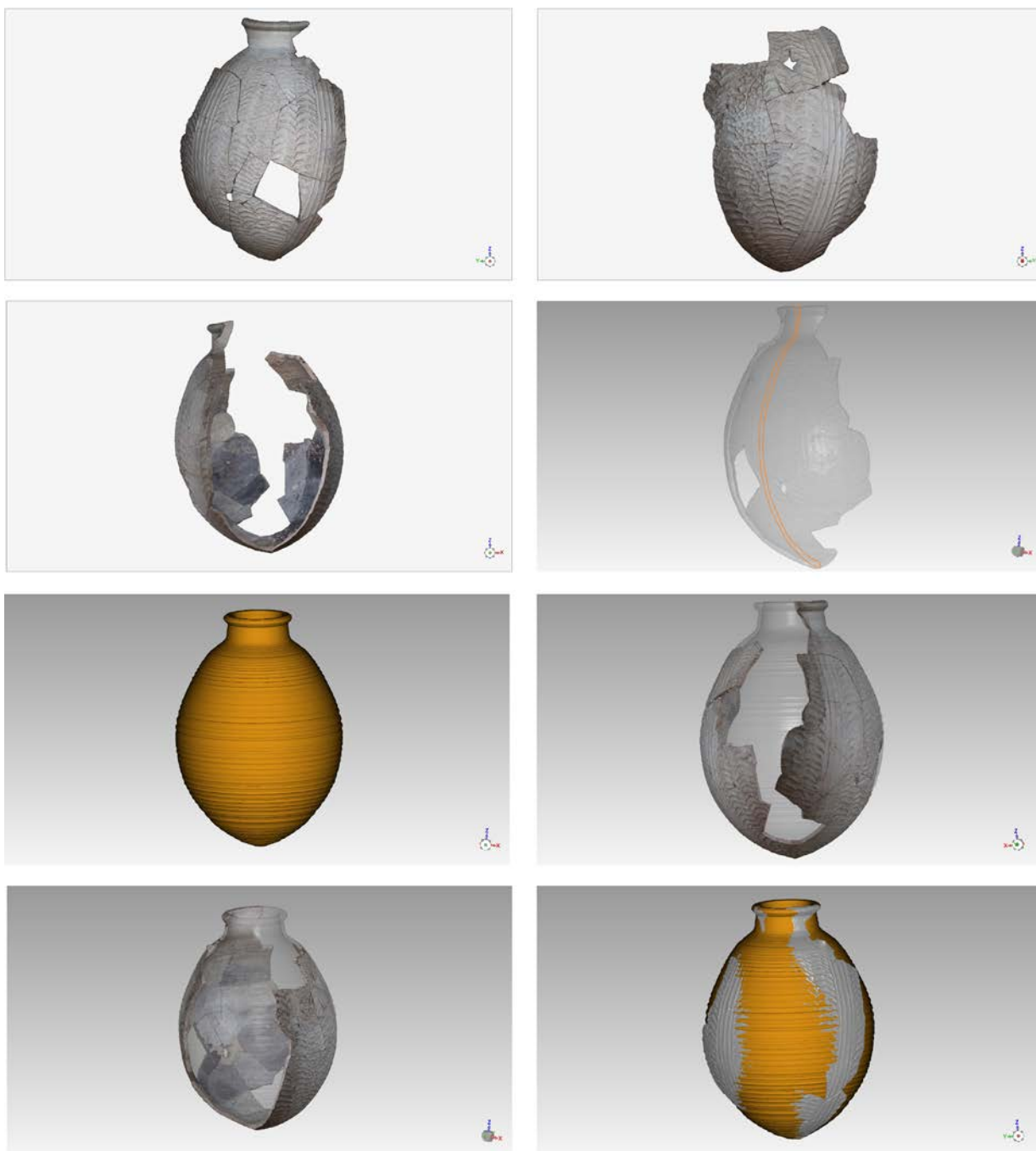
Obrazová korelace metodou SfM je nejvíce oblíbená pro svůj rychlý sběr vstupních dat ve formě jednotlivých digitálních fotografií, dále pro svoji nenáročnost a cenovou výhodnost, kdy nejdražší investicí je nákup kvalitního digitálního fotoaparátu s kvalitním objektivem. Aplikována je nejvíce v terénu, a to jak v podvodní archeologii, tak i při terénních výzkumech pro trojrozměrný záznam odhalených jednotlivých úrovní a artefaktů.

Příkladem sběru dat v terénu s pozdějším zpracováním a vyhodnocením dat o velkém objemu je projekt „Středověká městská síť v severovýchodní Mezopotámii“ (číslo projektu GA13-19266S; <http://www.isvav.cz>). Při povrchovém sběru keramiky v okolí regionálního centra Arbílu v Iráku byly nalezeny keramické střepy, které po umytí a provizorním slepení představovaly dvě třetiny středověké amfory. Každá jedna třetina ovšem byla osamocenou částí s návazností na druhou pouze dnem nádoby. Z důvodu nemožnosti vyvézt archeologický materiál z Iráku a volby lepší dokumentace byly obě třetiny, vždy samostatně vnitřní a vnější strana, nafoceny metodikou sběru dat SfM.

Vzniklý dataset fotografií byl po příjezdu expedice zpracován na pracovní stanici s nastavením na nejvyšší možnou kvalitu programem Photoscan od firmy Agisoft. To znamená, že vždy pro jednu třetinu vznikly dva otexturované 3D modely vnitřního a vnějšího povrchu nádoby. Poté byly povrchy manuálně složeny k sobě a tím byl ztvárněn realistický 3D model jedné třetiny nádoby ve skutečném měřítku. Totožný postup byl aplikován i u druhého dílu nádoby a poté se oba modely mohly připojit k sobě dle lomové plochy dna a jejich celkové geometrie.

Pro celkovou rekonstrukci nádoby bez výzdoby byl vytvořen virtuální vertikální řez nádoby od okraje po dno, čímž vznikl i její celkový profil. Tento profil byl poté rotován podle vnitřní podélné osy nádoby, kdy se vymodelovalo hmotové virtuální těleso představující idealizovanou

rekonstrukci celkového tvaru nádoby. Řezem a rotací skrz složitou výzdobu vnějšího povrchu nádoby vznikly na rotovaném tělesu plastické drážky, které ale nepředstavují skutečnou výzdobu či úpravu povrchu (obr. 92).



Obr. 92 Geneze digitální rekonstrukce nádoby.

12.5.3 Shrnutí

Vhodně zvolenou metodikou vícesnímkového fotografování artefaktů v terénu a zpracováním metodou SfM z těchto fotek je možné úspěšně produkovat kvalitní digitální trojrozměrné modely a to bez použití drahých 3D skenerů. Využití trojrozměrných metod záznamu zde prezentuji jako analytický nástroj. Přidanou hodnotou virtuální rekonstrukce nádoby je jednoduchý výpočet objemu nádoby, přibližný výpočet objemu hlíny spotřebované při výrobě, globální zobrazení tvaru nádoby či nákres přesného profilu okraje a celé nádoby.

Focením v terénu metodou SfM vznikají fotografické datové kolekce, které již nyní dosahují obrovské informační hodnoty. Matematické algoritmy pro zpracování se stále zlepšují a takto nasbíraná data jsou pokladem pro pozdější vyhodnocení. Studie dokázala, že má smysl v terénu (obzvláště na zahraničních expedicích) co nejvíce fotit a to právě především metodou SfM.

12.6 Trojrozměrná digitalizace a prezentace Hroznatovy mísy z Kláštera premonstrátů Teplá

Řešeny budou hlavně otázky aplikace digitálního trojrozměrného prostředí v muzeologii, jako je otázka ochrany, bezpečnosti, uchování, dokumentace a prezentace artefaktu. Na příkladu unikátního artefaktu bude představena jeho 3D digitalizace a varianty jeho prezentace široké veřejnosti.

12.6.1 Úvod

V rámci Evropských fondů pro regionální rozvoj se realizoval Projekt vzorové obnovy NKP Kláštera premonstrátů Teplá. Projekt vzorově revitalizoval historické budovy a obnovil celý areál kláštera, v němž vznikly nové expozice prohlídkových okruhů. Pro nově připravovanou expozici o historii kláštera, včetně archeologických nálezů,

získaných během záchranného archeologického výzkumu před rekonstrukcí, bylo plánováno vystavit unikátní historickou památku tzv. Hroznatovu mísu. Tento artefakt je ve vlastnictví premonstrátské kanonie a nikdy nebyl trvale vystaven. Z důvodu jeho ochrany a nové formy prezentace návštěvníkům bylo rozhodnuto o jeho trojrozměrném zdokumentování a vystavení přesné repliky. Současný stav mísy je neuspokojivý, neboť není kvalitně konzervovaná a také není zrestaurovaná.

12.6.2 Hroznatova mísa

Hroznatova mísa neboli tzv. Gémeillon se používala k přelévání vody na mytí rukou při stolování či liturgických úkonech (většinou ve dvojici). Mísa podle posledních zjištění pochází z Limožské oblasti s datací vzniku okolo 1. poloviny 13. století. Jedná se o import, který byl podle historické literatury darem klášteru od jeho zakladatele blahoslaveného Hroznaty. Miska byla r. 1217 uložena do hrobu Hroznaty a po třicetileté válce byla opět vyzdvižena. Je vyrobena z mědi a je vytepaná do tvaru okrouhlé nádoby zdobené jamkovým emailem. Výzdobu na vnitřní straně tvoří tmavomodrý smaltovaný gotický štít s patnácti zlatými liliemi, věnčený třemi dvounohými draky a šest dvojic kejklířů, umístěných v polích oddělených stylizovanými věžičkami, vyplněných rostlinnými úponky. Na spodní straně misky je vyryt gotický štít s korunovaným jednoocasým, heraldicky vlevo krácejícím lvem a ornament, jehož výběžky zakončují heraldické lilie. K míse původně patřil připojený kovový přívěsek ve tvaru anděla, který byl po roce 1945 ztracen (*Adamaitis – Paličková 2012*).

12.6.3 Trojrozměrná digitalizace

Z důvodu unikátnosti mísy, jejího tvaru a materiálu, z něhož byla vyrobena, byla zvolena metoda 3D digitalizace fotografickou bezkontaktní

metodu SfM. Žádoucí také bylo zachytit co nejvěrněji a nejkvalitněji její barevnost smaltování, neboť bylo plánováno využít její 3D model pro digitální prezentaci (např. *Bruno – Bruno - De Sensi - Luchi - Mancuso - Muzzupappa 2010; Yilmaz - Yakar – Gulec - Dulgerler 2007*). Kovové odlesky a tenký profilovaný tvar misky by byl pro laserové skenování problematický. Také produkci realistické textury by v dostatečné kvalitě skenovací přístroje těžko zaznamenaly.

Pro kvalitní texturu byla mísa při snímkování osvětlena dvěma externími fotografickými lampami. Mísa byla umístěna na otočné podložce a snímkování probíhalo v několika výškových úrovních s jednotnými pootočeními na otočné podložce. Fotoaparát na stativu byl nastaven na manuální ostření a expoziční režim na prioritu clony (clona nastavena na nejvyšší hodnotu). Pro pozdější přesný výpočet skutečné velikosti byla okolo mísy umístěna referenční měřítko jako vlíčovací body ve formě kódovaných značek a jednoho měřítka (obr. 93).

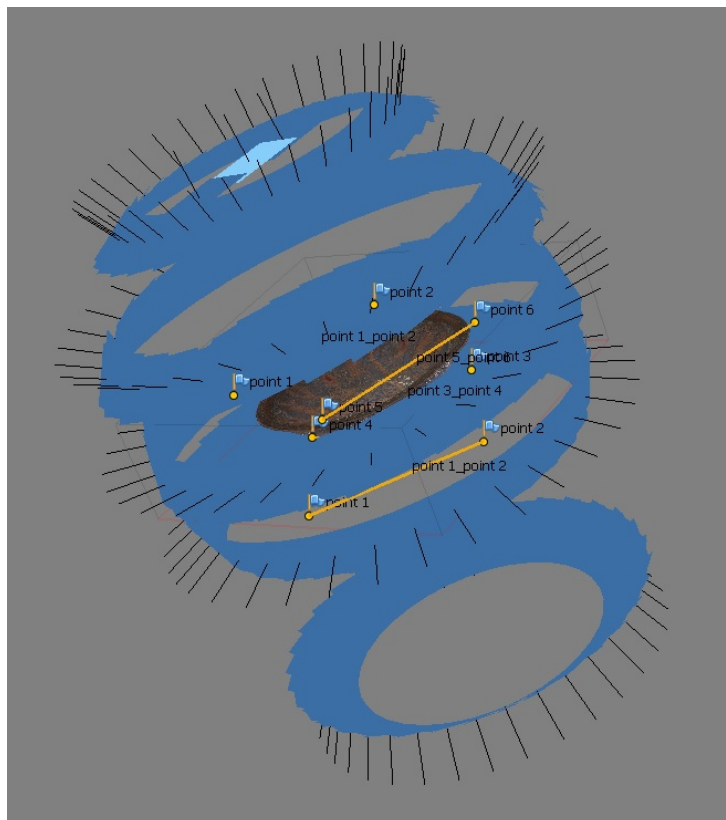


Obr. 93 Fotografie ze snímkování Hroznatovy mísy.

Celkový počet nasnímaných fotografií v pěti výškových úrovních byl 174. Pro konkávní část mísy byly snímkovány 3 úrovně a pro konvexní 2.

12.6.4 Zpracování digitálních fotografií do 3D modelu

Zpracování nasnímaných fotografií probíhalo v programu Photoscan Professional od firmy Agisoft. Pracovní postupy v tomto programu byly mnohokrát podrobně vysvětleny (např. *Brůna - Brejch – Marek - Větrovská 2015, 37-53; Pavelka, – Šedina - Matoušková – Faltýnová – Řezníček 2015b; Verhoeven 2011; Howland - Kuester – Levy 2014*), a proto v krátkosti uvedu základní metodiku. Po načtení fotografií byly snímky vymaskovány, aby byla počítána pouze oblast s mísou. Pro výpočet 3D modelů byly připraveny odděleně konvexní a konkávní snímky mísy. Po zarovnání snímků byla aplikována oprava z hodnot kalibrace objektivu. Poté došlo k odstranění vyšších reprojektových chyb a vyšších chyb rekonstrukční nejistoty. Na fotografii byly z kódovaných značek automaticky rozpoznány a označeny vlícovací body, které posloužily jako referenční měřítko pro skutečnou velikost. Po výpočtu hustého mračna bodů (nastavení na nejvyšší kvalitu) byl model přepočítán do polygonové sítě. Referenční měřítko aktualizovala skutečnou velikost. Stejným způsobem byla zpracována i druhá část mísy. Spojením obou částí a přepočtem polygonové sítě vznikl 3D model celé Hroznatovy mísy, která byla otexturována ve vysokém rozlišení (rozlišení textury 16K; obr. 94).



Obr. 94 Celkové rozložení snímkovaných fotografií a referenční měřítka na vypočítaném 3D modelu Hroznavy misky.

Celková doba výpočtu kompletního 3D modelu na výkonné počítačové stanici byla 6 hodin (potřebný strojový čas pro výpočet). Ve vzniklém 3D modelu misky byly rovněž opraveny chyby v topologii polygonové sítě tak, aby mohl být model vytisknut na 3D tiskárně. Polygonová síť se skládá z celkového počtu 2 748 344 trojúhelníků a je velice detailní (obr. 95). Na misce jsou vidět opravovaná místa, důlky a škrábance po pádech, poničený smalt, zlomený lem okraje a zprohýbaný okraj (obr. 96).



Obr. 95 3D model Hroznaťovskej misky.



Obr. 96 Detail okraje 3D modelu Hroznatovy mísy.

12.6.5 Prezentace 3D digitálního modelu Hroznatovy mísy

Pro účely fyzické prezentace mísy a pro využití jako prvku v expozici byla mísa trojrozměrně vytisknuta technologií PolyJet z bílého polymeru. Při finálním 3D tisku se originální model doplnil o podstavec, který byl potřeba k upevnění mísy do podstavcové konzole. Vytisknutý 3D model byl poté ručně kolorizován podle původní barevnosti. Přimontovaná mísa slouží jako vstupní prvek do expozice v klášteře (obr. 97).



Obr. 97 3D fyzický model mísy připevněný na konzole (pod mísou chybí krycí sklo).

K prezentaci trojrozměrného digitálního modelu byla zvolena tzv. holografická vitrína Dreamoc XL2. Pod zkoseným sklem je ze tří stran vidět animace, která se vznáší v prostoru vitríny. Pro multimediální obsah vitríny jsem z texturovaného 3D modelu mísy vytvořil speciální animaci, kdy se mísa otáčí kolem své osy a pak následují detailní průlety okolo ní (obr. 98). Vitrína pracuje na principu Pepper's Ghost efektu a ve skutečnosti neobsahuje žádnou holografickou technologii, pouze důmyslnou projekci odrazem z plochého monitoru na nakloněné roviny skleněných desek (*Ghost efekt*). Projekce animace se může kombinovat i se skutečným objektem vystaveným ve vitríně. Tento prvek je v expozici vizuálně velice efektní.



Obr. 98 „Holografická“ vitrína Dreamoc XL2 s animací Hroznatovy mísy.

12.6.1 Závěr

Trojrozměrná digitalizace exponátů je pro sbírkotvorné organizace budoucím vývojem. Zdigitalizované cenné artefakty je tak možné mnohem lépe ochránit a zabezpečit proti mnoha vlivům, nejen proti krádeži, ale také proti měnícím se účinkům prostředí ve vitrínách. Z pohledu ochrany je nejlepším místem cenných artefaktů trezor se stabilizovaným prostředím. Na dobrý dojem návštěvníků to však v případě vytvořených digitálních 3D modelů a jejich vhodné prezentaci nemá vliv. Trojrozměrná dokumentace také zaznamenala skutečný stav povrchu před případnou konzervací a zrestaurováním mísy. Při vhodných finančních podmínkách a plánování nových expozic má smysl využívat nová řešení pro edukaci návštěvníků a umožnit jim vidět i velmi cenné artefakty, které by z bezpečnostních důvodů jinak nemohli spatřit. Na příkladu Hroznatovy

mísy je názorně vidět že 3D digitalizace nekončí jen dokumentací, ale je možné dále 3D data veřejně prezentovat i v jiné formě.

12.7 Dokumentace plošné exkavace usedlosti v zaniklé středověké vesnici Cetkov okr. Rokycany

Hlavní otázkou je testování 3D dokumentace ve větším měřítku a pokud možno smysluplně. Proto byla během letních archeologických praxí vybrána archeologická exkavace, kde bylo možné tuto problematiku odzkoušet. Trojrozměrná dokumentace zde má vedle tradičních metod zpracování své zastoupení.

12.7.1 Úvod

Při archeologickém odkryvu je vždy velice důležitá rychlá a přesná dokumentace odkrytých situací, vrstev a nálezů. V minulosti tradiční kreslení, fotografování a odměřování metry už mnohdy nedostačovalo a s příchodem prostorové archeologie a geoinformačních systémů bylo zapotřebí dokumentaci urychlit a zpřesnit. V terénu se začaly využívat elektrooptické tachymetry (totální stanice) a geodetické dokumentační metody sběru trojrozměrných dat. Při stále větší potřebě zaměřit co nejvíce přesných informací totální stanicí se i přes zmíněnou modernizaci dokumentace neúměrně zpomalila (zaměřovány jsou při výzkumu stovky až tisíce přesných bodů). Nástupem trojrozměrného pozemního skenování se zdála být tato problematika komplexního prostorového zdokumentování archeologického výzkumu odkryvem vyřešena, ale z důvodu velkých finančních prostředků je stále tato metoda využívána jen sporadicky. Substitucí 3D pozemního skenování je využití metody Structure from Motion (SfM), která se osvědčila již při mnoha výzkumech a zaměřování (srov. *Koska - Křemen 2013; Cardaci - Versaci 2013; Douglass – Lin – Chodoronek 2015; Doneus – Verhoeven – Fera – Briese – Kucera – Neubauer 2011*). Její efektivita, přesnost, rychlost a malé celkové náklady při trojrozměrném dokumentování výzkumu v terénu ji

k tomu predestinují (např. Houshiar - Borrmann - Elseberg – Nüchter - Näth – Winkler 2015).

SfM byla aplikována na plošném archeologickém výzkumu usedlosti v zaniklé středověké vesnici Cetkov okr. Rokycany. Vesnice Cetkov byla založena ve 14. století a zanikla během třicetileté války. Na výzkumu se v rámci Cetkov Field School 2016 podílel J.Symonds a M.F.P. Dijkstra z Amsterdamské univerzity a Katedra archeologie FF ZČU v Plzni. Výzkumnou plochou byl určen antropogenní relikt jedné středověké usedlosti, respektive jednoho domu, který byl postupně odkryt v plošném měřítku s minimálním počtem kontrolních bloků. Trojrozměrně dokumentovaná byla vždy celá plocha odkryvu ve 4 úrovních (úroveň Level 0 je původní povrch před výzkumem).

12.7.2 Příprava výzkumu před snímkováním

Před dokumentací metodou SfM je potřeba dokumentovanou plochu zkontrolovat a vyčistit od věcí a nářadí, které dokumentovat nechceme. Při focení už by nemělo být nic přesouváno a jinak polohově měněno, neboť hrozí nemožnost výpočtu 3D povrchu. Pro zasazení budoucího 3D modelu do souřadnicového systému, jeho georeferencování a určení skutečné velikosti musí být v terénu nějakým způsobem signalizovány vlíčovací body o známých prostorových souřadnicích. Většinou jsou potřeba minimálně 4 vlíčovací body, které jsou zaměřeny totální stanicí s definovaným souřadnicovým systémem. Pro každou dokumentovanou úroveň bylo vždy zaměřeno 6 až 8 vlíčovacích bodů ve formě kódovaných značek.

12.7.3 Snímkování výzkumu pro SfM

Pro metodu SfM je možné pořizovat digitální fotografie z ruky, z tyče, z dálkově řízeného leteckého systému atd. Vždy je potřeba zvážit vhodnost nástroje pro snímkování dle objektu zájmu, jeho okolního prostředí a terénu. Snímky by měly být pořizeny pokud možno kolmo k

povrchu zájmu a v dostatečné kvalitě nutné pro metodu SfM (ostré, s minimálním digitálním šumem, s velkým překryvem). Při dokumentaci archeologického výzkumu ve vzrostlém lese bylo využito snímkování z teleskopické tyče (cca 2,5 m), které umožnilo bezproblémové, téměř kolmé snímkování na celé ploše odkryvu reliktu domu. Využita byla digitální zrcadlovka Canon EOS 750D s ultraširokoúhlým objektivem Canon EF-S 10-22 mm f/3,5-4,5 USM a bezdrátovým dálkovým ovladačem spouště. Zvolené ohnisko snímkování bylo vždy nastaveno na nejkratší ohnisko 10 mm při světlosti objektivu 3,5. Ostření bylo nastaveno na středový ostřicí bod a citlivost na 100 nebo 200. Fotografování z relativní výšky cca 4m s širokoúhlým objektivem je výhodné pro dosažení většího úhlu záběru a tedy docílení velkého překryvu fotografií. Celkem bylo na každou dokumentovanou úroveň pořízeno okolo 300 fotografií, dle členitosti odhalených struktur. Doba přípravy vlíčovacích bodů a snímkování byla vždy okolo 30 minut.

12.7.4 Vyhodnocení snímků a tvorba 3D digitálního modelu

Pro aplikaci metody SfM byl využit placený program Photoscan Professional od firmy Agisoft. Pracovní postupy v tomto programu byly mnohokrát podrobně vysvětleny (např. *Brůna - Brejch – Marek - Větrovská 2015, 37-53; Pavelka, – Šedina - Matoušková – Faltýnová – Řezníček 2015b; Verhoeven 2011; Howland - Kuester – Levy 2014*) a proto v krátkosti uvedu základní metodiku. Na každé nasnímkované úrovni byly provedeny následující kroky. Po nahrání kolekce snímků byly odstraněny nekvalitní snímky, byl nahrán kalibrační soubor použitého objektivu a fotoaparátu a model byl optimalizován dle kalibrace. Poté bylo vypočítáno zarovnání všech snímků na nejvyšší přesnost. Ze vzniklého řídkého mračna bodů byly odstraněny vyšší reprojektové chyby a vyšší chyby rekonstrukční nejistoty. Na všech fotografiích byly automaticky rozpoznány a označeny vlíčovací body z kódovaných značek. Pro každý vlíčovací bod byly zapsány změřené souřadnice z totální stanice a vypočítána celková odchylka od skutečnosti, která byla do 0,5 cm. Dalším

krokem byl výpočet hustého mračka bodů (nastavením volby vysoké detaily) a poté výpočet polygonové sítě typu arbitrary. Po editační úpravě 3D modelu (oříznutí nadbytečných částí) se 3D model aktualizoval a podle referenčních dat z vlíčovacích bodů se georeferencoval. Každou úroveň povrchu popisuje cca 8 milionů obarvených bodů podle reality. Celkový čas výpočtu všech 3D modelů odhalených úrovní byl 32 hodin (potřebný strojový čas pro výpočet).

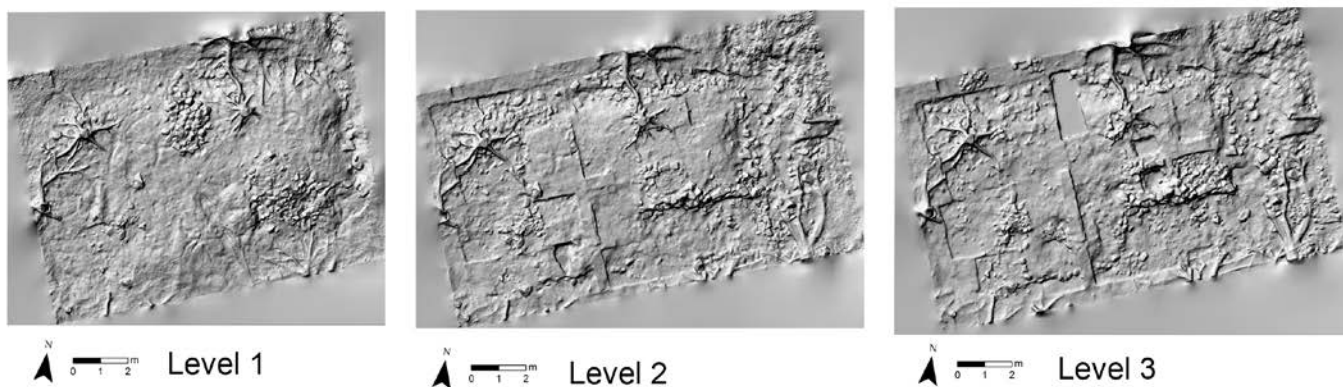
12.7.5 Výstupy z 3D digitálního modelu výzkumu

Z dokončeného 3D digitálního georeferencovaného modelu jedné úrovně archeologického výzkumu byl vždy vypočítán jeho ortofotoplán ve vysokém rozlišení (realistický kolmý pohled; obr. 99), digitální výškový model (DEM) v rozlišení 0,01 m (obr. 100) a 3D model s obarveným povrchem ze zdrojových snímků (obr.101). Textura pro 3D model jednotlivých úrovní nebyla vypočítána z výpočetně-časových důvodů. Trojrozměrný digitální model z každé úrovně je možno interaktivně prohlížet ve virtuálním muzeu²¹.

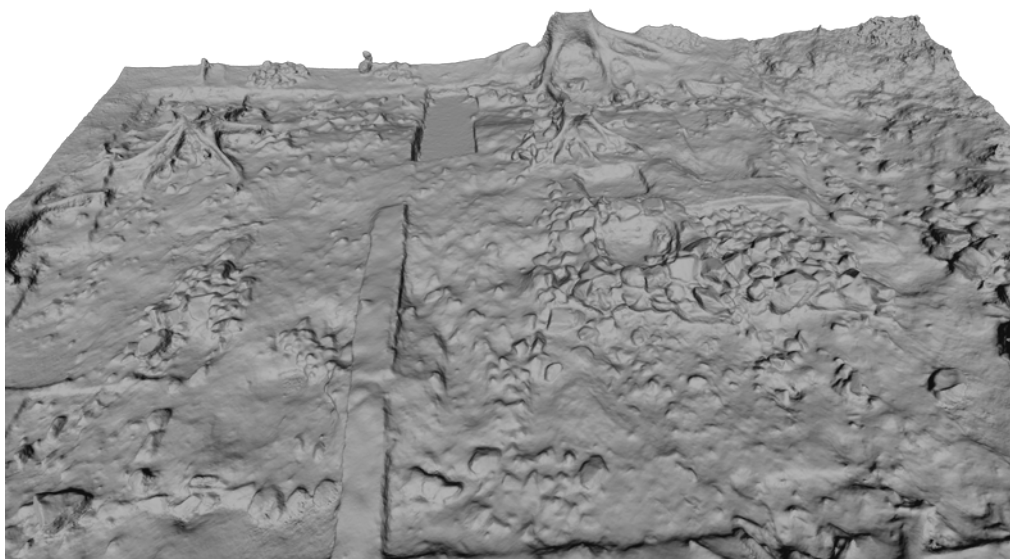


Obr. 99 Ortofotoplán výzkumu Cetkov (zleva: úroveň 1, úroveň 2, úroveň 3).

²¹ <https://sketchfab.com/plzak/models>



Obr. 100 DEM jednotlivých úrovní, vizualizace stínový náhled.



Obr. 101 Detail 3D modelu úrovně 3 – pohled z východu na destrukci pece.

12.7.6 Shrnutí

Trojrozměrné digitální dokumentování plošného výzkumu přineslo velmi přesné a kvalitní informace o několika odkrytých úrovních středověkého domu. Přesně je zdokumentována především obytná část s destrukcí kamenné pece, kdy je každý kámen v in-situ trojrozměrně zaznamenán. Oproti tradiční dokumentační metodě v terénu (kresba, zaměření totální stanicí) je SfM velice rychlou metodou s komplexním zachycením povrchu ve 3D, kdy každý bod obsahuje souřadnice x,y,z v souřadnicovém systému S-JTSK. Takto precizní zaměření totální stanicí by trvalo několik dní měření v terénu. Výhodou oproti tradičním metodám dokumentace je také rychlé vygenerování georeferencovaného ortofotoplánu ve vysokém rozlišení, který je možné používat jako podkladovou vrstvu, či plán celkově vektorově zdigitalizovat. Digitální výškový model ve vysokém rozlišení dokáže svou kvalitou nahradit 3D laserové skenování, které je velice nákladné.

Získaná 3D data výzkumu jsou dále připravená pro prostorové analýzy (DEM) a pro srovnání s ruční kresebnou dokumentací, která bude určitě méně přesná a kvalitní (*srov. Kimball 2016, 35*). Metoda prokázala svojí efektivitu a jednoduchost v terénu, kdy je zcela zásadní pořízení kvalitní terénní fotografické dokumentace, kterou běžně pořizují terénní technici, pouze s jinou metodikou sběru dat. Dále je možné takto zdokumentovaný výzkum digitálně prezentovat ve virtuálním muzeu, stejně jako prohlídku ve virtuální realitě. 3D dokumentace poslouží také jako virtuální konzervace lokality pro budoucí digitální rešeršní výzkum či porovnání.

12.8 Ukázka aplikace trojrozměrné geometrické morfometrie na keramických nádobách z Calderonovy sbírky

Kombinací moderních a tradičních analytických metod je na 3D digitálních modelech dosahováno exaktnějšího poznání. Většinou se jedná o komplexní propojení a využití nezbytného softwaru pro analýzy.

Trojrozměrná geometrická morfometrie využívá tradiční geometrickou morfometrii se specifickými/význačnými body v souřadnicovém systému (landmarks) s trojdimenzionálními hodnotami. Z důvodu placeného a nedostupného softwaru na volné generování landmarks v 3D systému (např. Geomagic Design X) popíši tuto problematiku na publikované zahraniční studii (*Selden - Vasconcelo 2015*). Tvorba jednotlivých virtuálních profilů nádob není vhodným a exaktním postupem pro vyhodnocení trojrozměrnou geometrickou morfometrií. Profily/řezy by měly popsat celý tvar okraje a ne pouze jedno určité místo (a to u profilů nelze). Z důvodu omezeného softwarového vybavení a nekomplexnosti matematického popisu okrajů jsem od produkce virtuálních profilů a typářů upustil.

Velice příhodné bude v budoucnosti aplikovat stejnou metodiku na volně dostupné trojrozměrné digitální modely neolitických nádob z Archeologického 3D virtuálního muzea. Tato trojrozměrně zdigitalizovaná sbírka obsahuje 78 modelů celých nádob z Kultury s vypíchanou keramikou a 293 modelů celých nádob z Kultury s lineární keramikou z archeologického výzkumu v Bylanech. Dostupné 3D modely se přímo nabízejí k vytěžení dalších informací z jejich úplného tvaru (slepených či doplněných fyzických nádob).

12.8.1 Úvod

Kolekce se širokou škálou keramických nádob a také pohřebních uren tzv. Calderonova sbírka se nalézá v Museu de Arqueologia e Etnologia ve městě Salvador v Brazílii. Jedná se o ucelenou sbírku prvního profesionálního brazilského archeologa Valentina Calderona. Po jeho odchodu zůstala spousta nepublikovaných rukopisů, nepřeborné množství poznámek z výzkumů, stovky fotografií a artefaktů, které jsou nyní digitalizovány a zpracování je sponzorováno Centrem pro regionální výzkum památek (The Center for Regional Heritage Research - CRHR) ze Státní univerzity Stephena F. Austina z Texasu. Archeologii v CRHR se věnuje Robert Z. Selden. Centrum se zaměřuje především na témata

3D skenování, morfometrie, krajinou archeologii a na výzkum kulturní tradice Caddo v jihovýchodní USA.

Trojrozměrná geometrická morfometrie byla v nedávné době aplikována u analýzy kamenných nástrojů a jejich debitáže (*Bretzke - Conard 2012; Lycett - Cramon-Taubadel 2013*). Samotná technologie 3D skenování byla využita jako nástroj ke studiu keramiky (*Karasik 2008*). Využita už také byla morfometrie keramiky s kombinací výpočetní statistiky (*Karasik - Smilansky 2011*). Sdružení trojrozměrné technologie a geometrické morfometrie byla zatím okrajově využita ke studiu tvaru nádob a k pochopení jejich rozdílů.

Trojrozměrně naskenované nádoby z Calderonovy sbírky byly využity ke zdokonalení metodiky 3D geometrické morfometrie využívané v rámci CRHR, která už proběhla u výzkumu Caddo keramiky (*Selden – Perttula – O'Brien 2014*).

12.8.2 Určení keramiky

Podle Calderona se jedná o urny z kultury Aratu, která se v oblasti Bahia datuje od roku 1000 do 1500 n.l. Pro Aratu jsou definované tři fáze Jaraguá, Itaci a Sapucaí. Urny ze sbírky se nejvíce přibližují fázi Sapucaí. (*Chmyz 1976*). Urny se skládají z jednoho nebo dvou částí (s nebo bez pokličky). Podle velikosti byly v urnách pohřbeny jak děti tak dospělí jedinci.

12.8.3 3D geometrická morfometrie

Ve studii CRHR je využita klasicky známá geometrická morfometrie s eliptickou Fourierovou analýzou. Inovace s 3D modely je ve zdokonalení aplikace významných bodů, kdy se jedná o přechod z 2D na 3D analýzy. Pro každou nádobu byly vytvořeny 4 kompletní digitální profily.

12.8.4 Metodika sběru 3D dat

Pro trojrozměrné laserové skenování nádob byl využit ruční skener ZScanner 700CX a Creaform Go! Scan 50 s možností zaznamenat barevnou texturu povrchu s přesností do 0,1 mm a rozlišením do 0,2 mm (obr. 102). Digitální 3D modely je možné prohlížet na stránkách CRHR²², kde jsou také ke stažení 3D data (zjednodušená ve formátu .stl a .ply)



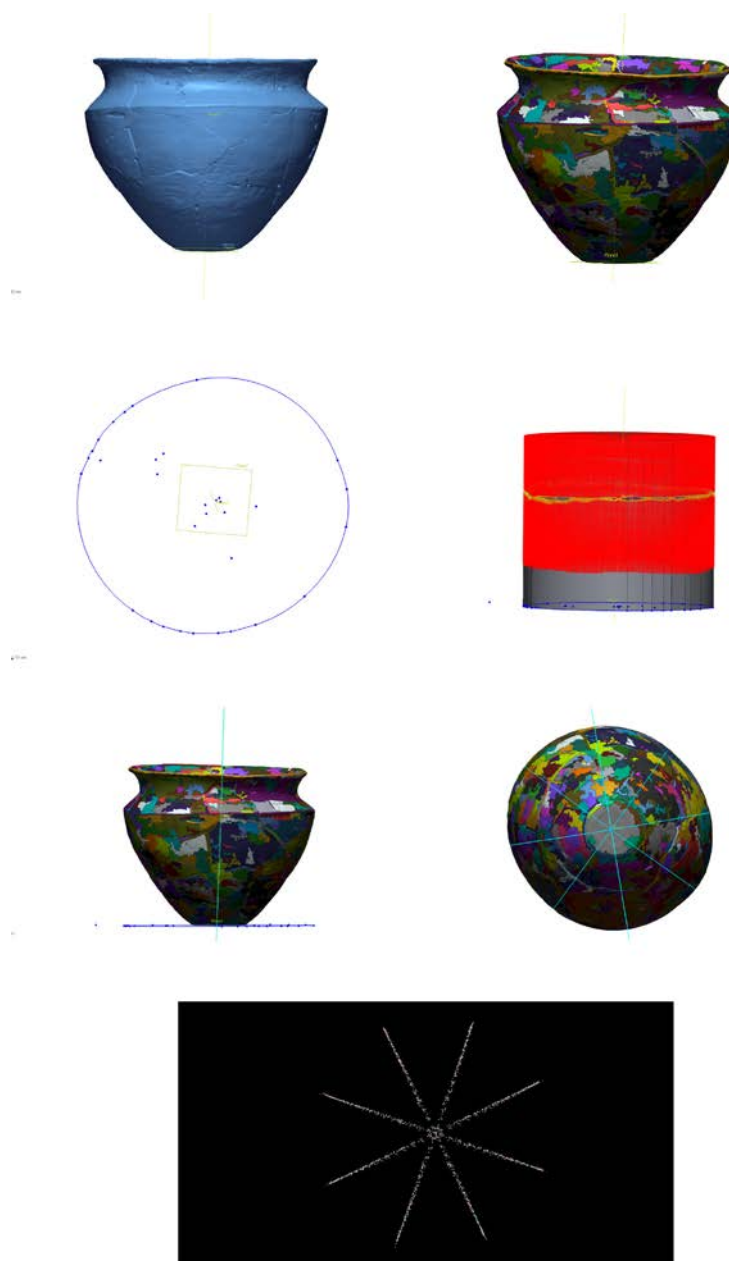
Obr. 102 Trojrozměrné skenování nádob (zdroj: selden3d.com)

12.8.5 Metoda geneze landmarks na 3D modelu

Pro stejnou globální registraci v prostoru je u každé nádoby vypočítán rotační vektor, který identifikuje centrální osu každé jedinečné nádoby. K vytvoření první pohledové roviny na základě okraje či dna nádoby se musí identifikovat vhodně zvolené regiony skupin povrchu. K získání druhého bodu na z vektoru nádoby je potřeba využít vertikální siluetu, která je definována úhlem základní roviny. Siluetou se vytáhne válec, který indikuje odchylky od nádoby a nejvzdálenější body nádoby. S použitím získaného vektoru je možné definovat nejširší místo nádoby,

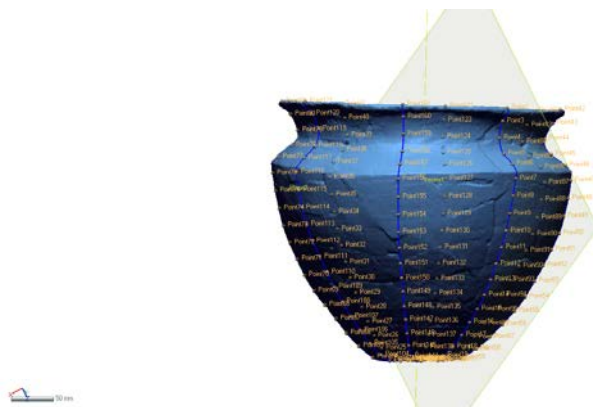
²² <http://crhr-archive.sfasu.edu/handle/123456789/78>

které po proložení roviny definuje nejširší profil. Zbylé polohy profilů se dopočítají z prvního profilu tak, aby byly rovnoměrně rozložené a vždy svíraly 45 stupňů a zároveň se všechny protínaly v základním středovém vektoru (obr. 103).



Obr. 103 Ukázka jednotlivých kroků pro generování landmarks na 3D digitální nádobě (zdroj: selden3d.com).

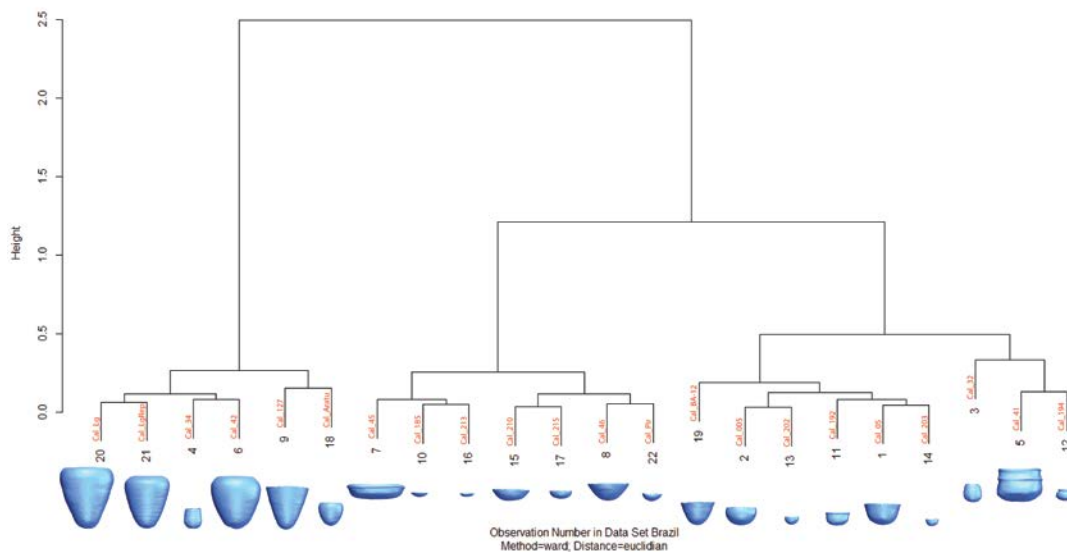
Tímto vzniknou úplné 4 křivky profilu nádoby. Na každé křivce se vygeneruje 40 význačných bodů (*Selden3d; obr. 104*).



Obr. 104 Vygenerované hodnoty landmarks na nádobě (zdroj: selden3d.com).

12.8.6 Statistické vyhodnocení

U každé nádoby z celkového počtu 23 bylo automaticky vygenerováno 161 význačných bodů. Hodnoty byly poté exportovány z Geomagic Desing X, upraveny v Excelu a jako textový soubor následně importovány do programu Morphologika 2.5, ve kterém byla provedena statická analýza tvaru (Procrustesova analýza, GPA) a poté analýza hlavních komponent (PCA). Výsledky byly zobrazeny metodou klastrových analýz K-means, která byla vynesena v programu 3D Scatterplot (obr. 105).



Obr. 105 Ukázka výstupu ze statistické analýzy (zdroj: selden3d.com).

12.8.7 Shrnutí

Výsledky analýzy klastrů poukazují na čtyři možné varianty morfologie nádob. Bylo zjištěno, že keramika z Aratu je ve stejné skupině, zatímco nádoby z kultury Tupi-Guraraní mají větší tvarovou variabilitu. 3D modely mohou být doplněny o kvalitativní údaje z více tradičních metod pro analýzu keramiky, což může vést k lepšímu pochopení, kdy a jak byly tyto artefakty použity. CRHR i nadále zkoumá schopnosti nástrojů 3D skenování a geometrické morfometrie. Data z 3D analýz bude srovnávat s výsledky 2D analýz.

Trojrozměrná geometrická morfometrie má veliké uplatnění pro analýzu a statistické vyhodnocení artefaktů. Ve světě se aktivně využívá a nad výsledky se diskutuje (*Morph*). Softwarovým omezením není vyhodnocovací matematická část, ale vstupní, kde se data pro analýzu vytvářejí. Zatím není volně dostupný program pro vlastní nadefinování a generování landmarks, který by byl využitelný pro keramiku ve formě 3D digitálních modelů. Studie předvedla metodiku a případné výsledky, kterých bylo dosaženo (pro vstupní část analýzy) komerčním programem.

12.9 Dokumentace mazanic a tvorba digitálních otisků dřevěných konstrukčních prvků

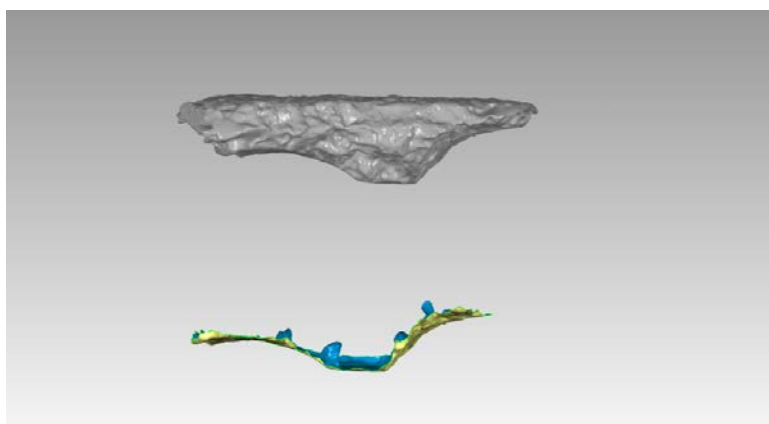
12.9.1 Úvod

Mazanicové omazy a výmazy dřevěných konstrukcí jsou velmi rozmanitým archeologickým pramenem pro poznání konstrukčních a stavebních prvků pravěkých či středověkých domů. Jejich negativní otisky po dřevěných konstrukčních prvcích skrývají velký informační potenciál a váží se k nim rekonstrukční hypotézy o podobě minulých dřevohliněných konstrukcí.

Produkce digitálních otisků by mohla napomoci tyto otisky lépe číst a lépe jim porozumět. Testovány byly mazanice z výzkumu tvrže v Řesanicích (Čapek - Netolický - Plzák - Vladař 2014).

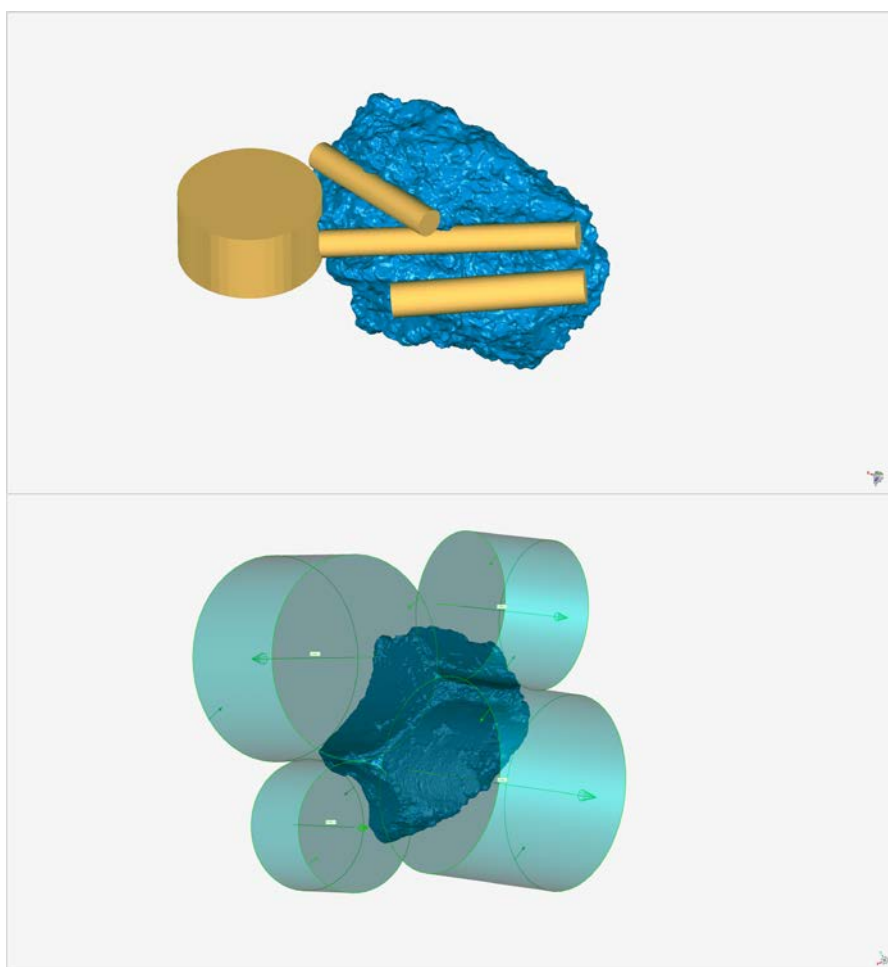
12.9.2 Vznik digitálních otisků

Vybrané otisky na mazanicích byly trojrozměrně naskenovány laserovým skenerem HandyScan VIUScan, bez textury, která nebyla potřeba. Digitální otisky vznikly jednoduchou metodou, označením strany negativního otisku na 3D modelu a vymazáním okolí. Poté byla tato strana překlopena a tím vznikla část pozitivu dřevěné konstrukce i s náznaky kolíčků (obr. 106).



Obr.106 Digitální otisk mazanice pozitiv a negativ.

Na otiscích byla také vyzkoušena metoda proložení prvkem s nejmenší odchylkou. Vnitřní hladká strana otisku byla vybrána a byl s ní většinou proložen válec tak, aby kopíroval povrch otisku s nejmenší odchylkou a dotýkal se jeho stran. Tak vznikla digitální podoba kuláčů a proutí, využitá jako konstrukční prvek (obr. 107). Digitální prvky mají tu výhodu, že přesně vyjadřují skutečný průměr dřevěného pozitivu, i když se z otisku dochovala jen malá zaoblená část.



Obr. 107 Digitální rekonstrukce dřevěných prvků.

12.9.3 Závěr

Testovaná metoda vzniku digitálních otisků nepřinesla zásadnější informace, než které bychom mohli manuálně z mazanic odečíst.

Vizualizace 3D digitálních modelů spíše znesnadnily správné určení typu otisku a nepřinesly velké zlepšení. Jediným přínosem je exaktní odečet průměru dřevěného pozitivu, který se někdy manuálně pouze přibližně určuje. Při rekonstrukci celého otisku podle dat z manuálního odečtu bude tato metoda vizuálně líbivá, ale pro analýzu dat nepřinesla žádné nové informace oproti tradičním metodám.

12.10 Trojrozměrná digitální dokumentace archeologických památek za využití dálkově pilotovaných létajících systémů

V dálkovém průzkumu Země se za poslední roky prosadily nové technologie pro moderní rychlou a přesnou dokumentaci. V dokumentování otevřené krajiny se dálkově řízené prostředky (RPAS) velice osvědčily. Využitím RPAS jen jako nosiče pro snímkování nemovitých památek a jejich 3D digitalizaci metodou SfM je také velice efektivní a přínosné (*Plizák – Kaňka 2016*).

12.10.1 Úvod

O kulturně historické dědictví, které nám bylo zanecháno generacemi našich předků, se musíme v první řadě starat a naši povinností je jeho zachování pro budoucí generace našich potomků. Nemovité památky jsou většinou jako první na očích, a proto vždy přitahovaly naši pozornost od minulosti do současnosti. Výrazně nápadné jsou v krajině památky castellologické, kterou jsou nejvíce navštěvované a umělecky zpodobňované například v rytinách a na pohlednicích už od 18. století. O hrady a zříceniny se vždy lidé zajímali a jako dominanty v krajině je také chránili či alespoň v rámci možností opravovali. Ne všem hradům se ale této péče dostalo a postupem času chátraly a rozpadaly se vlivem počasí či rozebíráním na stavební materiál a kvůli podobným destrukčním aktivitám lidí. Tento proces stále probíhá, i když jsou tyto nemovité památky státem chráněny. K nejmladším zásahům v rámci nenávratných škod dochází například i ve formě neodborné či necitlivé

konzervace a stabilizace zdiva, která někdy napáchá více škody než užitku.

Podrobně dokumentovány jsou většinou ty hrady, kde proběhl v nějaké podobě archeologický výzkum či stavebně historický průzkum. Fotografická, geodetická či kresebná dokumentace zaznamenává současný stav dochování památky, která se v průběhu času mění a to občas k lepšímu, ale spíše většinou k horšímu stavu zachování. Správně zdokumentované památky jsou vhodným archeologickým pramenem pro lepší pochopení a poznání lidské minulosti. Potřeba rychlé a kvalitní dokumentace prostorově a architektonicky složitých objektů je proto stále aktuálním tématem.

Moderní pojetí dokumentace nemovitých památek počítá s trojrozměrným digitálním modelem, který je dle řešené otázky dostatečně přesný a lze z něj vyčíst potřebné informace. Dále je pro kvalitní trojrozměrnou dokumentaci důležité, aby byl 3D digitální model ve stejném měřítku jako jeho fyzická předloha a pokud možno byl zasazený ve vhodném souřadnicovém systému. Přínosnou informací také bývá kvalitní textura 3D modelu. Produkovat 3D model o těchto kvalitách je možné prostřednictvím pozemního trojrozměrného laserového skeneru nebo s využitím fotogrammetrických metod a vhodných nástrojů pro sběr kvalitních vstupních dat ve formě digitálních fotografií.

12.10.2 Současné využívané možnosti dokumentace

Z dob ručně kreslených plánů, map a náčrtů jsme se dnes posunuli k využívání technických přístrojů, které jsou oproti konvenčním metodám záznamu přesnější a rychlejší. Primární terénní data jsou většinou pořizována analogově (papír, tužka) a jsou využívána hlavně pro svoji jednoduchost a konzervativnost. Dále se hodí pro rychlé náčrty digitálně dokumentovaných situací a jsou tedy stále potřebné. Z novějších metod se nejvíce uplatňuje geodetické zaměřování antropogenních reliktních a stavebních konstrukcí - dříve s teodolitem či nivelačním přístrojem, dnes

pomocí elektrooptického tachymetru (totální stanice). Přesným geodetickým zaměřením je možné změřit podrobné digitální modely terénu hradu a jeho zázemí či selektivním zaměřením nejvýznamnějších bodů zhotovit stavební plán ve formě drátěného modelu. Progresivní metodou je stále 3D laserové skenování a to hlavně jako tzv. letecké skenování krajiny (lidar) pro vznik přesných digitálních modelů terénu i krajinných celků v zalesněném prostředí - v případě vhodného filtračního algoritmu i 3D modelů staveb a budov. V neposlední řadě jsou využívány pozemní či letecké fotografie jako prostý záznam stavu památky a v současnosti stále více také jako výpočetní fotografie pro metody fotogrammetrie a vznik 3D modelů terénu či staveb.

12.10.3 Cíle dokumentace

Nejlepší metody dokumentace jsou ty, které v sobě skloubí atributy kvality, efektivnosti, jednoduchosti, časové nenáročnosti a finanční střídmosti. Proto jsme zvolili technologicky nejnovější metodu sběru digitálních dat ve formě fotografií za pomoci RPAS/UAV či UAS (Remotely Piloted Aircraft System dříve Unmanned Aerial Vehicle/System)²³. Systém dálkově řízeného letadla (RPAS) umožňuje velmi rychlý sběr kolmých či šikmých fotografií zvoleného objektu či transektu krajiny s velmi malými provozními náklady a také splňuje všechny potřebné atributy k dosažení nejlepších výsledků dokumentace. Z pořízených digitálních fotografií lze metodou fotogrammetrie vypočítat velmi husté mračno bodů a 3D digitální model památky (srov. *Bendea et al. 2007, Grenzdörffer et al. 2015*). Kombinací těchto dvou metod dokumentace lze dosáhnout velmi kvalitních dat, která v mnoha ohledech předčí tradiční metody dokumentace archeologických památek.

Z důvodů komplexního zhodnocení této metody jsme vybrali dvě odlišné modelové lokality, a to na základě rozdílného stavu dochování, který umožnil aplikaci celé řady přístupů. Zatímco hrad Dražice (okr.

²³ ²³ RPAS je oficiální označení zavedené Mezinárodní organizací pro civilní letectví – ICAO

Mladá Boleslav) je zříceninou oplývající množstvím archeologicky cenných detailů, Litice (okr. Plzeň-Město) se do dnešní doby zachovaly ve stavu terénního reliktu. V případě Dražic byl tedy důraz kladen především na kvalitu detailu celkového zpracování, vyhotoveného pro potřeby stavební dokumentace dochovaného reliktu, zatímco v Liticích byl zhotoven celkový model terénní situace ve formě digitálního modelu povrchu (DMP) hradního jádra, který byl kvalitativně porovnán s výstupem digitálního modelu reliéfu (DMR 5G) z leteckého laserového skenování.

12.10.4 Případová studie hradu Litice (okr. Plzeň-Město)

12.10.4.1 Stručná historie hradu

Osídlení Litic lze sledovat již od pravěku. První kulturou, která si zvolila Litickou ostrožnu jakožto své sídlo, byla eneolitická Chamská skupina, typická svými výšinnými sídlišti (*Sokol 2001, 16*). Archeologické průzkumy pak prokázaly existenci hradiště v době halštatské. V raném středověku pak byly na této lokalitě nalezeny zlomky keramiky, datované do 12. století, tedy mladší doby hradištní, které indikují existenci raně středověkého hradiště. Nálezy zjišťovacího výzkumu provedeného na předhradí současného hradu dokládají osídlení ve všech zmíněných obdobích spolu s nálezy vrcholně středověkými (13. st.) a nejmladší nálezy jsou datovány až do pozdně středověkého 15. století (*Frýda-Soukupová 1975*). Písemné prameny o Litickém hradu jsou poměrně skoupé, dohledat lze pouze několik nepřímých zmínek. Určení stáří hradu na jejich základu by byla pouze čistou spekulací - jeho identifikace v rámci zejména starších pramenů je v rámci případu Litic neuskutečnitelná. Predikát pánů z Litic lze vysledovat k Oldřichovi z Litic, který se tak poprvé psal r. 1193 (*Sedláček 1905, 233*). Existence kamenného hradu v této době je však značně nepravděpodobná, lze předpokládat nějakou formu dřevěné zástavby položenou na pozici původního hradiště (*Durdík 2009, 338*). Zajímavá je i zmínka o společném držení Litic bratry Půtou a Protivou od 40. let 13. století. Podrobnější informace přináší zpráva o dobytí poprvé prokazatelně zmíněného hradu

Janem Lucemburským (1318) a pozdější záznam o prodeji Litic Chotěšovskému klášteru před r. 1367. Z roku 1431 se poté dochoval inventář panství, který již hrad ani jiné opevněné sídlo nezmiňuje, dozvídáme se pouze o existenci dvora (*Sedláček 1905*, 234). Hrad lze tedy již v první třetině 15. století považovat za pustý.

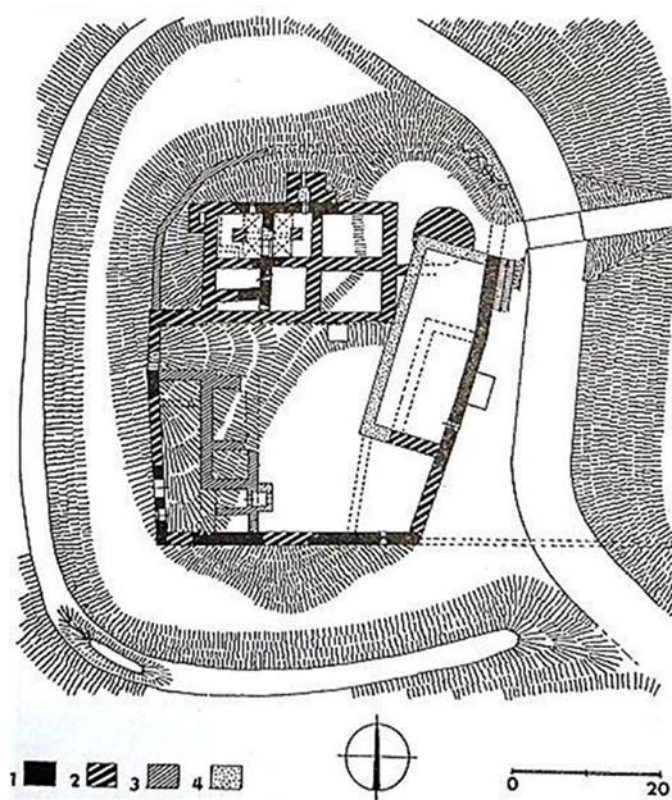
Terénní zaměření reliktvů hradu bylo poprvé publikováno až r. 1996²⁴ a podruhé v r. 2012²⁵. Je z nich patrná dispozice zaniklého hradu, především dvoutraktový palác při severní straně, obvodová hradba zesílená při jižní straně. Jedná se nepochybně o sekundární zesílení zdi ve směru nejzranitelnější části hradní dispozice (přístup po hřebenu ostrožny). Při západní straně nádvoří jsou dodnes patrné pozůstatky volně stojící okrouhlé věže - bergfritu. Na nádvoří jsou poté patrné další lehce zahloubené objekty, dochované ve formě terénních příznaků. Nelze však s jistotou říci, do které fáze výstavby hradu patří a zda jsou vůbec středověkého původu - svědčí o tom i fakt, že některé z nich nejsou zaznamenány v rámci starších snímků a plánů hradu z r. 1996. Na lokalitě se tak lze setkat s několika objekty, které neodpovídají klasickým archeologickým situacím - jedná se tak s největší pravděpodobností o recentní zásahy a vrypy (na lokalitách se často v podobných případech bohužel jedná o výkopy detektorářů či jiné necitlivé zásahy v objektu kulturní památky).

S větší jistotou lze říci, že hradní dispozice se skládala z dvoutraktového paláce v severní části a samostatně stojícího bergfritu v západní části (*Durdík 2009*, 338). Celý objekt byl lichoběžníkovitě obklopen obvodovou hradbou zesílenou v jižní části nepochybně dodatečnou dostavbou (vzhledem k rozdílnému charakteru dochovaného zdiva a jeho přizdění na spáru). Na severní straně se pak nacházejí

²⁴ Novobilský, M. - Rožmberský, P. 2002: *Hrad Litice u Plzně*. Edice Zapomenuté hrady, tvrze a místa 7. Plzeň: Nadace České hrady.

²⁵ Hložek, J. 2012: *Hrad Litice, okr. Plzeň-město, a jeho nové zaměření*. Archeologie západních Čech, 2012, 36-43.

základy věžové brány, vystupující z rámce obvodové hradby a indikující původní vstup do hradního areálu. Za ní se na nádvoří nachází zahluubený objekt, který mohl mít funkci vrátnice. Jádru hradu bylo od zbytku ostrožny odděleno mohutným příkopem, který je z vnější strany lemován rozsáhlým předhradím (obr. 108). Jeho zástavba je neznámá, nedochoval se zde žádný terénní relikt. Na ploše předhradí se nacházel dvůr, který zde existoval i po zániku hradu.



Obr. 108 Litice. Plán celkové situace s vyznačeným středověkým zdivem (černě) a pozdějšími úpravami (šrafovaně). Dle T. Durdíka na základě M. Novobilského a P. Rožmberského.

Typologicky lze Litice zařadit do skupiny hradů tzv. bergfritového typu ve své pokročilé verzi (Durdík 2001, 100), stavěné v průběhu 13. - 14. století. Analogicky hrad snese srovnání s podobně pokročilými Dražicemi či Michalovicemi.

12.10.4.2 Metodiky dálkového a pozemního průzkumu

Hradní areál Litic reprezentuje otevřenou, dobře dostupnou oblast s minimální vegetací, zahrnující konvexní a konkávní antropogenní reliktů. Tento typ památky proto mohl být dokumentován vícero druhů dokumentačních metodik, které poté mohly být mezi sebou porovnávány.

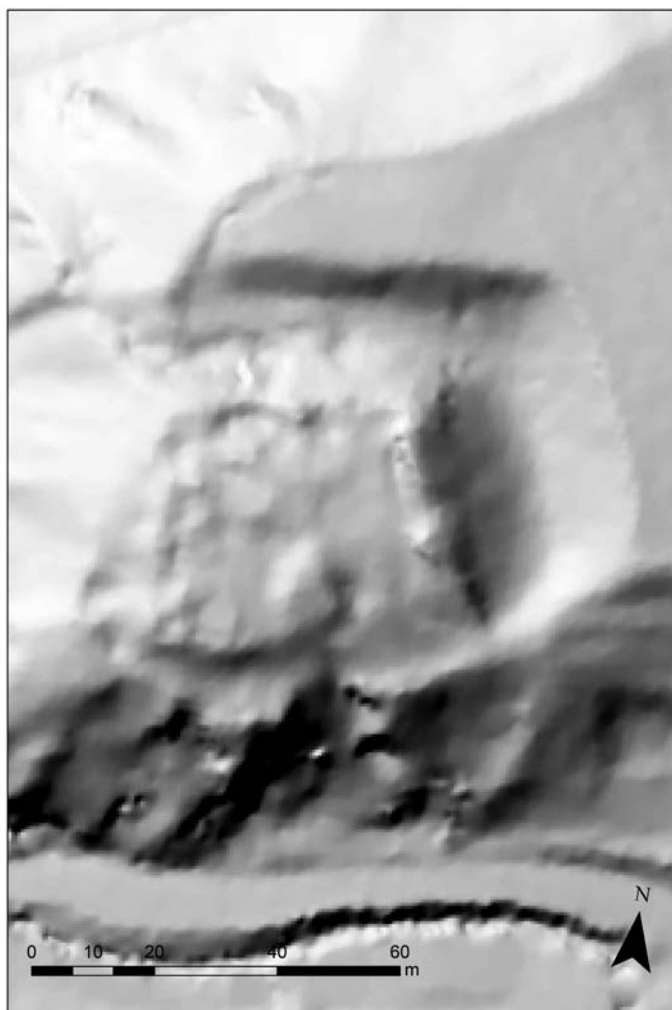
Pro trojrozměrný záznam antropogenních reliktů v hradním areálu byly využity nejmodernější metody. A to jak nové poznatky z fotogrammetrie, tak data z leteckého laserového skenování ČR (dále LLS). Ke srovnání metod dálkového průzkumu s metodami konvenčního nedestruktivního průzkumu přispělo i existující zaměření hradu Litice za pomoci totální stanice. Podklady pro tvorbu modelů v podobě zaměřených bodů byly poskytnuty J. Hložkem z jeho zaměření r. 2012 (*Hložek 2010, 119*).

V zásadě lze v rámci této studie rozlišit dva základní typy 3D modelů. Prvním z nich je digitální model povrchu (dále jen DMP). Tento typ reprezentuje povrch krajiny s veškerou vegetací, která je v modelu zaznamenána. DMP je využíván pro tvorbu modelů vzniklých z fotografií (šikmé a kolmé snímkování dálkových průzkumů metodou fotogrammetrie) a je možné vytvořit jej i v rámci dat získaných ze systému LLS. Druhým typem je pak digitální model reliéfu (dále DMR), který umožňuje proniknout veškerou vegetací a vytvořit povrch antropogenního tvaru reliéfu. Takto vzniklé modely jsou výstupem dat získaných z LLS (v této práci jsou reprezentovány modely DMR 5G, kde jsou body zachycující vegetaci z celkového modelu vyfiltrovány). Stejný 3D digitální model reliéfu je možné získat i za pomoci zaměření antropogenních reliktů a jejich okolí totální stanicí.

12.10.4.3 Letecké laserové skenování krajiny

Zakoupením dvou mapových listů digitálního modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G) od Českého úřadu zeměměřického a katastrálního

(ČUZK) bylo možné vytvořit trojrozměrný model povrchu hradu Litice a tento model poté vizualizovat jako standardní stínový náhled, nebo jako náhled ve formě skyview faktoru. Data byla interpolována metou Natural Neighbor s velikostí základní buňky 0,5 m. (obr. 109) Na získaných vizualizacích lze sledovat tvar ostrožny, obvodový příkop hradu a některé relikty uvnitř hradního jádra. Ze stejných dat byl pro komparaci vytvořen i další model vizuálně sjednocený s ostatními výstupy (viz dále).



Obr. 109: Náhled stínového digitálního modelu reliéfu lokality Litice z dat DMR 5G.

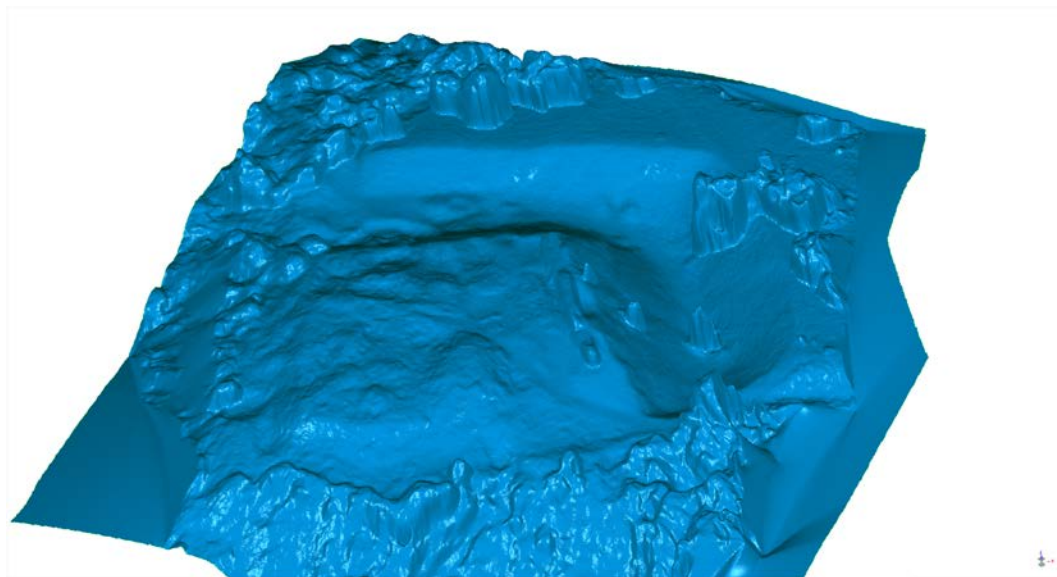
Přestože metoda laserového skenování nalézá, vzhledem k jejímu neoddiskutovatelnému potenciálu ve velikosti dokumentovatelné plochy, uplatnění především v krajinné archeologii a v archeologii nedostupných lokalit, své odůvodnění nalezne tato metoda i v případě dokumentace hradu Litice. V první řadě poskytne náhled zasazení hradního areálu do organismu žijící urbánní zástavby a ve druhé řadě umožní jedinečný pohled na celý hradní komplex včetně předhradí a obvodových příkopů, který je bohužel ostatními metodami dálkového průzkumu nemožný.

12.10.4.4 Tvorba digitálního modelu povrchu pomoci sběru dat s RPAS

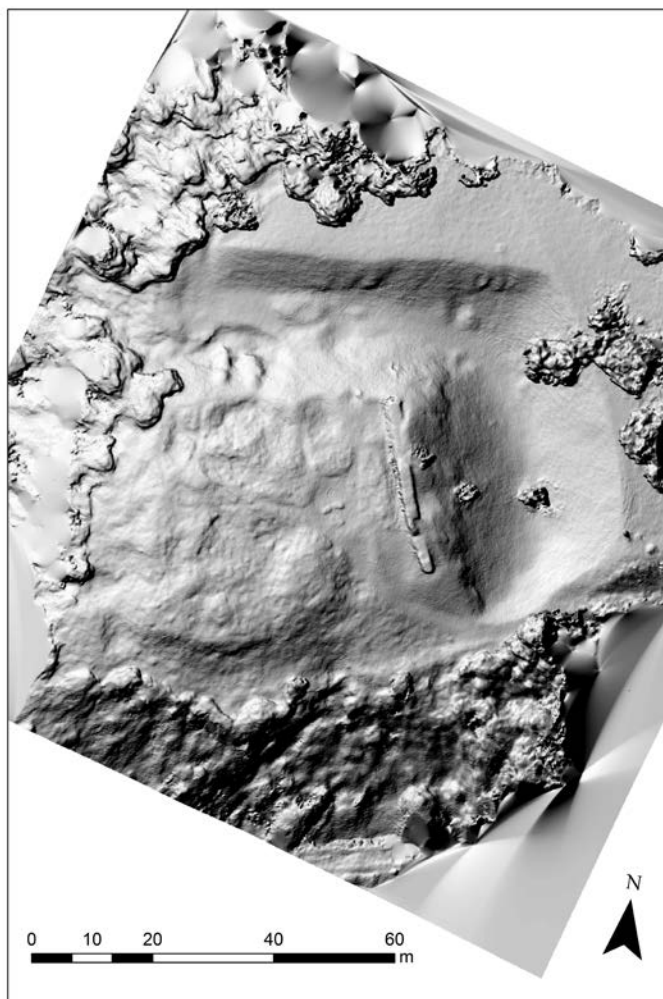
Pořízené kolmé letecké fotografie byly využity k tvorbě přesného 3D digitálního modelu. Při generaci modelu byl aplikován moderní postup fotogrammetrie tzv. Structure from Motion (SfM), který je založen na odhadování trojrozměrné struktury z dvourozměrných snímkových sekvencí, které jsou spjaté s pohybem fotoaparátu. Je tedy nejvíce podobný binokulárnímu lidskému vidění a jeho schopnosti v odhadování vzdáleností a výšek v prostoru (*Tittle - Braunstei 1993*). Presentované 3D modely byly zpracovány v programu PhotoScan Pro ve verzi 1.2 od firmy Agisoft.

K tvorbě DMP hradu Litice bylo použito celkem 132 snímků pořízených z nízko letícího RPAS (při průměrné výšce 30 m nad povrchem terénu). Jako systém dálkově řízeného letadla byl využit DJI F550 se snímkovacím senzorem GoPro Hero 3+. Trojrozměrný model byl georeferencován za pomoci 8 rovnoměrně rozmístěných vlíčovacích bodů v systému S-JTSK Křovák. Všechny snímky byly pořízeny s 80 % překryvem jednotlivých fotografií pro úplnou modelaci, výpočtem z těchto snímků bylo dosaženo rozlišení 0,13 mm/pixel. Model přesně zdokumentoval konkávní a konvexní objekty hradního jádra. (obr. 110,111). Největším úskalím tvorby digitálního trojrozměrného modelu ve formě DMP metodou fotogrammetrie je vegetace. V důsledku přítomných stromů, kosodřevin či jen nerovnoměrně vzrostlé trávy se mohou vytvořit

falešné objekty, které značně zkreslí celkový model. Tento faktor tak značně limituje možnosti tvorby 3D modelů za pomoci kolmých fotografií pořízených RPAS. I z tohoto důvodu byla pozornost projektu věnována pouze hradnímu jádru a obvodovému příkopu, neboť rozsáhlé předhradí je z velké části pokryto stromovým sadem, který značně deformuje reálný stav hodnocené plochy, jak je na modelu patrné.



Obr. 110 Šikmý pohled na 3D model hradního areálu Litice z dat letecké (RPAS) fotogrammetrie.



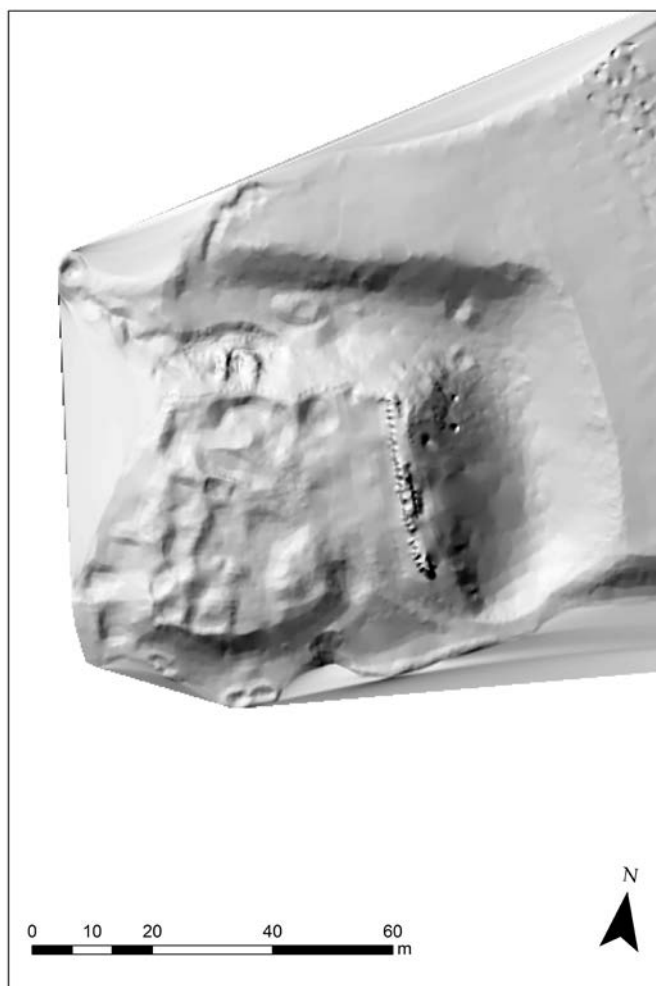
Obr. 111: Náhled stínového digitálního modelu reliéfu lokality Litice z dat letecké (RPAS) fotogrammetrie.

Sběr dat a zaměření vlíčovacích bodů v terénu trvalo 6 hodin. Zpracování dat, výpočet a úprava 3D modelu byly provedeny v průběhu jednoho dne, ale z toho podstatnou část tvoří strojový výpočet hustého mračka bodů, který je závislý na hardwarové specifikaci a výkonu počítače.

12.10.4.5 Tvorba digitálního modelu reliéfu pomocí měření s totální stanicí

V rámci komparace letecké a tradiční prospekce byl vytvořen rovněž model na základě selektivně zvolených bodů zaměřených totální

stanicí (TS). Model byl pro porovnání jejich výpovědního potenciálu vytvořen v různých programech (ArcGIS, Surfer 11). Výsledky těchto měření umožnily zobrazit lokalitu v celkové ploše (hradní jádro s předhradím) díky možnosti odfiltrování vegetace přímo v terénu a měřením i v nepřístupných místech. Geodetické zaměření hradu realizoval kolega J. Hložek v roce 2012. Jeho velmi přesné a kvalitní zaměření reliéfu trvalo cca 14 dnů, během nichž zaměřil celkem 12 845 bodů, které reprezentují významné hrany a plochu reliéfu (obr. 112; *Hložek 2010, 119*).



Obr. 112: Náhled stínového digitálního modelu reliéfu lokality Litice z dat pozemního měření totální stanicí.

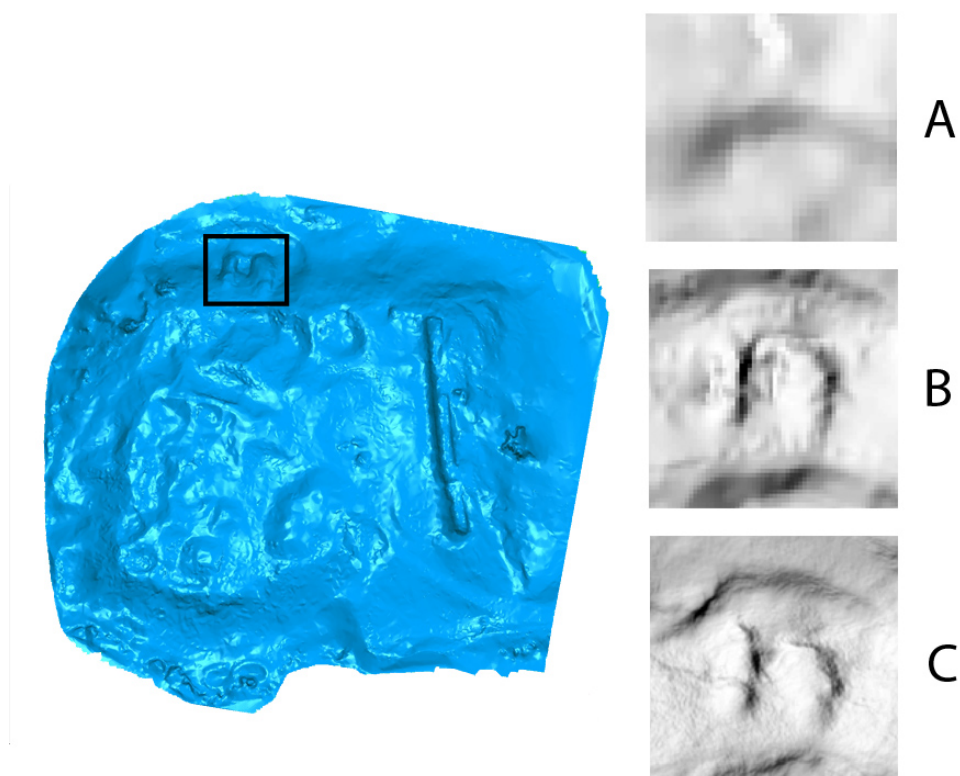
12.10.4.6 Porovnání a rozložení bodů reprezentujících krajinný reliéf

Při zaměření reliéfu krajiny totální stanicí dochází k selektivnímu výběru zaměřených bodů, které si dle zkušeností či možností cíleně vybírá měřič s odrazným hranolem. Obvykle se pro archeologické účely jedná o zaměření spodní a horní hrany reliktních stěn, střed dna, nejvyšší vrchol, aby se složitý morfologický terén zaznamenal ve zjednodušené formě. Oproti tomu LLS a fotogrammetrické metody určují zaměřené body v terénu zcela náhodně a pro přesný popis charakteru reliéfu těchto bodů musí být co nejvíce, aby při výpočtu interpolace nevznikala prázdná či jinak deformovaná místa v digitálním modelu (obr. 113).



Obr. 113: Mračna bodů v jednotlivých typech dat (nahore: DMR 5G, uprostřed: měření totální stanicí, dole: letecká RPAS fotogrammetrie).

V porovnání všech tří výše popisovaných metod tvorby 3D modelů vyšel jakožto nejpodrobnější model vytvořený za pomoci kolmého leteckého snímkování. Model tvořený pomocí dat totální stanice dosahuje totiž průměrného zahuštění 8 bodů/m², LLS pak pouhých 0,6 bodů/m² (hustota bodů se může lišit podle úrovně zaměření/generaci LLS snímkování, nicméně vzhledem k vysokým kvalitám obou měření se v tomto případě jedná v rámci běžné praxe jednoznačně o hodnoty s vysokou kvantitou). Oproti tomu body získané za pomoci kolmých leteckých snímků se mohou vykázt velmi kvalitní hustotou 90 bodů/m² (obr. 114). Navíc by bylo možné po zkombinování pořízených fotografií např. s pozemní fotogrammetrií soustřeďující se na jednotlivé archeologické objekty tuto hustotu ještě navýšit.



Obr. 114: Detail věžovitého objektu (vstupu do hradu) v digitálním modelu hradu Litice a jeho kvality zobrazení dle počtu bodů na m² (A - data DMR 5G 0,6 b/m², B - měření TS 8 b/m², C – letecká RPAS fotogrammetrie 90 b/m²).

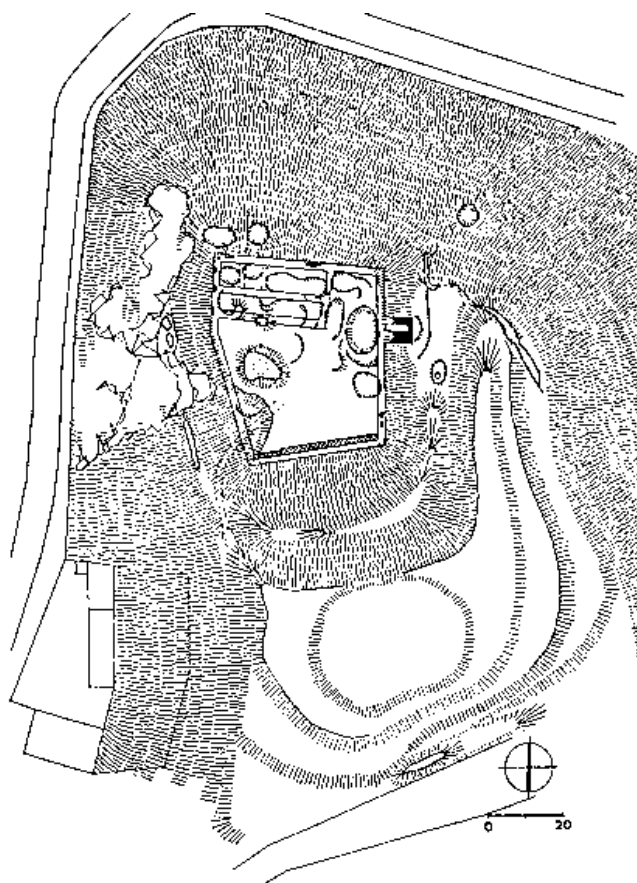
Na vizualizaci LLS (data z DMR 5G) lze sledovat tvar ostrožny, obvodový příkop hradu a některé antropogenní relikty uvnitř hradního jádra. Pro DMP byl vytvořen stejný typ vizualizace a lze na ní spatřit stejné prvky jako na DMR 5G, ale detailněji vykreslené, i když je povrch vypočten i s nízkou trávou. Okolí hradu je skryto pod vegetací hustého křoví. Oproti tomu lze na východní straně hradního jádra lépe pozorovat relikty zdí, který je na DMR 5G zcela odfiltrován. Pro potřeby podrobné interpretace jednotlivých objektů pak lze jejich kvalitu posoudit zobrazením, kde je možné kolmé letecké snímkování z RPAS vyhodnotit jakožto jednoznačně nejpodrobnější a nejefektivnější z hlediska času sběru dat a zpracování.

12.10.5 Případová studie hradu Dražice (okr. Mladá Boleslav)

12.10.5.1 Stručná historie hradu

Zřícenina hradu Dražice se nachází 2 km severovýchodně od Benátek nad Jizerou, okr. Mladá Boleslav. Historie hradu se začala psát někdy před rokem 1264, kdy jsou v pramenech poprvé zmíněny jako *castrum*, (*Menclová 1972a, 137*) tedy pojmem odkazujícím na existenci panského sídla. Prvním majitelem a s největší pravděpodobností i stavebníkem nejstarší hradní fáze byl Řehník z Dražic (*Sedláček 1932, 237*), kterému hrad sloužil jako rodové sídlo. Dědicem hradu se pak stal Jan z Dražic, poslední pražský biskup, pod jehož správou došlo ke dvěma výrazným stavebním úpravám. Hrad později připadl Vartenberkům, v jejichž vlastnictví byl během husitských válek vypálen (*Durdík 2009, 123*). Dominiem dražického panství byl však až do poloviny 16. století, kdy bylo centrum panství přesunuto do nedalekých Benátek nad Jizerou (*Sedláček 1932, 243*). Od té doby je hrad uváděn jako pustý, přesto se ještě do první poloviny 18. století dochovala jeho převážná část. Od té doby však nepochybně neodvratně chátral, o čemž svědčí dnešní stav.

Přesná podoba hradu v jeho nejstarších dvou fázích, prováděných s největší pravděpodobností v krátkodobém časovém horizontu není díky četným přestavbám známa, podle dochovaného zdiva se jednalo pravděpodobně o residenční palácovou stavbu s volně stojící útočištnou věží, což odpovídá konceptu šlechtického hradu tzv. berfritového typu (*Durdík 2002, 179*). Dispozice vrcholné podoby hradu po třetí přestavbě provedené opět Janem z Dražic již nechává svědčit o ryze residenčním charakteru stavby, obsahující dvě palácová křídla s přistavěnou hranolovou věží. Hrad byl rovněž v této době vybaven obvodovou parkánovou hradbou (*Durdík 2009, 124*). Čtvrtou fází proměny areálu je pak novověká přístavba hospodářské budovy k východní obvodové hradbě, jejíž základu je zde využito pro necitlivé zakomponování stavby do areálu hradu (obr. 115).



Obr. 115: Dražice. Plán celkové situace s vyznačením stavebních fází. Dle T. Durdíka.

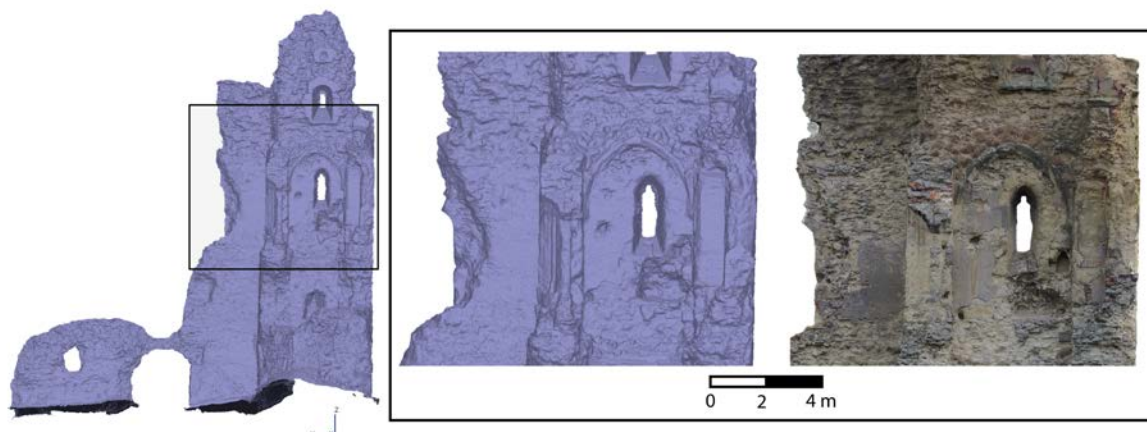
Výše zmíněná první a druhá stavební fáze hradu ve stylu šlechtického bergfritového typu svými kvalitami ani provedením nijak nevybočuje z typické hradní produkce v rámci českého kontextu. Třetí fáze výrazné přestavby (cca 1333-1335) z něj však značně vybočuje díky přizvání francouzských stavebních mistrů pod vedením Viléma z Avignonu, kterého Jan poznal během svého jedenáctiletého pobytu v papežském městě (*Menclová 1972b*, 36). Komplexnost a krásu celého hradu dnes můžeme jen tušit podle jediného dochovaného zbytku paláce s přistavěnou čtverhrannou věží, kde se zachovaly unikátní pozůstatky Janovy zaklenuté kaple (interiér věže) a vnitřního členění paláce (obytné plochostropé prostory s roubenou komorou). Zřícenina dražického hradu tak vykazuje celou řadu francouzskými mistry zhotovených architektonických detailů, zcela unikátních v rámci české hradní architektury. Patří mezi ně samostatné zaklenutí výklenků čtverhranných oken v jižním průčelí paláce, bohatě zdobený portál sloužící jako vstup do kaple či otisky výdřevy roubené komory s pozůstatkem dymníku pro odvod kouře z kamen k vytápění obytné prostory ve druhém patře.

12.10.5.2 Tvorba digitálního trojrozměrného modelu hradu pomocí sběru dat s RPAS

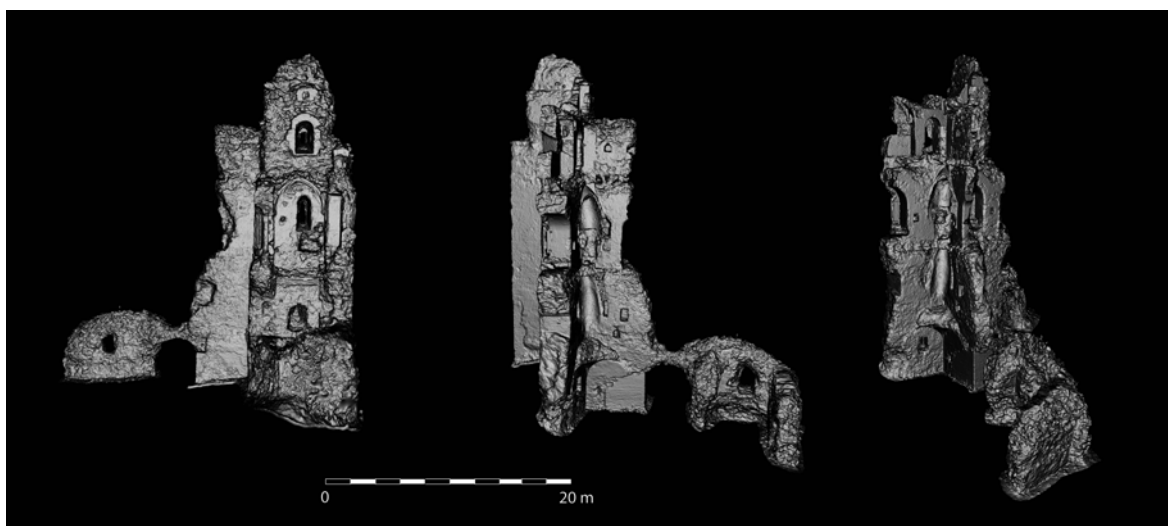
Dokumentace hradu proběhla v létě, kdy byla v okolí hradu vzrostlá vegetace s výskytem listnatých stromů či keřů. Jako systém dálkově řízeného letadla byl využit DJI Phantom 2 Vision Plus. Pro georeferencování 3D modelu bylo na západní stěně hradu geodeticky zaměřeno 7 přirozených vlícovacích bodů a při patě hradu změřeny dvě délky stran kamenů ve zdivu jako referenční měřítko. Vzhledem k méně rozlehlé ploše, vysokému výskytu vegetace a množství konturované architektury byl stejný postup přeletů jako v případě Litic od počátku vyloučen – bylo zde nutno přistoupit k větší adaptabilitě jednotlivých přeletů, které bylo nutno doplnit tradiční pozemní fotogrammetrií.

Architektonické prvky na úrovních několika pater budovy tak determinovaly i systematiku přeletů – ty se tak změnilly z horizontálních na vertikální. RPAS byl naváděn po vertikální dráze tak, aby svou trajektorií kopíroval tvar stojícího reliktu a zachytil tak jeho detaily v rámci šikmého snímkování ze všech dostupných úhlů. Následně došlo k nízkému přeletu ve výšce cca 6-7 m nad objektem, na jehož základě byly vytvořeny kolmé snímky. Pozemní fotogrammetrie byla z důvodu nízké vegetace využita u spodní části hradu do výšky cca 4 m a pro vnitřní část destruované klenuté místnosti v suterénu.

Pro výpočet 3D modelu bylo využito 651 snímků z letecké fotogrammetrie a 442 fotografií z pozemní fotogrammetrie. Při takto velkém počtu dat byl výpočet rozdělen na tři části a poté byla vzniklá mračna bodů složena dohromady. Konečný výsledek obsahoval 91 milionů bodů. Při takto hustém snímkování z malé vzdálenosti dosahoval překryv jednotlivých snímků až 85 % a celkové rozlišení 3D modelu je 3,5mm/pixel. Pro takto velké rozlišení je možné generovat i ortofoto textury ve vysokém rozlišení, na kterých jsou zřetelné jednotlivé spáry zdiva či jiné stavební rozdíly, i když jsou v jedné rovině (obr. 116). Dále je možné kvalitně rozeznat jednotlivé cihly, kameny, úseky omítky a části kamenného ostění (obr. 117). Trojrozměrný model hradu je díky zaměřeným vlíčovacím bodům zasazen do souřadnicového systému S-JTSK Křovák a jeho výškopisný model je možno dále využívat v geoinformačních systémech či model kombinovat s daty DMR z leteckého laserového skenování, kde jsou všechny stavby odfiltrovány.



Obr. 116: Trojrozměrný model hradu Dražice s detailem zdiva a jeho textury.



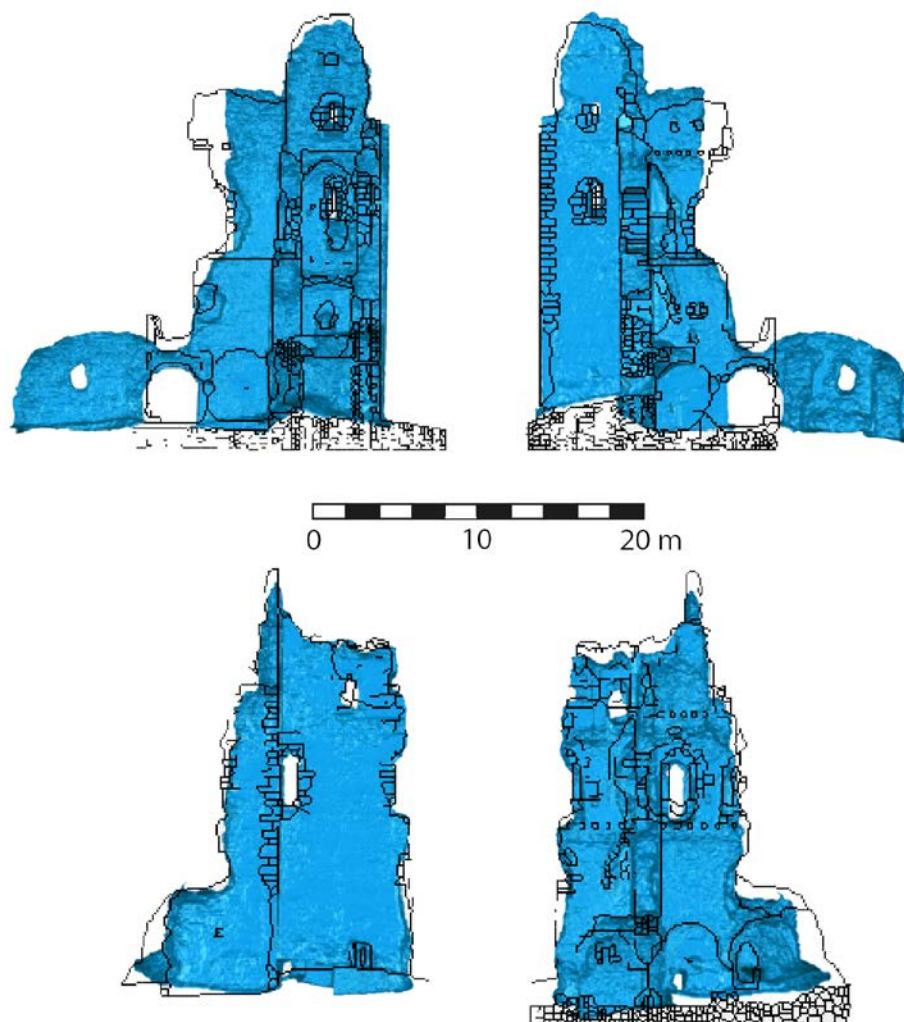
Obr. 117: Vizualizace 3D modelu hradu Dražice.

Sběr dat a zaměření vlíčovacích bodů v terénu trvalo 1 den. Zpracování dat, výpočet a úprava 3D modelu proběhly v průběhu dalších tří dnů, ale z toho podstatnou část tvoří strojový výpočet hustého mračna bodů, který je závislý na hardwarové specifikaci a výkonu počítače.

12.10.6 Potenciál 3D modelu pro potřeby dokumentace architektury

V rámci posouzení kvality výsledného modelu pro potřeby stavebně-historického průzkumu (SHP) byl použit pouze model Dražic, u

nichž byl takový průzkum proveden a posloužil tak pro srovnání dosažených výsledků (obr. 118).



Obr. 118: Porovnání kresebné dokumentace hradu Dražice (vektORIZOVÁNO NA ZÁKLADĚ dokumentace D. Menclové) s georeferencovaným 3D modelem lokality. Nahoře zleva: pohledy od východu a západu, dole zleva: pohledy od jihu a severu.

Porovnání modelů s kresebnou dokumentací přineslo několik pozoruhodných výsledků. Prvním z nich je možnost pozorování archeologických transformací, které proběhly na hradě v rozestupu bezmála 50 let, jež od sebe obě zobrazení dělí. Obzvláště při pohledech z východu a západu je možno pozorovat značný úbytek zdiva v oblasti 3.

patra a ve spodní části klenutého vstupu do paláce. Podobný úbytek lze pozorovat i při jižním a severním pohledu na suterén věžové kaple.

Dalším zjištěním je i výhoda využití RPAS v obtížně dokumentovatelných situacích. V porovnání obou dokumentací při pohledu ze všech úhlů je zřejmé, že v oblasti měřicky přístupného suterénu a prvního patra nedochází k téměř žádným odchylkám. V nepřístupných pozicích je však situace zcela odlišná – při SHP vznikají měřické chyby, vzniklé pozorováním situace ze zkreslené perspektivy. Nejvíce patrná je tato situace ze západního pohledu, kde dochází k posunutí oken věže a k úbytku zdiva věže i paláce ve 3. patře. Podobná situace s celkovým zkreslením 3. patra je patrná i na pohledu ze severu. Na východním pohledu pak dokonce dochází k celkovému náklonu zaznamenané situace. I z tohoto důvodu je nutno při výše uvedeném sledování archeologických transformací přihlídnout k možnosti zkreslení a podrobit ho kritice ve formě důsledného sledování návaznosti jednotlivých architektonických prvků na obou typech dokumentace, aby nedošlo k záměně transformace s prostorovým zkreslením kresebné dokumentace.

Dalším zjištěním byla chyba v celkovém měřítku, zaznamenaném v původní kresebné dokumentaci. To bylo při tvorbě výstupu použito pro orientační porovnání sjednocení relativní velikosti obou modelů, přičemž byla tato nepřesnost odhalena. Původní měřítko se ukázalo jako značně předimenzované, a to, při porovnání s měřítkem totální stanicí georeferencovaného 3D modelu, téměř dvojnásobně.

12.10.7 Závěr

Kombinací metody fotogrammetrie se snímkováním z RPAS se dosahuje ve velmi krátké době velmi kvalitních výsledků. Vzniklé 3D modely jsou značně detailní a je možné je využívat pro další vědecké analýzy. Dokonale splňují očekávání pro využití, jak k výchozí

dokumentaci ohrožených památek, tak pro mapování nezalesněných krajinných celků.

Vzniklý 3D model hradního areálu Litic je kvalitativně lepší a v některých ohledech přesnější než DMR 5G z LLS a než měřený DMR totální stanicí. Nevýhodou je, že jsou antropogenní relikty pod vegetací skryty a nejsou dokonale zmapovány, tak jako v ostatních digitálních modelech. Velkou výhodou lze ale spatřit ve velmi rychlém sběru dat a v detailním zmapování všech viditelných reliktních. Příkladem může být reliktní zdiva ve východní části hradního jádra, který je na DMR 5G zcela odfiltrován kvůli zvolené metodice zpracování dat od ČÚZK. Kombinací snímání RPAS s fotogrammetrií a geodetickým zaměřováním reliéfu bude možné kvality obou metod spojit, a to především časovou nenáročností, přesné a detailní vykreslení reliktních a zaměření reliktních pod vegetací.

Pro rozpadající se hrad Dražice je tvorba komplexního 3D digitálního modelu jedinou možností, jak tento typ památky zachovat ve stavu, který se nám dochoval. Vlivem počasí budeme určitě časem svědkem další destrukce hradních zdí. Nová 3D dokumentace také dokázala opravit nepřesnosti v měření ze stavebně historického průzkumu ze 70. let 20. století. Porovnáním obou dokumentací mohla být vymezena destrukce a úbytek materiálu. Trojrozměrný model hradu bude mít další uplatnění i ve fázi 3D tisku hradu pro edukační činnost. Otázkou ovšem zůstává, jak tento typ 3D informace uložit, archivovat, v jaké formě uchovat metadata a jaká instituce bude toto vše spravovat tak, aby byl tento typ dokumentace dostupný ve stejné formě i za 50 let.

Přesná dokumentace archeologických památek slouží především k jejich ochraně a zachování pro budoucí generace. Zaznamenání jejich současného stavu nedestruktivními metodami umožňuje také zodpovědět odborné otázky původního vzhledu a využití památek, vnitřního a vnějšího dispozičního členění, obranných funkcí, zásobovacích systémů atd. Dokumentace nemovitých památek a jejich okolního terénu může také

posloužit jako základní vrstva pro hmotové rekonstrukce. Přesnými 3D daty jsme oproti dosavadnímu poznání získali lepší přehled o pozvolné destrukci Dražic. Data by mohla posloužit jako podklad pro stabilizaci zdiva a architektonických prvků.

Metodika dokumentace pomocí RPAS je poměrně mladým a stále se rozvíjejícím oborem, hledajícím svá uplatnění. Výše zmíněný příspěvek nabízí pouze některá z nich, navržená pro dokumentaci hradních areálů, která by však po mírné modifikaci mohla sloužit i k dokumentaci jiných typů památek v rámci archeologického poznání a památkové péče.

12.11 Zpracování dat z leteckého laserového skenování zalesněné krajiny

Zkrácený text primárně vychází z části autorského publikovaného článku v monografii *Archeologie a letecké laserové skenování krajiny (Holata – Plzák 2013, Holata – Plzák 2016)*. Letecké laserové skenování krajiny je dynamicky se rozvíjející odvětví, kam patří i pozemní laserové skenování. Každá tato součást řeší trochu jiné otázky a technické problematiky při skenování, i když jsou si velice podobné. Vzniklá mračna bodů se proto zpracovávají odlišnou metodou, která je z pohledu 3D prostředí velice zajímavá.

12.11.1 Úvod

Pro kvalitnější produkci nového výškopisu ČR byla v roce 2008 zvolena metoda leteckého laserového skenování celého území republiky. Na tomto velkém projektu pod názvem Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky současně spolupracuje Zeměměřický úřad, Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad a 24. základna dopravního letectva MO ČR. Realizace projektu spadá do období let 2009 – 2015, přičemž sběr dat je určen do konce roku 2012. Po etapách

zpracování dat LLS vznikají finální produkty pod zkratkami DMR 4G, DMR 5G a DMP 1G, jejichž charakteristiky a postupy vytváření budou představeny v následujícím textu. Potřebné technicko-metodické informace byly převzaty z publikovaných technických zpráv k digitálním modelům reliéfu 4. a 5. generace (*Brázdil 2012a, Brázdil 2012b*).

První zpracovaný výstup reprezentuje Digitální model reliéfu území České republiky 4. generace (DMR 4G), jež je tvořen pravidelnou sítí bodů (Grid) s rozestupy 5 x 5 m. Jedná se o výsledek předběžného automatizovaného zpracování lidarových dat, úplná střední chyba výšky dosahuje 0,3 m v odkrytém terénu a dokonce 1 m v zalesněném terénu. DMR 4G vzniká vždy nejpozději do půl roku po naskenování území. Termín dokončení celého území ČR byl naplánován na konec roku 2012.

Druhým plánovaným produktem je Digitální model reliéfu území České republiky 5. generace (DMR 5G) ve formě nepravidelné sítě výškových bodů s úplnou střední chybou výšky 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v zalesněném terénu. Tento model je výsledkem finálního poloautomatického zpracování lidarových dat. Termín dokončení je naplánován na konec roku 2015, přičemž s určitým časovým odstupem se průběžně aktualizuje stav dokončených DMR 5G.

Poslední produkt představuje Digitální model povrchu území České republiky 1. generace (DMP 1G) poskytovaný ve formě nepravidelné sítě výškových bodů s úplnou střední chybou výšky 0,4 m pro přesně vymezené objekty (budovy) a 0,7 m pro objekty přesně neohrazené (lesy a další prvky vegetačního krytu). Termín dokončení je plánován na konec roku 2015.

12.11.2 Dostupnost dat leteckého laserového skenování – evropský přehled

Moderní mapování krajiny prostřednictvím LLS je v Evropě dnes již značně rozšířené. Data z některých projektů státního mapování jsou i

volně dostupná (bez jakýchkoliv poplatků), což je velice cenné nejen pro archeologický výzkum. Portály, kde jsou data poskytována, jsou však bohužel skoro vždy provozovány jen v mateřském jazyce určitého státu. Kvalita dat LLS se přitom značně liší, stejně jako jejich formát, v jakém je lze získat. Uplatnění LLS většinou iniciovala potřeba přesného geodetického mapování, povodňové či ekologické ochrany, environmentální činnosti atd. Archeologické využití je závislé na kvalitě dostupných dat, jejich technických parametrech a charakteru sledovaných objektů. Poskytovaná data LLS nejsou primárně navržena pro potřeby archeologů.

Zde podávám stručný přehled nabízených dat LLS v některých zemích Evropy, který poskytuje základní představu o jejich podobě, kvalitě a dostupnosti a zájemcům umožní jejich snazší dohledání či získání:

Polsko²⁶

Realizace projektu *Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami* (ISOK) byla plánovaná na roky 2011-2015. V jeho rámci vznikly DMR a DMP na ploše 289 000 km² (92 % území). Území je rozděleno na 3 pásma podle hustoty bodů (Standard I=4 b/m², Standard II=6 b/m² a Standard III=12 b/m²). Standard I s výškovou přesností 0,15 m a polohopisnou chybou 0,5 m pokrývá většinu území, Standard II s výškovou přesností 0,10 m a polohopisnou chybou 0,4 m jen jeho menší část a nejpřesnější Standard III je určen pro městské oblasti. Data jsou zpoplatněna a dostupná v *Centrálním dokumentačním středisku geodézie a kartografie* (CODKiG). Zakoupená data jsou poskytována i ve formátu .las, jsou klasifikována do jednotlivých skupin, nebo také jako DMR či DMP ve tvaru interpolovaného DEM o velikosti buňky 1 m (pro

²⁶<http://www.gugik.gov.pl/geodezja-i-kartografia/projekty/isok/produkty>;

Objednání dat: <http://www.codgik.gov.pl/index.php/zasob/numeryczne-dane-wysokosciowe.html>

DMP i varianta velikosti buňky 0,5 m) ve formátu .asc či .xyz a lokálním souřadnicovém systému PL-1992.

Slovensko²⁷

Nedávno zde proběhly dva dílčí projekty zaměřené na LLS lesního porostu. První se nazývá *Inovatívne metódy inventarizácie a monitoringu lužných lesov Dunaja* (INMEIN) a druhým, větším projektem je *Monitoring a výskum lesných ekosystémov*. Data zatím nejsou volně k dispozici a musí se o ně žádat přes *Národné lesnícke centrum* (NLC). Koncem roku 2016 má být však naskenované celé území Slovenska.

Maďarsko

Celostátní projekt dokumentace krajiny prostřednictvím LLS v Maďarsku neexistuje. Dohledat je možné pouze lokální projekty jako jsou například AIMWETLAB (*Aerial Imaging of the Wetlands of Lake Balaton and the Kis-Balaton*) a ARMSRACE (*Archaeological and Relief Modeling of the Sárvíz-valley for Reconstruction of Ancient Climate Events*). V prvním projektu bylo skenováno pobřeží jezera Balaton a jeho okolí (82 km²) s rozlišením 1 b/m² s výškovou přesností 0,1 m a polohopisnou chybou 0,15 m.

Slovinsko²⁸

Lidarová data jsou dostupná na mapovém portálu Atlas životního prostředí. Dlaždice o velikosti 1 km² je možné stáhnout ve dvou souřadnicových systémech: D48GK a D96TM. Poskytovány jsou jako jednotlivé body se souřadnicemi v textovém formátu .asc nebo také jako klasifikované mračno bodů v komprimovaném formátu .zlas. Hustota dat činí na územích s potenciálními sesuvy půdy či záplavových oblastech

²⁷ <http://www.inmein.nlcsk.sk/sk/index.php>; <http://www.forestportal.sk/projekt-monitoring/Stranky/zakladne-informacie.aspx>

²⁸ http://gis.arso.gov.si/evode/profile.aspx?id=atlas_voda_Lidar@Arso

okolo 10 b/m², v odlehlejších oblastech jen 2 b/m² s průměrnou výškovou přesností 8 cm a průměrnou polohopisnou chybou 11 cm.

Rakousko²⁹

Každá spolková země Rakouska má svůj vlastní mapový portál, kde je možné prohlížet data LLS, která jsou zpoplatněna. Výškopisný model celého Rakouska, který vychází z dat LLS, je možné stáhnout jako geotiff o rozlišení buňky 10 m x 10 m (datová velikost 3,3 GB). Hustota dat LLS pro území Štýrska činí 4 b/m² do 2000 m n. m. a od 2000 m n. m. jen 2 b/m² s výškovou přesností 15 cm a polohopisnou chybou 40 cm.

Švýcarsko³⁰

DMR je cyklicky po 6 letech obnovován. Data jsou zpoplatněna. DMR je poskytován v rozlišení 2 m, 5 m nebo 10 m v několika formátech (Geotiff, ESRI grid či souřadnice x, y, z v textovém .asc formátu). Je možné vybrat souřadnicový systém LV03 LN02 nebo LV95 LN02. Data výškopisného modelu jsou vypočítaná jak ze stereofotogrammetrie, tak z LLS. To je deklarováno do 2000 m n. m. s přesností 0,5 m. Přesnost DSM v otevřeném terénu je 0,5 m a v terénu s vegetací 1,5 m. Hustota bodů je okolo 1 bodu na 2 m².

Španělsko³¹

²⁹ Tyrolsko – <https://portal.tirol.gv.at/LBAWeb/luftbilduebersicht.show>; Štýrsko – <http://gis2.stmk.gv.at/atlas/init.aspx?karte=gel&ks=das&cms=da&massstab=800000>; DMT 10 m celé <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/dgm/resource/b347b029-3fd5-448a-8c2c-07f483c2c56e>.

³⁰ https://shop.swisstopo.admin.ch/en/products/height_models/alti3D.

³¹ <http://pnoa.ign.es/coberturalidar>;
<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscador.do>; katalog:
<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do#selectedSerie>; náhled dat:
<http://www.ign.es/iberpix2/visor/>.

V rámci projektu *Plan Nacional de Ortofografía Aérea* (PNOA) pro produkci nové ortofotomapy celého Španělska bylo mezi lety 2008 a 2012 provedeno i LLS. Data jsou dostupná na portálu *Centro de Descarga del IGN* (CNIG) po listech o velikosti 2 x 2 km v komprimovaném formátu .laz. Hustota bodů je 0,5 b/m² s výškovou přesností menší než 20 cm a polohopisnou chybou menší než 30 cm. Data LLS jsou klasifikována a rozdělena do několika tříd. Primárně jsou určena pro tvorbu digitální modely terénu a ploch, také pro studie záplavových oblastí, automatickou detekci nových budov či výpočet koeficientu pastvin.

Francie³²

Pod národním programem *Litto3D* zde vzniká DEM pobřežních oblastí pořízený LLS (vymezen je hloubkou 10 m či maximální vzdáleností 6 mil od pobřeží a zasahuje alespoň 2 km do vnitrozemí či nadmořské výšky 10 m). Celkově by mělo být naskenováno 45 000 km². Hustota bodů hloubkového vodního měření je minimálně 0,5 b/m² s výškovou přesností 0,5 m a polohopisnou chybou 2,8 m, pro skenování zemského povrchu je úroveň hustoty bodů minimálně 1 b/m² s výškovou přesností 0,2 m a polohopisnou chybou 0,6 m. Data jsou volně ke stažení. Poskytována jsou v souřadnicovém systému WGS84 a ve formátu interpolovaného DEM (.grd, .bag, .asc). Data obsahují v záporných číslech i mořské dno.

Nizozemí³³

Skoro pro polovinu území Nizozemska jsou volně dostupná výškopisná data z LLS, která spravuje organizace *Publieke Dienstverlening Op de Kaart* (PDOK) pod názvem AHN (aktuální výška Nizozemska). Data pořizovaná od roku 2007 jsou primárně určena pro

³² <http://diffusion.shom.fr/produits/altimetrie-littorale.html>; náhled a poskytnutí dat: <http://data.shom.fr>

³³ <https://www.pdok.nl/nl/ahn3-downloads>.

vodohospodářství a protipovodňovou ochranu. Technická specifikace dat se postupem času měnila. Poslední data z LLS mají průměrnou hustotu 10 b/m², minimální hustota je přitom 7 b/m² s výškovou přesností 5 cm a polohopisnou chybou 10 cm. Na webovém portálu je možné stáhnout listy o různé velikosti v několika formátech. Lze stáhnout DMR či DMP ve formátu .tif s velikostí buňky 0,5 m nebo 5 m v lokálním souřadnicovém systému Amersfoort RD New, které jsou interpolovány metodou IDW. Také je možné získat nefiltrovaná data v komprimovaném formátu .laz.

Dánsko³⁴

Dánský výškopisný model z dat LLS vznikl v letech 2005 až 2007 a je pod správou *Danish National Survey* (KMS). Po přihlášení je na webovém portálu možné stáhnout několik variant DEM po listech o velikosti 10 x 10 km. Získat lze interpolovaný DMR o velikosti buňky 1,6 m či 10 m ve formátu .asc v souřadnicovém systému UTM32N. Stáhnout je možné také klasifikovaná data ve formátu .las. Průměrná hustota bodů je 0,45 b/m² s výškovou přesností 10 cm a polohopisnou chybou od 0,55 do 0,82 m. V roce 2014 až 2015 byla pořizována nová data s lepšími parametry (průměrně 4 až 5 b/m², výšková přesnost 5 cm, polohopisná chyba 15cm).

Finsko³⁵

Data jsou poskytována institucí *National Land Survey of Finland* (NLS) a produkována ve spolupráci s *Finnish Forest Center* od roku 2010. Poskytována jsou v komprimovaném formátu .laz v lokálním souřadnicovém systému ETRS-TM35FIN. Volně lze získat vybrané listy o

³⁴http://download.kortforsyningen.dk/content/geodataprodukter?field_korttype_tid_1=440; Ukázka nových dat: <http://labs.septima.dk/dhm14/map.html#11/55.6650/11.0183>.

³⁵ <https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta?lang=en>

velikosti 3 x 3 km. Minimální hustota činí 0,5 b/m², s výškovou přesností 15 cm a polohopisnou chybou 60 cm. Data jsou klasifikována a obsahují ve formátu LAS 2.0 několik tříd bodů (např. povrch, nízkou vegetaci, vodu, atd.)

12.11.3 Metody filtrování a klasifikování dat

Jeden z klíčových kroků v procesu záznamu a optimalizace zobrazení digitálních modelů představují metody filtrace. K úspěšnému vyhodnocení mikroreliefu je třeba vhodný výběr procedur; tento krok zpracování značně rozhoduje o kvalitě zachování detailů reliéfu v digitálním modelu dat.

LLS registruje dle specifikace metody skenování několik milionů až miliard odrazů. Mračno bodů obsahuje i vícenásobné odrazy a pro zpracování konkrétních typů dat je zapotřebí vymežit vhodné body odrazu, které náležejí do stejné skupiny. K vyčlenění DMR je nutné vybrat jen ty body, které byly odraženy od úrovně terénu. V mračně bodů se rovněž vyskytují odrazy od vegetace, přičemž i poslední odraz nemusí být uskutečněn od reliéfu, ale právě od poslední větve stromu či keře.

Vyčleněním a zpracováním zvolené skupiny dat z LLS se zabývají metody filtrace či klasifikace. Obě metody zpracování si jsou podobné a v odborné literatuře jsou popsány jako odstranění nechtěných dat nebo jako modelování dat pro vytvoření specifického modelu (*Axelsson 1999, 138-139*). Mohou být také popsány jako vyhledávání správných měření nebo odstranění hrubých chyb (*Pfeifer a kol. 2001*). Filtrování dat většinou chápeme jako odstranění nežádoucích odrazů a nalezení správných odrazů od reliéfu. Naproti tomu klasifikací dat rozumíme rozčlenění dat do několika samostatných skupin (budovy, stromy, terén atd.).

Extrakce vybraných dat je vždy velmi nesnadná metoda zpracování, která většinou bývá automatická či poloautomatická, jelikož manuální zpracování velkého úseku dat je časově příliš náročné. Filtrování dat probíhá dle daného matematického algoritmu, jenž dokáže nalézt body definující povrch. Různé filtrační algoritmy fungují na odlišných

matematických principech, a proto ne vždy dochází ke shodným výsledkům. Každý algoritmus pro konkrétní typ dat z LLS má své výhody i nevýhody. Výčet všech známých filtračních algoritmů a popis jejich principů by přesahoval rámec tohoto příspěvku (srov. např. *Kraus – Pfeifer 1998; Vosselman 2000; Sithole 2001, Sohn – Dowman 2002; Zhang a kol. 2003; Silván-Cárdenas – Wang 2006; Chen a kol. 2007; Kobler a kol. 2007; Li a kol. 2010; Sulaiman a kol. 2010*). Častěji užívané algoritmy jsou např. morfologický filtr, robustní interpolace, koncept blokovaného minima, koncept parametrizovaného povrchu atd. (*Sithole – Vosselman 2004, 87*).

12.11.4 Komparace metod filtrace dat

Z důvodů nevhodnosti DMR 4G pro archeologické účely a prozatímní nedostupnosti DMR 5G pro celé území ČR jsme se pokusili otestovat, zda lze aplikací vlastních filtračních postupů dospět ke kvalitním mapovým podkladům, které by byly využitelné v archeologickém poznání krajiny a odhalení málo patrných reliéfních struktur. Kvalitu vlastních DMR budeme porovnávat s oficiálními produkty 4. a 5. generace. Tento experiment by měl tedy zhodnotit potenciál filtračních algoritmů a představit možný směr vlastního bádání nad daty z LLS.

Jelikož úzce specializované lidarové softwary bývají zpoplatněny, byly pro zpracování dat zvoleny jiné dostupné nástroje. K zobrazování dat byla využita nejnovější verze ArcGIS 10.1, která nativně podporuje surová data ve formátu *.las* a umožňuje s daty jednoduché operace. K filtrování dat byly vyzkoušeny open source programy MCC (Multiscale Curvature Classification), BCAL (Boise Center Aerospace Laboratory), ALDPAT (Airborne Lidar Data Processing and Analysis Tools) a efektivní softwarový balíček pro práci s daty LAStools. Použité filtrační algoritmy v MCC a BCAL programech jsou vyvíjeny pro výzkum biomasy. Specializují se na úlohy, kterými jsou například zjišťování výšek stromů, plochy listnatění a charakteristiku korun stromů. Řešením otázek spojených s vegetací dokážou tyto algoritmy rozlišit i odrazy od úrovně terénu a pracovat s nimi.

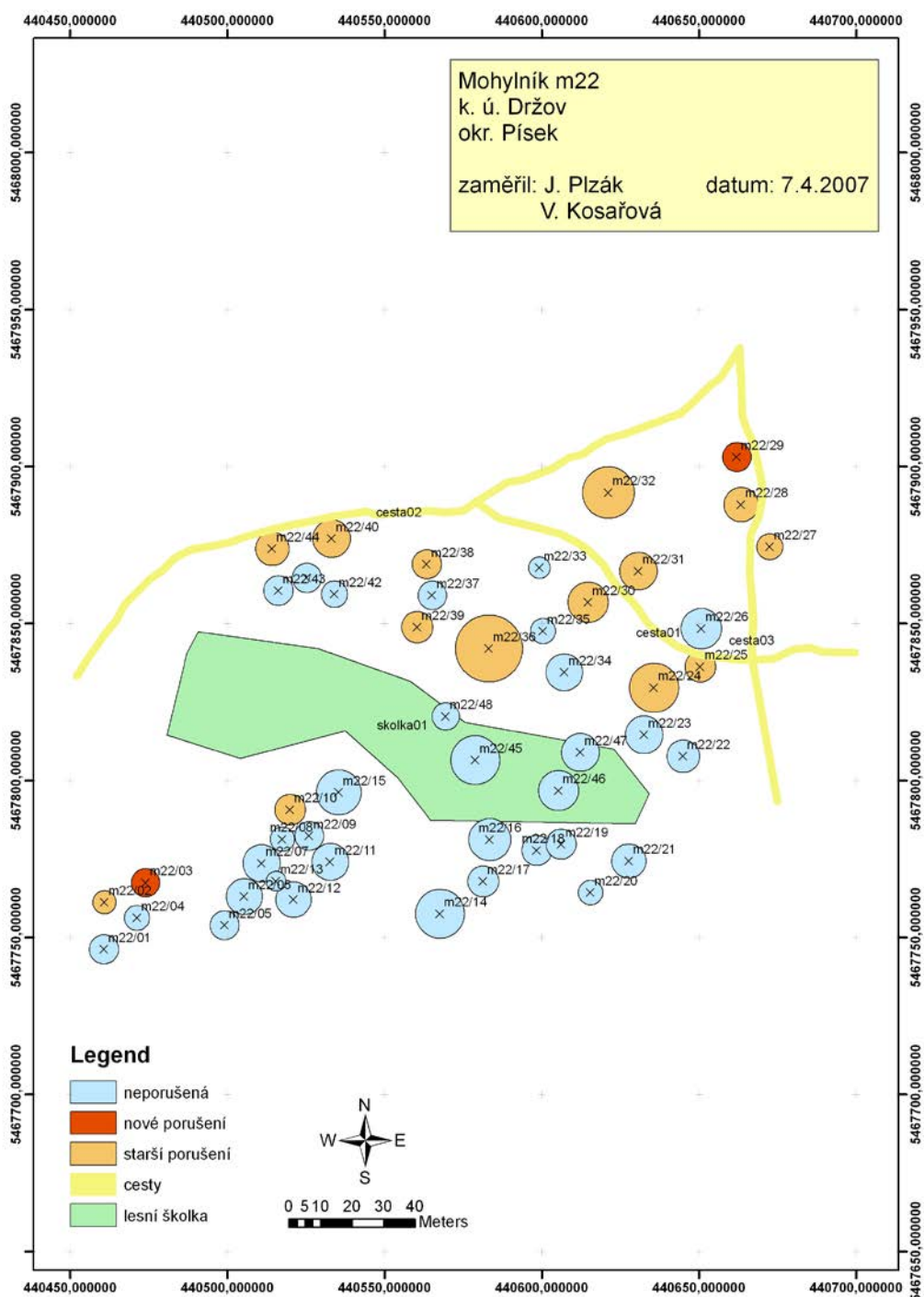
Oba filtrační algoritmy byly vyvíjeny pro jiný typ vstupních dat a každý pracuje na jiném principu. MCC je určen pro klasifikaci vysokých lesních ekosystémů a BCAL je navržen pro nízký stepní ekosystém. Hlavní rozdíl obou algoritmů tkví v postupu práce s daty. Zpracování mračna bodu probíhá v MCC od shora dolů, zatímco BCAL pracuje zezdola nahoru (*Tinkham a kol. 2011, 640*). Nástroj ALDPAT byl využit jen pro některé filtrační algoritmy. Program LAStools obsahuje veškeré potřebné úkony s lidarovými daty, využit byl pro klasifikování bez využití filtrace dat. Během doby vzniku LLS se vyvíjejí stále nové filtrační metody, které jsou s ostatními testovány a doporučovány na různé typy dat (*Hasselquis a kol. 2011; Isenburg a kol. 2006*).

12.11.5 Filtrace surových dat na území mohylového pohřebiště na k.ú. Držov (okr. Písek)

K otestování filtračních algoritmů bylo zvoleno takové území, které obsahuje velikostně heterogenní antropogenní tvary reliéfu v zalesněném prostředí, které se navíc výrazně profilují oproti okolnímu terénu. Tímto dokáže reprezentovat archeologickou situaci s maximální náročností zpracování filtračních algoritmů. Zároveň byl v tomto území proveden povrchový průzkum, jímž byly zaznamenány rozměry a rozmístění antropogenních reliktnů, což vytváří optimální podmínky pro vzájemnou konfrontaci zaznamenaných skutečností.

Pro tyto účely bylo zvoleno území zahrnující mohylové pohřebiště na k. ú. Držov v okrese Písek, které bylo podrobně zmapováno v roce 2007, přičemž zde bylo provedeno i zhodnocení současného stavu dochování mohylových naspů (srov. *Plzák 2008*; obr. 119). Tento mohylník, jenž je datován do střední doby bronzové (*Fröhlich 1997, 28*) se nalézá na plošině a mírném svahu ve vzrostlém jehličnatém lese. V JZ části mohylníku se vyskytuje větší lesní školka tvořená nízkým porostem s vysokou trávou. Na lokalitě bylo v roce 2007 zaznamenáno 47 viditelných mohyl, jejichž středy byly zaměřeny stanicí GPS a následně

byly pro každou z nich zjištěny rozměry. Ty se na lokalitě pohybují od malých, těžko rozeznatelných náspů s průměrem kolem 8 m a výšce 20 cm nad terénem až po velké o průměru dosahujícímu až k 20 m a výšce 150 cm.



Obr. 119 Záznam stavu mohylníku z terénního průřezu.

V DMR 4G je v místech mohylníku patrný jen obrys odfiltrovaného lesa a s maximálním úsilím a vědomostmi o poloze jednotlivých mohyl lze rozpoznat jejich rozmazané náznaky, a to především v případě těch největších mohyl (obr. 120A). V DMR 5G je možné zřetelně rozpoznat 21 mohyl identifikovaných povrchovým průzkum, nově je rozeznáno dalších 6 mohyl. Ostatní jsou méně patrné nebo zcela splývají s terénem (obr. 120B).

Při aplikaci vlastních filtračních algoritmů byl z důvodu zmenšení objemu dat a zrychlení filtrovací metody zvolen polygon zahrnující mohylové pohřebiště a pouze jeho bezprostřední okolí. Polygon obsahuje celkem 299 416 bodů, které reprezentují odrazy od reliéfu i vegetace. Zvolené území bylo naskenováno 8. 6. 2011 v pásmu Střed, tedy v době již vzrostlé vegetace, což zapříčinilo nárůst odrazů nad úroveň terénu. Zpracovaný polygon byl pro porovnání vždy interpolován metodou Natural Neighbor s velikostí buňky 0,5 m a vizualizován stínovým modelem s azimutem světelného zdroje 315° a náklonem 45° s reprodukcí vykreslení „Esri“ (obr. 120).

- V MCC algoritmu se ke vstupním datům definují dva koeficienty pro zpracování. Prvním je měřítko, jež ovlivňuje velikost základní buňky pro výpočet, druhým je zakřivení definující hranici křivosti, která popisuje vzhled terénu (*Evans a kol. 2007*). Nastavení vhodných hodnot vyžaduje několik pokusů, než se posouzením výsledků najdou ty nejideálnější pro dané území. Pro polygon byl zvolen koeficient měřítka 2 a parametr zakřivení 0,4. Výsledkem klasifikace dat je mračno bodů rozlišující odrazy reprezentující úroveň terénu od všech ostatních odrazů. Výsledný DMR s 278 774 body byl vytvořen v prostředí ArcGIS 10.1 odstraněním nepodstatných chyb řaděním nejnižších výškových hodnot. Vizualizací klasifikovaných odrazů byl detailně vykreslen reliéf náspů mohyl, cest a terénních hran (obr. 120C). Místa, v nichž nedošlo k žádným odrazům od reliéfu, jsou prezentována jako hladké

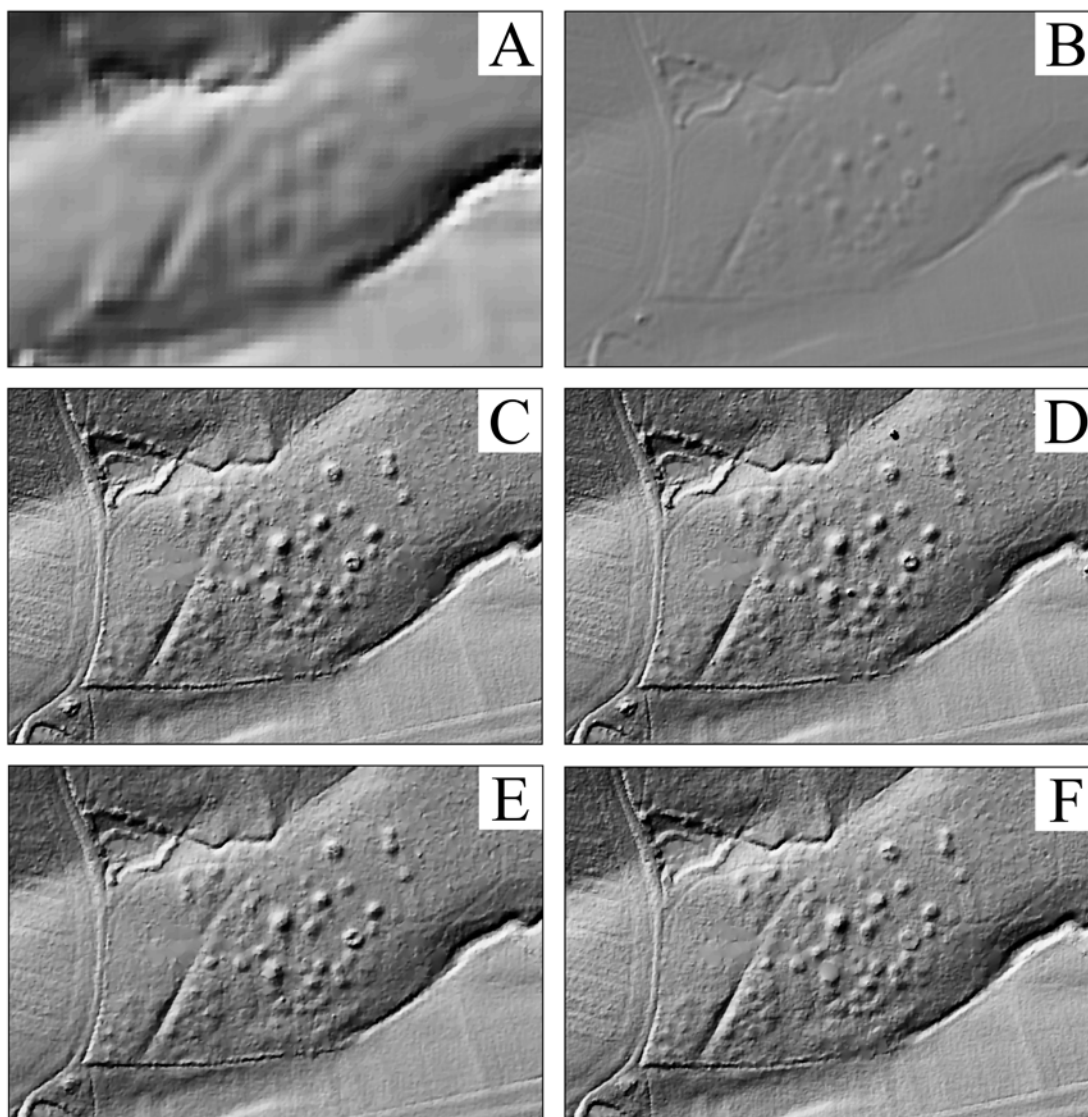
struktury, které spíše vznikají zvolenou interpolační metodou. V mohylovém pohřebišti se nevyskytují hrubé chyby, které by vznikly špatným klasifikováním mračna bodů. Ojedinele jsou zde vidět nepatrné ostré hrbolky, které jsou pozůstatkem obtížně od filtrovatelné nízké vegetace. Velké mohyly jsou zde dobře čitelné, menší jsou vidět minimálně v náznacích.

- Klasifikování dat algoritmem BCAL probíhá na stejném principu jako předešlá metoda. Liší se jen zadáváním jiných proměnných před spuštěním procesu. Jedná se o definování velikosti buňky pro analýzu, nastavení prahové hodnoty, výběr interpolační metody a maximum iterací algoritmu. Pro vstupní data byly nastaveny nejvhodnější zjištěné hodnoty, tedy velikost buňky 2, práh 1, interpolace Natural Neighbors a maximální počet opakování 15. Výsledný DMR obsahoval 285 604 bodů. Extrahování odrazů od úrovně terénu provedl algoritmus téměř úspěšně. Na pohřebišti se ale vyskytly dvě hrubé chyby, které nepatří do třídy bodů reliéfu. Stínový model (obr. 120D) zde opět dobře zobrazuje velké a menší mohylové násypy. Hrany mohyl a terénních hran jsou ostře vykresleny, přestože DMR obsahuje nepatrné množství menších chyb, když na některých místech zahrnuje i nízkou vegetaci.

- V programu ALDPAT byl vyzkoušen jen jeden z mnoha algoritmů klasifikování. Nastavení hodnot u filtrovacího algoritmu progresivní morfologie bylo komplikované, a proto bylo ponecháno na výchozích hodnotách. Celkový počet bodů činil 57 631. Filtr morfologie z polygonu odstranil velké oblasti, které ale nezasáhly do zájmového území pohřebiště. Výrazným zlepšením je minimální zastoupení drobných chyb ve formě ostrých hrbolků. Celkový DMR (obr. 120E) je více vyhlazen, malé i velké mohylové násypy jsou zde přesto dobře patrné.

- Poslední testovaná metoda zahrnovala aplikování malé části podobného procesu vedoucího ke vzniku oficiálních DMR 4. a 5. generace. K tomu byl využit program LAStools. Ve

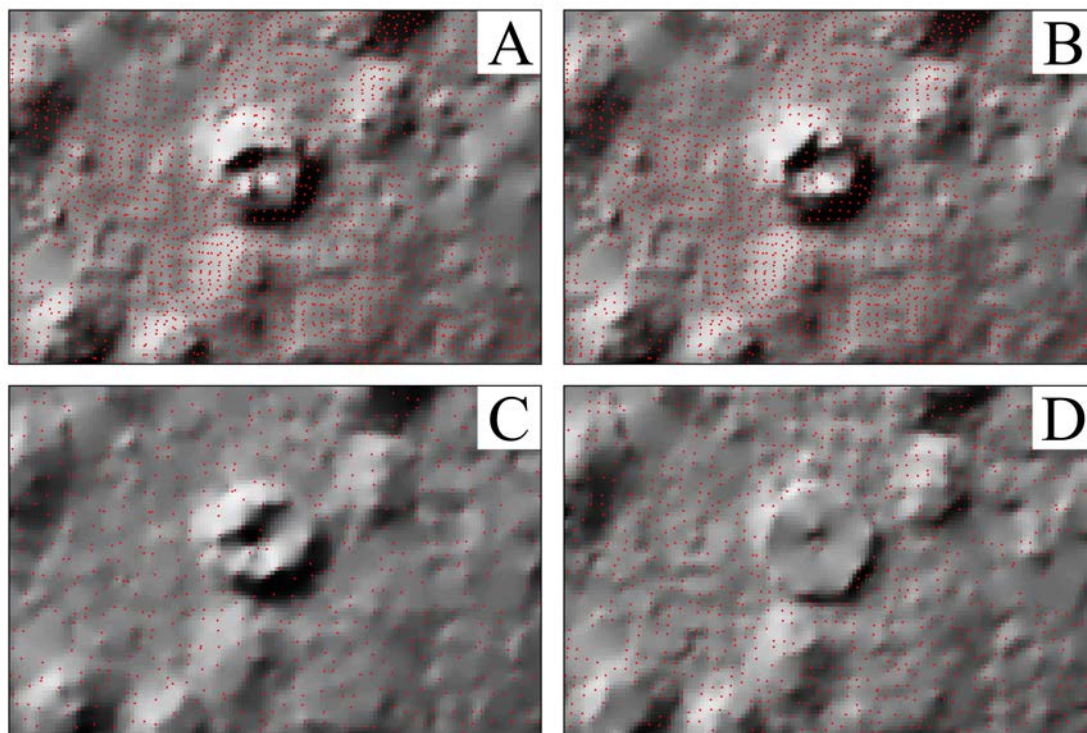
vybraném polygonu byly v buňkách 1 x 1 m vybrány všechny nejnižže umístěné body. Poté vybrané body byly nástrojem na extrahování povrchu klasifikovány. Celkový počet bodů představovalo množství 203 868. Vyhledání nejnižších bodů terénu v metrové buňce způsobilo minimální narušení povrchu nízkou vegetací, zároveň však některé velké mohyly ztratily na své výšce. Ostatní detaily DMR byly však zachovány (obr. 120F).



Obr. 120 Komparace filtračních algoritmů na surových datech, DMR 4G a 5G na mohylníku situovaném v k. ú Držov (okres Písek); A – DMR 4G, B – DMR 5G (z důvodu nezpracovaných dat v době přípravy textu je použitý dostupný náhled), C – MCC, D – BCAL, E – ALDPAT, F – LAsTools.

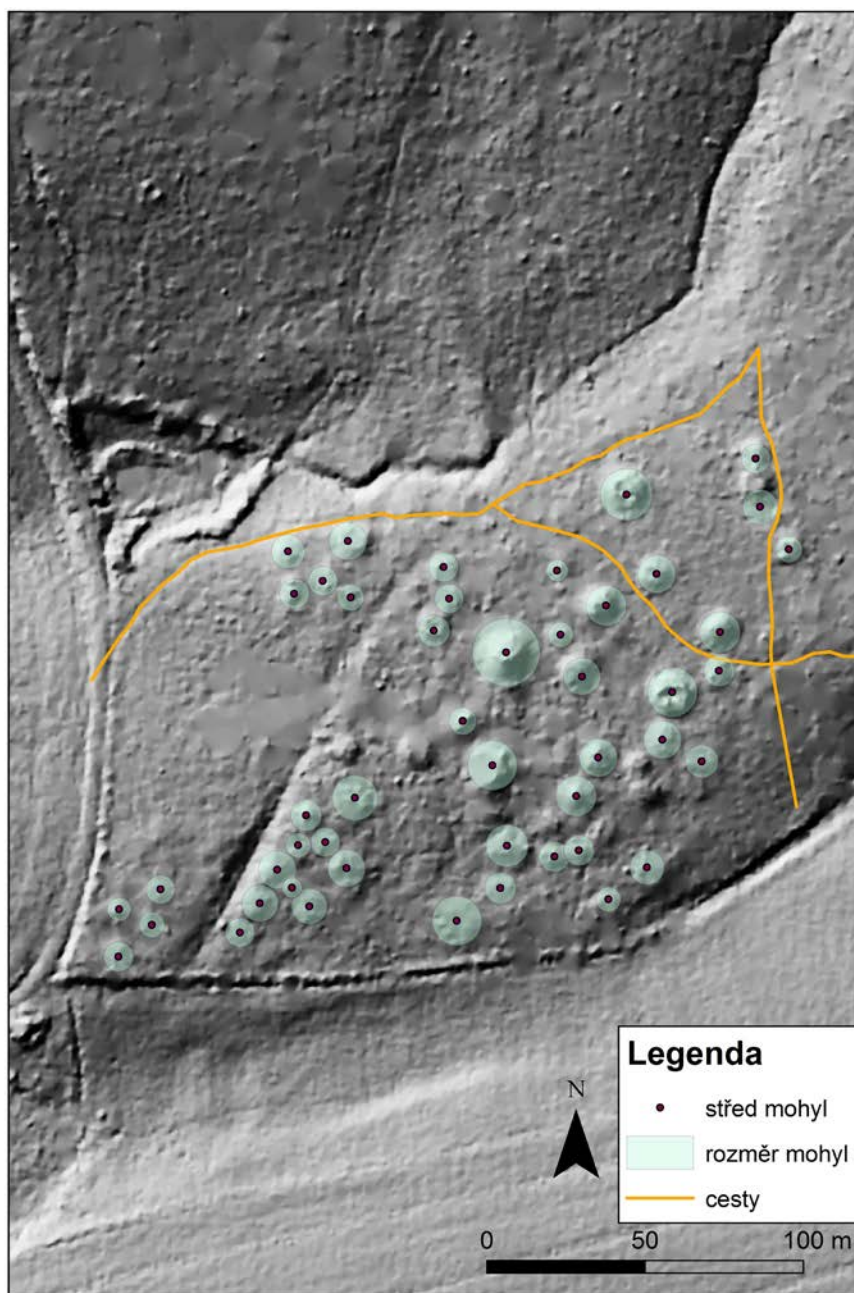
Výstupy všech filtračních algoritmů lépe zachycují průběh reliéfu než DMR 4G a jsou téměř srovnatelné s DMR 5G. Vzájemné srovnání výsledných filtrací je však obtížnější. DMR se od sebe liší jen v drobných detailech. Pominutím hrubých chyb, které vznikají nesprávným či nevhodným nastavením vnitřních parametrů filtrace, lze v odfiltrovaných DMR nejnadhěji pozorovat ty méně patrné, jež jsou způsobeny nesprávně klasifikovanou nízkou vegetací. Odstranění těchto chyb lze provést manuálně, vyhlazením povrchu či aplikováním specifické filtrace zaměřené na opravu právě těchto chyb. Nejlepší výsledky tak poskytuje filtrační metoda realizovaná v programu LAStools, jež množství těchto drobných chyb minimalizuje. Za druhou nejlepší metodou považujeme progresivní morfologii, která však výsledný DMR až příliš vyhlazuje.

Přesný vzhled náspů mohyl nelze porovnat se skutečností, jelikož tvar mohyl při terénním průzkumu nebyl zaznamenán. Jedinou výjimku představuje mohyla číslo 24 o průměru 15,7 m a výšce 120 cm, v jejímž plášti bylo registrováno starší porušení s průměrem 6,1 m a hloubkou 105 cm. Vizualizaci tvaru pláště ovlivňuje typ interpolace a především celkový počet a rozložení klasifikovaných bodů úrovně terénu. Největší počet bodů a husté rozložení zaznamenaly metody MMC a BCAL (121A, 121B). Interpolovaný tvar pláště mohyly byl zdařilý oproti tvaru z filtrování programem LAStools (obr. 121D). Plášť byl nejlépe vykreslen v případě filtrování odrazů prostřednictvím progresivní morfologie použitou programem ALDPAT (obr. 121C).



Obr. 121 Komparace filtračních algoritmů na surových datech, detail mohyly číslo 24 s klasifikovanými body reliéfu; A – MCC, B – BCAL, C – ALDPAT, D – LAStools

Poloha cest a středů mohyl zaměřených GPS stanicí během terénního průzkum souhlasí se situací na DMR, čímž byla ověřena přesnost GPS měření v zalesněném prostředí. Rovněž odpovídá i změřený průměr u většiny mohyl (obr. 122). Nepatrné, těžce rozpoznatelné mohyly nebyly zřetelněji zvýrazněny žádným filtračním algoritmem.



Obr. 122 Vizualizace DMR mohylníku z filtračního algoritmu MMC s výsledky terénního průzkumu.

12.11.6 Shrnutí výsledků komparace filtračních algoritmů lidarových dat

Výsledky filtrování surových dat nejvíce ovlivňují dva faktory. Prvním je vznik dat během skenování, což determinuje hustotu měřených bodů

v zalesněném prostředí a jejich celkovou kvalitu. Druhý faktor představuje volba metody zpracování a matematického algoritmu. Kvůli velkému objemu dat se využívá automatické zpracování, které musí dokázat pracovat s odlišnými profily terénu v rámci jednoho velkého souboru. Kvalitu následných interpolací DMR výrazně ovlivňuje filtrování dat, pro práci s lidarovými daty je však potřebná i správná klasifikace dat do jednotlivých skupin.

Filtrováním zvoleného polygonu byla shledána skutečnost, že surová data z LLS od ČÚZK dosahují velice malé hustoty, která se dle zvoleného území obvykle pohybuje kolem 1 bodu/m², v některých případech dokonce i méně. Hustota dat 5. generace činí v průměru pouze okolo 0,25 bodu/m². Při rozmístění bodů v nepravidelné síti vznikají různě rozsáhlá místa s malou hustotou bodů, v nichž tak zcela chybí či není dostatečně zaznamenána geometrie povrchu. Zpracováváný polygon jasně prokázal limity takto málo hustých dat. Méně výrazné antropogenní reliktly byly v některých případech téměř nezaznamenané a větší místa s minimem odrazů mohou případné reliktly maskovat tím, že odsud nepochází dostatečná data, a proto tato místa představují nezmapovanou oblast. Tyto problémy se vztahují jak ke konečným produktům 4. či 5. generace, tak i pro mapové podklady generované vlastním filtrováním surových dat. Při takto nízkém počtu odrazů od reliéfu se rapidně zvyšuje důležitost správně klasifikovaných bodů. Jejich případným chybným odfiltrováním se ve výsledném DMR může zcela pozměnit průběh reliéfu, což bylo demonstrováno tvarem pláště mohyly číslo 24 (viz obr. 121). Naskenovaná surová data obsahují různé chyby či nepřesnosti, které se při zpracování musí zredukovat na minimum. Velký problém představuje i nízká vegetace, kterou lze identifikovat jen s obtížemi.

Aplikací několika filtračních metod realizovaných ve volně dostupných softwarech byla jasně prokázána skutečnost, že archeologové si pro své účely mohou svépomocí vytvořit vlastní DMR, který kvalitativně značně přesahuje data 4. generace a s 5. generací, jež je k dispozici jen pro malou část území ČR, dosahuje téměř obdobných výsledků. I když konečné DMR nejsou zcela geodeticky korektní, naprosto dostačují ke

zviditelnění antropogenních tvarů reliéfu. Extrahováno je tak maximální množství informace, které je obsaženo v datech od ČÚZK. Lepší výsledky tak mohou poskytnout pouze data získaná od specializovaných firem, jejichž hustota data od ČÚZK mnohonásobně přesahuje.

13 ZÁVĚR A DISKUZE

Tato práce se zabývala převážně technologicky-metodologickým tématem z oblasti aplikace trojrozměrného prostředí v archeologii. Tomuto tématu není zatím v oboru české archeologie věnována větší pozornost, a proto jsem práci koncipoval spíše rozsáhle, abych čtenáře spíše navnadil na aplikaci trojrozměrného prostředí v archeologii, než zcela představil jednu metodu či využití. Myslím si, že na škodu to není, spíše naopak. Představil jsem zajímavé různorodé oblasti v 3D prostředí a řešil na nich konkrétní výzkumné otázky. Dále jsem na vybraných příkladech testoval a hledal limity a potenciál pro další badatelské záměry. Práce představila ucelený přehled o možnostech aplikace 3D prostředí na archeologických artefaktech a situacích. V práci byly uplatněny netradiční způsoby a metody, které teprve hledají svoje místo mezi uznávanými analytickými a dokumentačními metodami.

V úvodní části práce byly představeny hlavní řešené výzkumné otázky a vývoj nových technologií v čase, které ovlivňují naše nadšení z něčeho nového a naše zklamání ze zjištění pravdy o jejich využití v reálném životě. Stručně jsem na příkladech představil uplatnění 3D technologií v ochraně a záchraně ohrožených světových kulturních památek a poukázal na využití při archeologických výzkumech a možnostech prezentace 3D dat.

Další kapitola byla o rešerši současného stavu aplikace trojrozměrných metod v organizacích, projektech, výzkumech a konferencích ve světě i v České republice. Teoretické aspekty nastínily základní jednoduché otázky pro tento nově se rozvíjející obor a budou zodpovězeny dále.

Přehledně a podrobně jsem rozdělil metody, které je možné využít k trojrozměrné digitalizaci okolního světa. Metody vhodné pro trojrozměrnou digitalizaci archeologických artefaktů jsem uvedl a podrobně popsal jejich funkční principy.

V praktické části práce jsem představil některé dostupné 3D skenery, programy pro zpracování trojrozměrných dat, možné autorské licence pro volné šíření, problematiku metadat, metodiku 3D skenování a metodiku pro využití obrazové korelace. Dále jsem popsal obecné zpracování trojrozměrných dat a jejich možné prezentace ve formě digitálních dat a ve fyzické podobě prostřednictvím 3D tisku.

V druhé části práce jsem se věnoval řešení výzkumných otázek ve vybraných případových studiích, které také předvedly široký rozsah aplikování trojrozměrného prostředí v archeologii. Dokumentace mincí metodou RTI a rekonstrukce povrchu do podoby 3D digitálního modelu dokázaly plně popsat trojrozměrnou geometrii povrchu a jako vizualizační nástroj je metoda RTI nepřekonatelná. Testování softwarové inovace na příkladu mincí bylo velice účinné a výsledky dokumentace překonávají i specializované 3D skenery.

Analýza přesnosti předvedla možnou metodu aplikovatelnou na různorodé artefakty, které ale splňují parametry malé odchylky pro správné vyhodnocení. K porovnávání kadlubů a originálů nedošlo z důvodu neobjevení vhodných předloh pro tuto analýzu.

Virtuální skládání fragmentů představilo možnosti, jak s touto otázkou naložit a jaké jsou možnosti a limity. Názorným příkladem bylo dosaženo úspěšného složení členitého renezančního keramického umyvadla.

Virtuální rekonstrukce testovala nové možnosti práce a úpravy 3D dat, které byly označeny jako práce s virtuální hlinou. Cílem otestování možností úprav byla hmotová rekonstrukce 3D digitálního modelu hlavy

Buddhy, která proběhla úspěšně a bez chyb. Hybridní modelování má velký potenciál proniknout i do běžného editování polygonálních sítí.

Přidanou hodnotou produkce 3D digitálního modelu nádoby z Iráku byla její rekonstrukce do podoby celé nádoby. Studie ukázala potenciál pro sběr fotografií ze zahraničních expedicí.

Digitalizace a prezentace Hroznatovy mísy přinesla odpovědi, jak zacházet s unikátními artefakty v prostředí muzeí a expozic. Studie otestovala reálné možnosti prezentace, ochrany a dokumentace.

Dokumentace exkavace usedlosti v zaniklé středověké vesnici Cetkov přinesla přesnější výsledky dokumentace oproti dosavadním metodám. Testovaná metoda SfM byla shledána velice efektivní pro terénní výzkum a prezentace archeologických situací ve virtuálním muzeu je dostupná široké veřejnosti.

Softwarové komplikace zapříčinily neuskutečnění výzkumu s trojrozměrnou geometrickou morfometrií. Pro ukázkou proveditelnosti studie jsem popsal zahraniční metodiku a vyhodnocení morfologických dat na nádobách z Calderonovy sbírky.

Dokumentace otisků dřevěných konstrukčních prvků na mazanicích z mého pohledu nepřinesly žádné nové zásadní informace. Vznikly vizuálně pěkné obrazové přílohy, v nichž je ale složité se prostorově orientovat.

Naproti tomu v dokumentaci archeologických památek za využití dálkově pilotovaných létajících systémů byly závěrečné výsledky oproti staré dokumentaci přesvědčivější a více použitelnější pro budoucí analýzy. Torzo hradu Dražice bylo podrobně zmapováno metodou SfM a byly odhaleny nesrovnalosti či nové poznatky oproti starší tradiční dokumentaci. Antropogenní reliktů na hradu Litice otestovaly kvalitu a rychlost sběru dat. Zpracované výsledky ve formě DMP na místech s nízkou vegetací byly prostorově znatelnější než zobrazení DMR z LLS.

Metoda sběru leteckých dat z RPAS je finančně nenákladná, rychlá a v kooperaci s metodou SfM produkuje výrazně přesná a kvalitní 3D data.

Zpracováním dat z LLS zalesněné krajiny a otestováním vlastních metod pro filtrační algoritmy surových dat bylo přesvědčivě dokázáno, že možnost si takto upravovat lidarová data je reálná, ovšem z důvodu nekvalitních surových dat není zatím potřebná. Výsledky filtrování dosahují stejné kvality jako placené DMR po filtraci od ČÚZK.

Zpracované případové studie prozřetelně odhalily celkový nedostatek trojrozměrného prostředí, který zatím tkví v nedostatku dostupných programových aplikací pro řešení mnoha problémů. Naproti tomu studie o dokumentaci mincí metodou RTI předvedla nové kvality jen díky pokrokovému softwaru. S tímto programovým hendikepem se bude archeologie setkávat dlouho z finančních důvodů. Výzkumných otázek pro zpracování dat v trojrozměrném prostředí bude vždy mnoho, ale aplikací pro jejich alespoň částečné řešení velmi málo.

Na základní otázky položené v teoretických aspektech je možné díky práci odpovědět. Na nástup nových informací jsme z pohledu řešených výzkumných otázek připravení dobře. Očekávat lze data pomocná (vizualizační) a konečná (data výsledků s přidanou hodnotou), pracovat s nimi se zatím stále učíme. Jednoduchým výsledkům dokážeme porozumět, ale u složitých je interpretace náročná. V odborné komunitě jsme dle odborných konferencí, projektů a organizací připraveni využívat tento potenciál. Budoucnost 3D skenování je v rychlém, levném a nenáročném způsobu sběru 3D dat. Trojrozměrné metody dokumentace by měly být základní dovedností každého archeologa, ovšem zatím bohužel nejsou.

Jak práce popisuje, kvalitní orientace v celém rozsahu trojrozměrných technologií a metod je velice nesnadná. Zpracování a produkce 3D dat je také složité a časově velice nákladné. Jsem si vědom, že práce mohla být delší, aby obsáhla větší rozsah informací. Jsem však přesvědčen o tom, že základní výčet zde uvedených příkladů a řešených

otázek se plně dotkl všech zásadních okruhů trojrozměrného prostředí, aplikovatelných v archeologii.

Jak se ukazuje v posledních letech, metody a 3D technologie jsou stále dostupnější a stoupá jejich uplatnění a nasazení v praxi. Postupem času se zhodnocovaný potenciál 3D technologií výrazně projevil na rozšiřování možností archeologických vizualizací v trojrozměrném digitálním prostoru. Vše se více orientuje na vizualizaci a prohlížení 3D digitálních dat.

Jednoznačným závěrem dizertační práce a případových studií je, že je stále nutné se snažit objevovat nové možnosti aplikace trojrozměrného prostředí a zajímavé výzkumné otázky řešené netradičními způsoby, které mohou přinést nové odpovědi. Marginálním výsledkem této snahy jsou úžasné trojrozměrné vizualizace a prezentace kulturního dědictví pro širokou veřejnost.

Práce naznačila směr budoucího bádání a odhalila potenciál nových technologií a metod. Největšího rozvoje v budoucnosti dosáhnou subdisciplíny jako je 3D tisk, virtuální realita a obrazová korelace. Trojrozměrné digitální prostředí a technologie také kvalitním, přesným a úchvatným způsobem umožňují prezentovat kulturní dědictví a badatelské výsledky veřejnosti.

14 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A PRAMENŮ

Adamaitis, Z. - Paličková, T. (eds.) 2012: *Manu propria*: Sborník příspěvků k životnímu jubileu PhDr. Aleny Richterové, CSc., Praha: Národní knihovna České republiky.

Akca, D. - Remondino, F. - Novák, D. - Hanusch, T. - Schrotter, G. - Gruen, A. 2007: Performance evaluation of a coded structured light system for cultural heritage applications. *Videometrics IX, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging*, SPIE vol. 6491, San Jose, California, USA, 1-12.

Astorqui, A. 1999: Studying the Archaeological Record from Photogrammetry, In: Barceló, J.A. - I. Briz - A. Vila (eds.) *New Techniques for Old Times. CAA98. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 26th Conference, Barcelona, March 1998 (BAR International Series 757)*. Oxford: Archaeopress, 77-80.

Avern, G. J. 2001: A New Technique for Recording Archaeological Excavations: Research Progress Report, In: Stančić, Z. - T. Veljanovski (eds.) *Computing Archaeology for Understanding the Past. CAA 2000. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 28th Conference, Ljubljana, April 2000 (BAR International Series 931)*. Oxford: Archaeopress, 3-8.

Axelsson, P. 1999: Processing of Laser Scanner Data – Algorithms and Applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54, 138-147.

Benard, Ch. – Sugarman, E. - Rehm, H. 2012: *Cultural Heritage vs. Mining on the New Silk Road? Finding Technical Solutions for Mes Aynak and Beyond [Conference Report]*, Central Asia-Caucasus Institute & Silk Road Studies Program, Singapore. Dostupné také z: <http://isdpc.eu/content/uploads/images/stories/isdpc-main-pdf/2012-cultural-heritage-vs-mining.pdf> [cit. 2016-6-27]

Bendea, H. F. - Chiabrandu, F. - Tonolo, F. G. –Marenchino, D. 2007: Mapping of archaeological areas using a low-cost UAV the Augusta Bagiennorum Test site. Proc. of XXI International CIPA Symposium, 01-06 October 2007, Athens, Greece.

Benedict, J. B. – Laken, L. – Dutré, P. - Gool, L. V. - Rusinkiewicz, S. Weyrich, T. 2010: Tools for Virtual Reassembly of Fresco Fragments. International Conference on Science and Technology in Archaeology and Conservations.

Bewley, R. H. – Crutchley, S. P. – Shell, C. A. 2005: New light on an ancient landscape: lidar survey in the Stonehenge World Heritage Site. *Antiquity* 79, 636–647.

Bolina, P. - Durdík, T. 2001: Středověké hrady v Čechách a na Moravě. Praha: Argo.

Bomgardner, D. 2000: The Story of the Roman Amphitheatre. London: Routledge.

Brázdil, K. 2012a: Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 4. generace (DMR 4G). Pardubice: Zeměměřický úřad – Zeměměřický Odbor Pardubice. Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_4G_15012012.pdf 22. 10. 2012

Brázdil, K. 2012b: Technická zpráva k digitálnímu modelu reliéfu 5. generace (DMR 5G). Pardubice: Zeměměřický úřad – Zeměměřický Odbor Pardubice. Dostupné z: http://geoportal.cuzk.cz/Dokumenty/TECHNICKA_ZPRAVA_DMR_5G.pdf 22. 10. 2012

Bretzke, K. – Conard, N.J. 2012: Evaluating morphological variability in lithic assemblages using 3D models of stone artifacts. *Journal of Archaeological Science* 39, 3741 – 3749.

Brown, B. – Laken, L. – Dutré, P. - Van Gool, L. – Rusinkiewicz, S. – Weyrich, T. 2012: Tools for virtual reassembly of fresco fragments, *International journal of heritage in the digital era* 1/2. 313-330.

Brůna, V. - Brejcha, M. – Marek, Z. - Větrovská, B. 2015: Metodika digitalizace, 3D dokumentace a 3D vizualizace jednotlivých typů památek, Ústí nad Labem: Národní památkový ústav, území odborné pracoviště v Ústí nad Labem: Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem.

Bruno, F. - Bruno, S. - De Sensi, G. - Luchi, M. - Mancuso, S. - Muzzupappa, M. 2010: From 3d reconstruction to virtual reality: A complete methodology for digital archaeological exhibition. *Journal of Cultural Heritage*, 11, 42–49.

Bülthoff, H. H. 1994: *Shape from X: Psychophysics and Computation*. In: M. S. Landy - J. A. Movshon (ed.), *Computational models of visual processing*, Massachusetts Institute of Technology, 305–329.

Burenhult, G. 2002: *Archaeological Informatics: Pushing The Envelope*. CAA 2001. *Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology*. BAR International Series 1016, Archaeopress, Oxford.

Cardaci, A. - Versaci, A. 2013: Image-based 3D modeling vs laser scanning for the analysis of medieval architecture: the case of St. Croce Church in Bergamo. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-5/W2, 155-160.

Cuno, J. 2015: *ISIS and the Threat to Our Cultural Heritage: What Can the World Do? A Five-Point Proposal*. ISBN/EAN 978-90-821290-1-4

Čapek, L. - Netolický, P. - Plzák, J. - Vladař, J. 2014: Nové poznatky o stavební podobě tvrze v Řesanicích, okr. Plzeň-jih. In: Měřínský, Z. - Kouřil, P. (eds) *Archaeologia historica*, Brno : Masarykova univerzita, Roč. 39, č. 2, 473-501.

Dellepiane, M.- Corsini, M. - Callieri, M. - Scopigno, R. 2006: High Quality PTM Acquisition: Reflection Transformation Imaging for Large Objects. The 7th International Symposium on VAST International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage, 179-186.

Doneus, M. - Eder-hinterleitner, A. – Neubauer, W. 2001: Roman Carnuntum – Prospecting the largest archae-ological landscape in Austria. In: Doneus, M. - Eder-Hinterleitner, A. – Neubauer, W. (eds) *Archaeological Prospection, 4th International Conference on Archaeological Prospection*. Vienna: Austrian Academy of Sciences Press. 47-59.

Doneus, M. - Verhoeven, G. - Fera, M. -Briese, C. - Kucera, M. – Neubauer, W. 2011: From deposit to point cloud—a study of low-cost computer vision approaches for the straightforward documentation of archaeological excavations. *Geoinformatics FCE CTU 6*, 81-88.

Douglass, M. - Lin, S. – Chodoronek, M. 2015: The Application of 3D Photogrammetry for In-Field Documentation of Archaeological Features. *Advances in Archaeological Practice*. 3(2), 136–152.

Dreslerová, D. - Frolík, J. - Mikolášek, T. 2008: Využití trojrozměrného laserového scanneru v archeologii. In: Macháček, J. (ed.), *Počítačová podpora v archeologii 2*. Brno - Praha - Plzeň: Ústav archeologie a muzeologie, Masarykova univerzita - Archeologický ústav AV ČR - Katedra archeologie, Západočeská univerzita, 199-211.

Durdík, T. 2002: K problematice importů v české hradní architektuře. *Muzejní a vlastivědná práce/Časopis Společnosti přátel starožitností*, 40/110 č. 3, 176-179.

Durdík, T. 2009: Ilustrovaná encyklopedie českých hradů. Praha: Libri.

Earl, G. - Martinez, K. - Malzbender, T. 2010: Archaeological applications of polynomial texture mapping: analysis, conservation and representation. *Journal of Archaeological Science* 37/8, 2040-2050.

Earl, G. - Martinez, K. - Malzbender, T. 2010: Archaeological applications of polynomial texture mapping: analysis, conservation and representation. *Journal of Archaeological Science* 37/8, 2040-2050.

Earl, G. P. - P. J. Basford - A. S. Bischoff - A. Bowman - C. Crowther - M. Hodgson - K. Martinez - L. Isaksen - H. Pagi - K. E. Piquette - E. Kotoula 2011: Reflectance Transformation Imaging Systems for Ancient Documentary Artefacts. In: *Electronic Visualisation and the Arts 2011*, London.

Earl, G.P. - Martínez, K. - Malzbender, T. 2010: Archaeological applications of polynomial texture mapping: analysis, conservation and representation. *Journal of Archaeological Science* 37, 2040–2050

Engel, N. 2011: New excavations in Afghanistan Mes Aynak. Mes Aynak - Recent Discoveries Along the Silk Road in the National Museum of Afghanistan. Germany: asmuth druck + crossmedia gmbh. Dostupné z: <http://www.nationalmuseum.af/images/stories/PDF/mes%20aynak.pdf> [cit. 2016-6-27]

Ernée, M – Vitanovský, M. 2003: Řezaná negativní dřevěná forma – první krok při výrobě čelní vyhřívací stěny kamnového kachle? *Archeologické rozhledy* 55, 584–560.

Evans, J. S. – Hudak, A. T. 2007: A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return Lidar in Forested Environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, 1029-1038.

Fenn, J. 2008: Understanding Gartner's Hype Cycles, Gartner.

Forte, M. - Dell' Unto, N. - Issavi, J. - Onsurez, L.- Lercari, N. 2012: 3D Archaeology at Çatalhöyük. *International Journal of Heritage in the Digital Era* 1. 78 – 351.

Forte, M. 2010: *Cyber-archaeology*. Oxford: Archaeopress.

Forte, M. 2013: *Cyber Archeology at Catalhoyuk*. *Current World Archaeology* 61. 36 - 40.

Forte, M. 2014: *D Archaeology: New Perspectives and Challenges—The Example of Çatalhöyük*. *Journal of Eastern Mediterranean Archaeology and Heritage Studies*. Volume 2, number 1. 1 – 29.

Francioni, F. – Lenzerini, F. 2003: *The Destruction of the Buddhas of Bamiyan and International Law*. *European Journal of International Law* 14 (4), 619-651.

Freeth, T. - Bitsakis, Y.- Moussas, X. - Seiradakis, J. - Tselikas, A.. A. - Mangou, H.- Zafeiropoulou, M.- Hadland, R.- Bate, D.- Ramsey, A.- Allen, M. - Crawley, A. - Hockley, P. - Malzbender, T. - Gelb, D. - Ambrisco, W. – Edmunds, M. 2006: *Decoding the Ancient Greek Astronomical Calculator known as the Antikythera Mechanism*, *Nature* Vol. 444, 587-591.

Fröhlich, J. 1997: *Písecko v zrcadle archeologie*. Písek: Prácheňské muzeum v Písku.

Godin, G. - Beraldin, J.-A. - Taylor, J. - Cournoyer, L. - Rioux, M. - El-Hakim, S. - Baribeau, R. - Blais, F. - Boulanger, P. - Domey, J. - Picard, M. 2002: *Active Optical 3D Imaging for Heritage Applications*. *Computer Graphics in Art History and Archaeology* (September/October 2002), 24-36.

Gojda, M. - John, J. 2013: *Archeologie a letecké laserové skenování krajiny*. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni.

Gordon, S. 1999: The Virtual Museum – Who Needs It?, In: Dingwall, L. - S. Exon - V. Gaffney - S. Laflin - M. van Leusen (eds.) *Archaeology in the Age of the Internet. CAA97. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 25th Anniversary Conference, University of Birmingham, April 1997 (BAR International Series 750)*. Oxford: Archaeopress, 165-168.

Gregor, R. - Sipiran, I. - Papaioannou, G. - Schreck, T. - Andreadis, A. – Mavridis, P. 2014: Towards Automated 3D Reconstruction of Defective Cultural Heritage Objects, *Eurographics Workshop on Graphics and Cultural Heritage. Eurographics Association*, 135-144.

Grenzdörffer, G. J. – Naumann, M. – Niemeyer, F. – Frank, A. 2015: Symbiosis of UAS photogrammetry and TLS for surveying and 3D modeling of cultural heritage monuments - a case study about the Cathedral of St Nicholas in the city of Greifswald. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015*, 91 – 96.

Grün, A. – Remondino, F. – Zhang, L. 2004: Photogrammetric Reconstruction of the Great Buddha of Bamiyam, Afghanistan. *The Photogrammetric Record* 19, 177 – 199.

Hameeuw, H. – Geert, W. 2011: New Visualization Techniques for Cuneiform Texts and Sealings. *Akkadica* 132, 163–178.

Hasselquist, N. J. – Germino, M. J. – Sankey, J. B. – Ingram, L. J. – Glenn, N. F. 2011: Aeolian Nutrient Fluxes Following Wildfire in Sagebrush Steppe: Implications for Soil Carbon Storage. *Biogeosciences* 8, 3649-3659.

Hejdová, D. – Nechvátal, B. 1970: Raně středověké dlaždice v Čechách, *Památky archeologické* 61, 100 – 183, 395 – 471.

Hirschmüller, H. 2005: Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information, *Proceedings of the IEEE*

Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 20-26 June 2005, San Diego, CA, USA, Volume 2, 807-814.

Hirschmuller, H. 2008: Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, IEEE Transactions on, ročník 30, č. 2, 328–341.

Hložek, J. 2010: Předhradí vrcholně středověkých hradů v Čechách – cesta ke korpusu. *Disertační práce*. Katedra archeologie FF ZČU Plzeň.

Hložek, J. 2012: Hrad Litice, okr. Plzeň-město, a jeho nové zaměření. *Archeologie západních Čech*, 2012, 36-43.

Hodder, I. 2004: Women and men at Çatalhöyük, *Scientific American*. 290, 66–73.

Holata, L. - Plzák, J. 2013: Examinace procesu optimalizace "archeologicky korektních" způsobů vyhodnocení dat z leteckého laserového skenování zalesněné krajiny: Potenciál filtrace surových dat, problematika interpolačních algoritmů a způsobů vizualizace antropogenních tvarů v digitálních modelech reliéfu. In: Gojda, M. - John, J. (eds.) *Archeologie a letecké laserové skenování krajiny*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 49-79.

Holata, L. – Plzák, J. 2016: Primární práce s daty leteckého laserového skenování (zpracování a vyhodnocení), jejich výpovědní možnosti a omezení v zaznamenání antropogenních reliéfních tvarů. In: Gojda, M (ed.) *Lux ex caelo. Průzkum a mapování (pre)historických krajín pomocí leteckého laserového skenování* (v tisku).

Houshiar, H. - Borrmann, D. - Elseberg, J. – Nüchter, A.- Näth, F. – Winkler, S. 2015: Castle3C - a Computer Aided System for Labelling Archaeological Excavations in 3D, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W3, 111 – 118.

Hovora, J. 2008: 3D scannery, *PiXEL* 133, 22 – 24.

Howland, M.D - Kuester, F. – Levy, T.E. 2014: Structure from Motion: Twenty-First Century Field Recording with 3D Technology, *Near Eastern Archaeology* 77, 3, 187 -191.

Huang, Q. - Flöry, S. - Gelfand, N. - Hofer, M. – Pottmann, H. 2006: Reassembling fractured objects by geometric matching. *ACM Transactions on Graphics* 25/3, 569 - 578.

Huggett, J. – Ross, S. 2004: Archaeological Informatics. Beyond Technology. *Internet Archaeology* 15.

Huggett, J. 2013: Disciplinary Issues: Challenging the Research and Practice of Computer Applications in Archaeology, In: Earl, G - Sly, T. - Chrysanthi, A. - Murrieta-Flores, P. - Papadopoulos, C. – Romanowska, I. – Wheatley, D. (eds.) *Archaeology in the Digital Era. CAA2012. Proceedings of the 40th Conference in Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Southampton, United Kingdom, 26-30 March 2012*, 13 – 24.

Chen, Q. – Gong, P. – Baldocchi, D. – Xin, G. 2007: Filtering Airborne Laser Scanning Data with Morphological Methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 73, 175-185.

Chmyz, I. 1976: Terminologia Arqueológica Brasileira para a Ceramiza. *Cadernos de Arqueologia* 1 No.1. *Musea de Arqueologia e Artes Populares. Universidade Federal do Paraná.*

Isenburg, M. – Liu, Y. – Shewchuk, J. – Snoeyink, J. 2006: Streaming Computation of Delaunay Triangulations. *Proceedings of SIGGRAPH'06*, 1049-1056.

Kacyra, B. 2009: CyArk 500 - 3D Documentation of 500 Important Cultural Heritage Sites, In: Fritsch, D. (ed.) *Photogrammetric Week 2009*, Wichmann, 315 – 320.

Karasik, A - Smilansky, U 2011: Computerized Morphological Classification of Ceramics. *Journal of Archaeological Science* 38. 2644-2657.

Karasik, A. - Smilansky, U. 2008: 3D scanning technology as a standard archaeological tool for pottery analysis: practice and theory. *Journal of Archaeological Science* 35/5, 1148-1168.

Karasik, A. 2008: Applications of 3D technology as a research tool in archaeological ceramic analysis. In: Frischer, B. - Dakouri-Hild, A. (Eds.) *Beyond Illustration: 2D and 3D Digital Technology as Tools for Discovery in Archaeology*. British Archaeological Reports International Series 1805, 103-116.

Kašpar, M. – Pospíšil, J. – Štroner, M. – Křemen, T. – Tejkal, M. 2003: *Laserové skenovací systémy ve stavebnictví*. Praha: ČVUT.

Kimball, J.J.L. 2016: *3D Delineation: A modernisation of drawing methodology for field archaeology*, Oxford: Archaeopress.

Kobler, A. – Pfeifer, N. – Ogrinc, P. – Todorovski, L. – Oštir, K. – Džeroski, S. 2007: Repetitive Interpolation: A Robust Algorithm for DTM Generation from Aerial Laser Scanner Data in Forested Terrain. *Remote Sensing of Environment* 108, 9-23.

Koska, B. - Křemen, T. 2013: The Combination of Laser Scanning and Structure from Motion Technology for Creation of Accurate Exterior and Interior Orthophotos of St. Nicholas Baroque Church. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. vol. 40, no. XL-5/W1, 133-138.

Kotoula, E. - Kyranoudi, M. 2013: Study of Ancient Greek and Roman coins using Reflectance Transformation Imaging, *e-conservation Mag.* 25, 74–88.

La Pensée, A. – Rutland, F. 2010: Non-contact 3D laser scanning as a tool to aid identification and interpretation of archaeological artefacts; the case of a Middle Bronze Age Hittite dice. Digital Classicist and Institute of Classical Studies Seminar. (zdroj: <http://www.digitalclassicist.org/wip/wip2010-06al.pdf>)

Lanman, D. – Taubin, G. 2009: Build Your Own 3D Scanner: 3D Photography for Beginners. In: SIGGRAPH '09: ACM SIGGRAPH 2009 courses, New Orleans, LA USA, 1-87

Lehoux, D. 2013: Ancient Science in a Digital Age, *Isis* 104, 111-118.

Li, J. – Fan, H. – Ma, H. – Goto, S. 2010: Determination of Large-scale Digital Elevation Model in Wooded Area with Airborne Lidar Data by Applying Adaptive Quadtree-based Iterative Filtering Method. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* 38, 685-689.

Lycett, S.J. - Cramon-Taubadel, N. 2013: A 3D morphometric analysis of surface geometry in Levallois cores: Patterns of stability and variability across regions and their implications. *Journal of Archaeological Science* 40, 1508-1517.

Machat Ch. – Petzet, M. – Ziesemer, J. (eds.) 2014: *Heritage at Risk. World Report 2011–2013 on Monuments and Sites in Danger*. Berlin: hendrik Bäßler.

Malzbender, T. - Gelb, D. - Wolters, H. - Zuckerman, B. 2000: Enhancement of Shape Perception by Surface Reflectance Transformation. Tech. Rep. HPL- 2000-38R1. Hewlett-Packard Laboratories, Palo Alto, California.

Malzbender, T. - Gelb, D. - Wolters, H. 2001: Polynomial texture maps. In: SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. ACM Press, 519–28.

McPherron, S. P. - Gernat, T. - Hublin, J.-J. 2009: Structured light scanning for high-resolution documentation of in situ archaeological finds. *Journal of Archaeological Science* 36/1, 19-24.

Mellaart, J. 1975: *The Neolithic of the Near East*. Thames and Hudson. London. 98-111.

Mellado, N. - Reuter, P. – Schlick, C. 2010: Semi-automatic geometry-driven reassembly of fractured archeological objects. In: Artusi, A. - Joly-Parvex, M. - Lucet, G. - Ribes, A. - Pitzalis D. (eds.) *The 11th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage*. Paris, 33–38.

Mellado, N. 2012: *Analysis of 3D objects at multiple scales: application to shape matching* (Ph.D. Thesis) University of Bordeaux.

Menclová, D. 1972a: *České hrady. Díl první*. Praha: Odeon.

Menclová, D. 1972b: *České hrady. Díl druhý*. Praha: Odeon.

Mudge, M. - Malzbender, T. - Schroer, C. - Lum, M. 2006: *New Reflection Transformation Imaging Methods for Rock Art and Multiple-Viewpoint Display*. 7th International Symposium on Virtual Reality, Archeology and Cultural Heritage (VAST 2006), Cyprus.

Mudge, M. - T. Malzbender - C. Schroer - M. Lum 2006: *New reflection transformation imaging methods for rock art and multiple-viewpoint display*, In: M. Ioannides, - D.B. Arnold - F. Niccolucci - K. Mania (ed.) *VAST 2006: the 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Intelligent Cultural Heritage*, Nicosia, Cyprus, 2006. *Proceedings*: 195–202.

Mutinda, K. S. 2014: *Baganda architecture at Kasubi Hill*. (Závěrečná práce) Department of Architecture and Building Science, University of Nairobi.

Nedvěd, O. 2013: Rekonstrukce povrchu pomoc scanneru. Katedra informatiky a výpočetní techniky, FAV ZČU Plzeň (nepublikovaná diplomová práce).

Neubauer, W. – Doneus, M. – Trinks, I. – Verhoeven, G. Hinterleitner, A. - Seren, S. – Löcker, K. 2012: Long-term integrated archaeological prospection at the RomanTown of Carnuntum/Austria. In: Johnson, P. Millett, M. (eds). Archaeological Survey and the City. University of Cambridge Museum of Classical Archaeology Monograph Series No. 3. Oxford: Oxbow. 202–221.

Novobilský, M. - Rožmberský, P. 2002: Hrad Litice u Plzně. Edice Zapomenuté hrady, tvrze a místa 7. Plzeň: Nadace České hrady.

Olson, B.R. – Caraher, W. R. (eds.) 2015: Visions of Substance: 3D Imagine in Mediterranean Archaeology, The University of North Dakota.

Oxholm, G. - Nishino, K. 2013: A flexible approach to reassembling thin artifacts of unknown geometry. Journal of Cultural Heritage 14/1. 51-61.

Pavelka, K. – Šedina, J. - Matoušková, E. - Faltýnová, M. – Řezníček, J. 2015a: Ověřená technologie využití RPAS (UAV) v památkové péči, Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební.

Pavelka, K. – Šedina, J. - Matoušková, E. - Faltýnová, M. – Řezníček, J. 2015b: Ověřená technologie nízkonákladové 3D fotogrammetrické dokumentace památkových objektů, Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební.

Pavelka, K. 2006: Laserové skenování - nová technologie sběru prostorových dat. Habilitační přednášky. Praha: ČVUT.

Pavelka, K. 2009: Fotogrametrie 1. Praha: ČVUT.

Pezzati, L. – Fontana, R. 2008: 3D Scanning of Artworks. In: M. Schreiner, M. Strlič, R. Salimbeni eds., Handbook on the use of lasers in conservation and conservation science, Brussels.

Pfeifer, N. – Stadler, P. – Briese, C. 2001: Derivation of Digital Terrain Models in the SCOOP++ Environment. In: Torlegård, K – Nelson, J. eds., Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Lasescanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Elevation Models 1 – 3. March 2001.

Dostupný

z:

<http://bono.hostireland.com/~euroedr/publications/40.pdf> 17. 9. 2012

Pilík, O. 2010: Písemná práce ke státní doktorské zkoušce - Využití prostředků virtuální reality pro facility management v malých a středních podnicích.

Pintus, R. - Malzbender, T. - Wang, O. - Bergman, R. - Nachlieli, H. - Ruckenstein, G. 2010: Photo Repair and 3D Structure from Flatbed Scanners Using 4- and 2- Source Photometric Stereo. Computer Vision, Imaging and Computer Graphics. Theory and Applications, Springer Berlin Heidelberg, 68, 326-342.

Pintus, R. - Pal, K. - Yang, Y. - Weyrich, T. - Gobbetti, E. - Rushmeier, H. 2014: Geometric Analysis in Cultural Heritage. EUROGRAPHICS Workshops on Graphics and Cultural Heritage.

Pintus, R. :email z 28.1.2015.

Plzák, J – Kaňka, J. 2016: Trojrozměrná digitální dokumentace archeologických památek za využití dálkově pilotovaných létajících systémů. In: Větrovská, B. (sazba) Sborník k mezinárodní konferenci - Digi 2015 - Využití digitálních technologií v památkové péči. Praha: Omnium, 67-80, ISBN: 978-80-88191-00-1.

Plzák, J. 2008: Prostorové aspekty mohylových pohřebišť na k. ú. Držov, Louka, Oslov a Topělec (okr. Písek). Nepublikovaný rukopis bakalářské práce na KAR FF ZČU v Plzni.

Plzák, J. 2016: Dokumentace mincí výpočetní fotografickou metodou RTI. Numismatické listy (v tisku).

Pospíšil, J. 2007: Současné trendy skenování ve stavebnictví a v příbuzných oborech. Profesorské přednášky 7. Praha: ČVUT.

Potsdamer, J. - Altschuler, M. 1982: Surface measurement by space-encoded projected beam system. Computer Graphics Image Processing 18, 1-17.

Preusz, M 2013: Pozdně renesanční umyvadlo z městského domu č. 55 Na latránu v Českém Krumlově. Archeologické výzkumy v jižních Čechách 26, 287 - 296.

Preusz, M. - Beneš, J. - Kovačiková, L. - Kočár, P. – Kaštovský, J. 2014: What Did They Eat, What Did They Drink, and from What? An Interdisciplinary Window into Everyday Life of the Early Modern Burgher's Household in Český Krumlov (Czech Republic). (zdroj: <https://www.iansa.eu/papers/iansa-2014-01-preusz-3d.pdf>)

Rovner, I. 2009: Computer-assisted morphometric analysis of digital images: archaeobotanicals, archaeomaterials, artifacts and features. 14th International Congress „Cultural Heritage and New Technologies“ Vienna.

Scollar, I. 1999: 25 Years of Computer Applications in Archaeology, In: Dingwall, L. - S. Exon - V. Gaffney - S. Laflin - M. van Leusen (eds.) Archaeology in the Age of the Internet. CAA97. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology. Proceedings of the 25th Anniversary Conference, University of Birmingham, April 1997 (BAR International Series 750). Oxford: Archaeopress, 5-10.

Sedláček, A. 1905: Hrady, zámky a tvrze království českého. Díl třináctý, Plzeňsko a Loketsko. Praha: F. Šimáček.

Sedláček, A. 1932: Hrady, zámky a tvrze Království Českého. Díl X. Boleslavsko. Praha: Nakl. Šolc a Šimáček.

Selden Jr., R. Z. – Perttula, T. K. – O'Brien, M. J. 2014: Toward a Morphometric Phylogeny of Caddo Ceramics: A Test of 3D Geometric Morphometrics (Poster). Texas Academy of Science Annual Meeting, Galveston, Texas.

Selden, Jr. R. Z. – Vasconcelo, M. L. C 2015: Uma análise preliminar da morfometria 3d das cerâmicas acordeladas na coleção Calderón. Boletim Informativo do Museu de Arqueologia e Etnologia, 8(3):8.

Silván-Cárdenas, J. L. – Wang, L. 2006: A Multi-Resolution Approach for Filtering LiDAR Altimetry Data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 61, 11-22.

Sithole, G. – Vosselman, G. 2004: Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare-Earth Extraction from Airborne Laser Scanning Point Clouds. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 59, 85-101.

Sithole, G. 2001: Filtering of Laser Altimetry Data Using a Slope Adaptive Filter. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 34, 203-210

Sittler, B. 2004: Revealing Historical Landscapes by Using Airborne Laser Scanning. A 3-D Modell of Ridge and Furrow in Forests near Rastatt (Germany). In: M. Thies – B. Koch – H. Spiecker – H. Weinacker eds., Proceedings of Natscan, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment – Instruments, Processing Methods and Applications. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 36, 258–261.

Sohn, G. – Dowman, I. 2002: Terrain Surface Reconstruction by the Use of Tetrahedron Model with the MDL Criterion. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 34, 336-344.

Sokol, P. 2001: Středověké osídlení okolí Plzně-Litic. Historická krajina a vývoj osídlení. In: Martinovský, I. (ed.) Minulostí Západočeského kraje 36. 15-27.

Suková, L. - Brůna, V. - Kroužek, J. - Novotný, V. - Kabelka, P. - Heglík, J. 2010: Report on the 3D scanning and photography project in the National Museum of the Sudan, *Studia Oecologica*.

Sulaiman, N. S. – Majid, Z. – Setan, H. 2010: DTM Generation from LIDAR Data by Using Different Filters in Open – Source Software. *Geoinformation Science Journal* 10, 89-109.

Tinkham, W. T. – Huang, H. – Smith, A. M. S. – Shrestha, R. – Falkowski, M. J. – Hudak A. T. – Link, T. E. – Glenn, N. F. – Marks, D. G. 2011: A Comparison of Two Open Source LiDAR Surface Classification Algorithms. *Remote Sensing* 3, 638-649.

Tittle, J. S. - Braunstein, M. L. 1993: Recovery of 3-D shape from binocular disparity and structure from motion. *Attention Perception & Psychophysics*, 03/1993; 54(2), 157-169.

Torres, J.C. - Arroyo, G. - Romo, C. - De Haro, J. 2012: 3D Digitization using Structure from Motion, In: Navazo, I – Patow, G. (eds.) *Spanish Computer Graphics Conference*.

Trinks, I. – Johansson, B. – Gustafsson, J. - Emils-Son, J. – Friborg, J. - Gustafsson, C. – Nissen, J. - Hin-Terleitner, A. 2010: Efficient, large-scale archaeologicalprospection using a true three-dimensional ground penetratingradar array system. *Archaeological Prospection* 17. 175-186.

Verhoeven, G. 2011: Taking ComputerVision Aloft - Archaeological Three-dimensional Reconstructionsfrom Aerial Photographswith PhotoScan, *Archaeological Prospection* 18, 67–73.

Vlach, J. 2011: Hrnčířská dílna v 15.-16. století: výroba kamnářských kachlů a dalších prvků středověkých kamen. In: Měřínský, Z. (ed. Výrobní a technologické aspekty středověkých a raně novověkých komorových kachlů. Brno: Masarykova univerzita.

Waschbüsch, M. – Würmlin, S. – Cotting, D. – Sadlo, F. – Gross, M. 2005: Scalable 3D Video of Dynamic Scenes, *The Visual Computer* 21, 629-638.

Zhang, K. Q. – Chen, S. C. – Whitman, D. – Shyu, M. L. – Yan, J. H. – Zhang, C. C. 2003: A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurements from Airborne LiDAR Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41, 872-882.

Zheng, S. Y. - Huang, R. Y. - Li, J. - Wang, Z. 2014: Reassembling 3D Thin Fragments of Unknown Geometry in Cultural Heritage. *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume II-5, 393-399.

Zogg, H. M. 2008: Investigations of High Precision Terrestrial Laser Scanning with Emphasis on the Development of a Robust Close-Range 3D-Laser Scanning System. Disertační práce. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.

14.1 Elektronické dokumenty

3D laser skenování

http://www.inition.co.uk/inition/guide.php?SubCatID_=30 (citováno 18. 3. 2011)

3D tiskárna Z510. <http://www.zcorp.com/en/Products/3D-Printers/Spectrum-Z510/spage.aspx> (citováno 22.4.2011)

Archaia: http://www.archaiabrno.org/home_cs/?acc=informatika (citováno 27.4.2016)

CC prvky. <http://www.creativecommons.cz/zakladni-informace-o-cc/licencni-prvky/> (citováno 27.4.2016)

CyArk 1: <http://www.cyark.org/projects/royal-tombs-at-kasubi/overview> (citováno 15.11.2016)

CyArk 1: <https://en.wikipedia.org/wiki/CyArk> (citováno 27.4.2016)

CyArk 2: <http://www.cyark.org/> (citováno 27.4.2016)

Dronesimaging: <http://www.dronesimaging.com/en/nepal-durbar-square-before-after/> (citováno 16.11.2016)

Licence CC <http://creativecommons.org/licenses/> (citováno 27.4.2016)

Mes Aynak1: https://en.wikipedia.org/wiki/Mes_Aynak (citováno 27.6.2016)

Morph: <https://archaeologicalmorphometrics.com/2016/09/02/registration-of-interest-morph2017/> (citováno 1.12.2016)

Produktový leták Faro Focus3D Laser Scanner. http://www.merici-pristroje.cz/fileadmin/user_upload/FARO/FARO_Focus_3D_EN.pdf (citováno 16.4.2011)

Produktový leták HandyScan. http://www.3d-skenovani.cz/sites/3d-skenovani.cz/files/clanky/soubory/handyscan_3d.pdf (citováno 16.4.2011)

Produktový leták NextEngine HD.
<http://www.scribd.com/doc/45559983/2010-Next-Engine-Desktop-3D-Scanner-HD> (citováno 16.4.2011)

Rapid prototyping: příprava a tisk STL modelů.
<http://www.earch.cz/clanek/5108-rapid-prototyping-priprava-a-tisk-stl-modelu.aspx> (citováno 17.4.2011)

Reconstruction from sherds.
http://www.sachsen.de/en/download/III_32__scannersoftware_eng.pdf
(citováno 22.4.2011)

Rekrei: <https://projectmosul.org/about> (citováno 16.11.2016)

Saving Mes Aynak [film]. Directed by B. E. Huffman. USA: German Camera Productions, 2014

Selden3D: <https://selden3d.com/category/brazil/> (citováno 1.12.2016)

TroveSketch. <http://www.tu-chemnitz.de/informatik/GDV/forschung/projekte.php?id=56> (citováno 22.4.2011)

15 SUMMARY

The thesis focuses on basic application of three-dimensional digital environment in archaeology. The thesis mainly consists of methods and options of artefact documentation using modern technology which have not been commonly used so far in archaeological research and fieldwork. Modern documentation methods contain great potential of new options such as analysis, 3D data processing and new kinds of visualizations. The thesis comprehensively introduces modern documentation technologies, their availability and utilization.

The author of this thesis described the general phenomenon of new and breakthrough technologies. In several chapters, he summed up the potential and use of three-dimensional technologies in archaeology and heritage preservation. He pointed out several interesting or significant projects both in the Czech Republic and worldwide as well, especially the projects holding exquisite demonstration merit of three-dimensional technologies and their processing. The expert groups (conferences and organizations), which are active in the field of modern technologies and, if possible, three-dimensional methods, were also mapped. The options of public 3D data presentation were illustrated on examples of several virtual museums. The technologies of three-dimensional object digitalization were divided according to similar technological parameters. The basic steps of handling archaeological 3D data were characterized as well. The problematic of 3D data processing and evaluation was also described. After the method of processing, the scopes of 3D presentation, visualization and data dissemination within the copyright licence were mentioned. The options of 3D print and virtual reality, alternatively to the traditional approach, were outlined as possible 3D presentation of archaeological data.

In the second part of the thesis, several studies were introduced concerning the thesis's topic to verify factual options of 3D methods application. The first study deals with the documentation of coins using

RTI computational photographic method which operates with 2D images as well as 3D information on surrounding lighting. The method is very convenient for all kinds of artefacts which have a subtle relief, like coins. In the following study, the author tested the virtual composition of three-dimensional digitalized fragments on the example of renaissance wash-basin fractions. The virtual composition was realized manually with other feasible methods being evaluated. Moreover, a virtual mass reconstruction was carried out on the Buddha's head from Mes Aynak. The damaged clay head was digitally reconstructed to its original state. Following are three studies using the potential of SfM photographic method on the examples taken from fieldwork and depositary. This was implemented on pottery fragments from Iraq, deserted medieval village Cetkov and on the Hroznata's bowl from the Teplá monastery. Demanding use of modern methods was described on an example of three-dimensional geometric morphometry of vessels from Calderon Collection. Last two studies from the field of remote sensing presented the application of modern documentation methods such as remotely piloted aircraft system and airborne laser scanning. The results of these differing examples have displayed the potential of three-dimensional methods and future use of these modern digital tools at archaeological sites.

16 SOMMARIO

La tesi qui presentata si occupa dell'applicazione di strumenti della documentazione digitale tridimensionale in archeologia. Prevalentemente tratta di metodi e di possibilità della documentazione d'artefatti e di monumenti usando le tecnologie moderne, quale finora non sono state usufruite solitamente nello studio archeologico. I metodi moderni della documentazione includono il potenziale immenso di nuove possibilità sia per analisi e elaborazione 3D dati, sia per nuovi tipi di visualizzazione. La tesi presenta in modo complesso le tecnologie moderne, loro uso in documentazione e modi di loro applicazione.

Autore della tesi ha descritto il fenomeno generico dell'arrivo delle nuove e acquisite tecnologie. Ha riassunto in diversi capitoli il potenziale e l'uso di tecnologie tridimensionali in archeologia e in ambito della protezione dei beni culturali. Ha presentato i progetti particolari o interessanti provenienti dal mondo e dalla Repubblica Ceca. I progetti, che significativamente presentano applicazione di tecnologie tridimensionali e loro elaborazione. Ha creato un sondaggio nei gruppi esperti (convegni, istituzioni), che sono attivi nell'ambito di tecnologie moderne e, se fu possibile, nell'ambito di tecnologie tridimensionali in archeologia. Ha mostrato possibilità di presentazione di dati 3D per il pubblico su esempio di scelti musei virtuali. Tecnologie di digitalizzazione tridimensionale di oggetti è stata suddivisa secondo a parametri tecnici. Ha caratterizzato i passi basali per la elaborazione di dati 3D. Dopo il metodo della elaborazione sono state nominate possibilità di presentazione, visualizzazione e diffusione di dati 3D e gestione di licenze per diritti d'autore. Sono stati accennati possibilità di stampa 3D e realtà virtuale come possibile modo di presentazione di dati 3D archeologici.

Nella seconda parte di su presentata tesi l'autore presenta vari studi esemplari, che riguardano tema della tesi e, nello stesso tempo, verificano possibilità reali d'uso di metodi tridimensionali in archeologia. Primo caso tratta di documentazione di monete usando il metodo

computazionale fotografico RTI. Questo metodo lavora con immagini 2D e 3D informazioni su condizioni di luce. Il metodo è molto appropriato per artefatti simili, cioè con un rilievo molto sottile. In altro caso autore ha testato una composizione di frammenti digitalizzati in 3D sull'esempio dei frammenti di lavandino rinascimentale. La composizione virtuale è stata realizzata manualmente. Sono stati testati anche altri tipi di composizione. Autore ha creato anche una ricostruzione di massa virtuale di un'artefatto che rappresentava la testa di Buddha proveniente di Mes Aynak. I frammenti della tasta ceramica digitalizzati sono stati composti in loro probabile aspetto originale. Altri tre casi hanno usufruito il metodo SfM su esempi provenienti sia dal deposito sia dallo scavo in terreno. Concretamente sono stati studiati i frammenti ceramici di Iraq, lo scavo di villaggio medievale abbandonato Cetkov e il pendium di Hroznata (il monastero a Teplá). Applicazione di metodi moderni più esigente è stata descritta su esempio di morfologia geometrica tridimensionale dei contenitori di collezione di Calderon. Ultimi due studi dell'ambito di telerilevamento hanno presentato l'applicazione di metodi di documentazione moderni come sono aereo telecomandato e la scansione laser di paesaggio. I risultati di questi vari esempi hanno dimostrato il potenziale dei metodi tridimensionali e futura applicazione di questi strumenti digitali avanzati nella ricerca archeologica.