

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ



Bakalářská práce

2022

**Tvorba prostorového modelu archeologického
objektu a jeho vizualizace pomocí VR**

Autor práce:

Tomáš Straka

Vedoucí práce:

prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Straka</u>	Jméno: <u>Tomáš</u>	Osobní číslo: <u>486212</u>
Zadávatel katedra: <u>geomatiky</u>		
Studijní program: <u>Geodézie a kartografie</u>		
Studijní obor: <u>Geodézie a kartografie</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Tvorba prostorového modelu archeologického objektu a jeho vizualizace pomocí VR</u>
Název bakalářské práce anglicky: <u>Creating of a spatial model of an archaeological object and its visualisation using VR</u>

Pokyny pro vypracování:

Na základě rešerše v rozsahu min. 5 stran definujte vhodné metody pro dokumentaci a vizualizaci archeologických lokalit. Definujte na příkladové studii použité snímače dat a popište stručně lokalitu, kde byla data využita (ruiny kláštera, archeologická lokalita v severním Kurdistanu, Qala Shila). Popište způsob zpracování dat z hlediska pracnosti, kvality výsledků a použitelnosti dat. Pokuste se data z obou snímačů propojit do jednoho modelu. Výsledný model převedte do virtuální reality (VR) a vytvořte vhodný výstup, který by sloužil k vizualizaci na webu. Na závěr zhodnoťte výsledky.

Seznam doporučené literatury:

Aber, James & Marzoff, Irene & Ries, Johannes. (2010). Small-format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications, Elsevier, ISBN: 9780444532602
Pavelka, K. Fotogrammetrie 2, skriptum ČVUT FSv, 2011, ISBN 978-80-01-04719-4
Pappi, Cinzia, In the Field: The Survey of Koya. Mar Shprim, Newsletter of the International Association for Assyriology 1/2017, https://www.academia.edu/31288643/In_the_Field_The_Survey_of_Koya

Jméno vedoucího bakalářské práce: prof. Dr. Ing. Karel Pavelka

Datum zadání bakalářské práce: 2021 Termín odevzdání bakalářské práce: 2.1.2022
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Obsahem této bakalářské práce je vizualizace archeologického naleziště Qala Shila v Iráckém Kurdistánu. Práce se zabývá lokalitou daného naleziště, dokumentací objektu z hlediska použitých metod a přístrojů, vytvoření 3D modelů a virtuální reality a zhodnocení výsledků.

Klíčová slova

Virtuální realita, 3D model, fotogrammetrie, archeologický průzkum, vizualizace

Abstract

This bachelor thesis deals with visualisation of archaeological site Qala Shila, Iraqi Kurdistan. It describes the location of the site, the object documentation in terms of the methods and devices used, the creating of the 3D models, transfer to virtual reality, and results, discussion and evaluation.

Key words

Virtual reality, 3D model, photogrammetry, archaeological survey, visualization

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Tvorba prostorového modelu archeologického objektu a jeho vizualizace pomocí VR“ vypracoval samostatně. Veškeré podklady, ze kterých bylo čerpáno, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne.....

.....Tomáš Straka

Poděkování

Děkuji panu prof. Dr. Ing. Karlu Pavelkovi za poskytnutá data, podnětné rady, odborné vedení a také za projevenou trpělivost.

Obsah

1	Úvod	7
2	Rešerše literatury	8
3	Popis lokality.....	14
4	Použité přístroje	16
	4.1 Pozemní snímkování	16
	4.2 Letecké snímkování	18
5	Postup zpracování	20
	5.1 Tvorba modelů	20
	5.2 Spojení modelů	24
	5.3 Tvorba virtuální reality	29
6	Závěr.....	31
7	Seznam literatury	32
8	Seznam tabulek.....	37
9	Seznam obrázků	37

1 Úvod

Cílem této bakalářské práce je vytvoření dvou nezávislých 3D modelů archeologického naleziště Qala Shila v Iráckém Kurdistanu, pořízených různou fotogrammetrickou technologií, a jejich následné spojení. Výsledný model má být následně převeden do virtuální reality a vytvořen vhodný výstup pro vizualizaci na webu. Veškeré zpracování je provedeno v programech Agisoft Metashape a Geomagic Wrap a CloudCompare.

Virtuální realita umožňuje uživateli podrobně prozkoumat danou lokalitu a přiblížit mu tak skutečnou podobu např. historických památek, jako v případě zde presentované ruiny kláštera. Tato v dnešní době hojně využívaná metoda může svým způsobem sloužit i k určitému zatraktivnění kulturního dědictví a historie.

Téma této práce jsem si zvolil, protože problematika tvorby 3D modelů a hlavně samotná tvorba virtuální reality mě zajímá. Zaujala mě i exotická lokalita daného naleziště, o kterém se v práci pojednává.

2 Rešerše literatury

Zde zpracovaná stručná rešerše slouží k shrnutí základních poznatků o dosavadních znalostech o zkoumané lokalitě. Její hlavní význam tkví v tom, že umožní autorovi i čtenáři lepší orientaci v dané problematice a dává prostor k dalšímu výzkumu, vycházejícímu z již publikovaných děl.

Rešerše v této práci se zabývá třemi hlavními tématy, a to informacemi o archeologickém nalezišti Qala Shila a jeho okolí, tvorbou 3D modelu z maloformátových fotografií a vytvářením virtuální reality.

K vyhledání vhodných zdrojů pro tuto práci byla zadána klíčová slova do platforem typu ResearchGate, Google Scholar a také byly vyhledány publikace v Národní technické knihovně.

Cinzia Pappi se ve svém odborném článku *The Archaeological Survey of Koi Sanjaq/Koya (Iraqi Kurdistan): Scientific Investigations and Teaching Programs* zabývá archeologickými nálezy v dané lokalitě. Nejprve popisuje samotné místo, ve kterém byly archeologické práce prováděny (oblast kolem města Koya, Irák). Oblast průzkumu zasadila do historického a geografického kontextu. Primárně se v textu věnuje spolupráci s Univerzitou v Koyi, jejich společné práci na výzkumu archeologických vykopávek a porovnáváním dosažených výsledků tohoto výzkumu s Archeologickým atlasem Iráku z roku 1975 [1]. Text je důležitý tím, že se věnuje výzkumu naleziště Qala Shila, o kterém konkrétně pojednává tato bakalářská práce.

Dílo *Small-format Aerial Photography: Principles, Techniques and Geoscience Applications* od autorů Jamese Abera, Irene Marzolff a Johanna Riese se věnuje základním principům maloformátových leteckých fotografií a využití těchto principů ve fotogrammetrické praxi. Z hlediska kapitol publikace využitelných pro tuto bakalářskou práci, autoři v jedné z nich pojednávají o použitelných kamerách k tvorbě maloformátových snímků a zároveň o jejich použití. Dále předkládají informace o

platformách, ze kterých jsou snímky pořizovány (např. letadla, drony, atd.) a o srovnání těchto platforem [2].

V článku *3D-Modeling by Ortho-Image Generation from Image Sequences* od autorů Thorstena Thormählena a Hanse-Petera Seidela se popisuje proces vytváření 3D modelu z ortofot. Autoři použili poloautomatickou metodu, kdy byl objekt snímán pohyblivou nekalibrovanou kamerou. Model byl následně vytvářen manuálně na podkladě generovaných ortofot. Lze říci, že toto je netradiční způsob, jak vytvářet 3D model z fotografií [3].

Odborný článek *Visual Modeling with a Hand-Held Camera*, na kterém se podíleli autoři Marc Pollefeys, Luc van Gool, Maarten Vergauwen, Frank Verbiest, Kurt Cornelis, Jan Tops a Reinhard Koch, prezentuje celistvý proces vytváření 3D modelu z fotografií pořízených ruční kamerou. Popisují vybrané možnosti, které vedou k vytvoření 3D modelu. Výstupem z tohoto procesu jsou tři modely – klasická metoda vytvoření 3D mračna s texturou, metoda modelování založená na obrazu (image-based approach) a kombinovaná metoda dávající dohromady vytvořený model a reálné video [4].

Článek *From Rubble to Virtual Reality: Photogrammetry and the Virtual World of Ancient Ayutthaya, Thailand* od autora C. L. Ogleby pojednává o vizualizaci starověkého thajského města Ayutthaya. Byly vytvořeny 3D modely různých architektonických pozůstatků města a pomocí modelování výsledků historického výzkumu bylo město vizualizováno tak, jaká byla jeho pravděpodobná podoba v historii. Modely byly vytvořeny z různých historických map, leteckých snímků, terénních prací a z fotogrammetrie. Výsledkem bylo virtuální město, sloužící k edukativním a populárně naučným účelům [5].

Thomas P. Kersten ve své práci *Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological*

Applications popisuje potenciál digitální fotogrammetrie při realizaci 3D modelu archeologických památek. Konkrétně se v práci věnuje rekonstrukci a vizualizaci 3D modelu stavidla starobylé přehrady v Jemenu. Data v terénu byla sbírána pomocí fotogrammetrických metod v kombinaci s laserovým skenováním. Model byl převeden do virtuální reality, aby bylo zachováno originální kulturní dědictví z důvodu konzervace kulturních památek organizací UNESCO [6].

Miloš Obradović, Ivana Vasiljević, Isidora Đurić, Jelena Kićanović, Vesna Stojaković a Ratko Obradović se podíleli na článku *Virtual Reality Models Based on Photogrammetric Surveys — A Case Study of the Iconostasis of the Serbian Orthodox Cathedral Church of Saint Nicholas in Sremski Karlovci (Serbia)*, který pojednává o rekonstrukci pravoslavného ikonostu. Práce sestávala ze čtyř hlavních kroků: generování 3D modelu ikonostu pomocí fotogrammetrie, optimalizace a komprese modelu, kontrola a analýza a nakonec vytvoření samotné virtuální reality. Během práce bylo zjištěno, že výhodou využití fotogrammetrie během 3D modelování je hlavně úspora času a vysoká přesnost výsledného modelu [7].

Na 7. mezinárodní DAAAM baltské konferenci prezentovali autoři Filip Górski, Wiesław Kuczko, Radosław Wichniarek a Przemysław Zawadzki svou práci *Application of Close-Range Photogrammetry in Reverse Engineering*, ve které zabývají obecnou tvorbou 3D modelů nejrůznějších objektů za užití blízké fotogrammetrie. Přesně popisují konkrétní kroky, vedoucí k výslednému produktu. Po vytvoření modelu se dále zabývají možnostmi vytvořit hmatatelný prototyp daného objektu, a to pomocí 3D tisku a následné replikace původního produktu za užití silikonové formy vytvořené z prototypu [8].

Na 7. mezinárodním sympoziu virtuální reality¹ a archeologie a kulturního dědictví byla představena práce *Towards a Photogrammetry*

¹ <https://diglib.eg.org/handle/10.2312/459>

and Virtual Reality Based Heritage Information System: A Case Study of Shawbak Castle in Jordan autorů P. Drapa, A. Duranda, M. Nedira, J. Seinturiera, O. Papiniho, F. Boucaulta, P. Chapmana, W. Vianta, G. Vanniniho a M. Nucciotiho, která se věnuje využití 3D vizualizací historických objektů v rámci většího mezinárodního projektu. Pro vytvoření modelu byl využit systém I-MAGE (Image processing and measure assisted by geometrical primitive), který funguje na principu, kdy uživatel změří vlíčovací body a systém sám realizuje prostorové měření, během kterého uživatel vyhodnocuje, který ze snímků bude použit. Autoři také propojili 3D reprezentaci objektu s databází GIS, vytvořili uživatelské prostředí, které umožňuje spojení získaných dat, jako např. pozorování během vykopávek nebo samotné fotografie, s 3D modelem. [9]

Autoři A. Dhandu, M. Reina Ortiz, A. Weigert, A. Paladini, A. Min, M. Gyi, S. Su, S. Fai, M. Santana Quintero se spolupodíleli na vytvoření vědeckého článku *Recreating Cultural Heritage Environments for VR Using Photogrammetry*. Pojednávají v něm o přetvoření míst kulturního dědictví do virtuální reality pomocí SfM (structure from motion) fotogrammetrie. Konkrétně tento proces demonstrují na chrámu Myin-pya-gu nacházejícím se ve městě Bagan v Myanmaru. Používají tzv. aktivní virtuální realitu, což znamená, že na rozdíl od pasivní VR je systém schopen sledovat jak pohyby hlavy, tak i pohyby těla a uživateli je tak umožněno se ve VR i pohybovat [10].

Vědecký článek *Access to complex reality-based 3D models using virtual reality solutions* od autorů Belena Jiméneze Fernández-Palaciose, Daniela Morabita a Fabia Remondina se věnuje reprezentaci archeologických nalezišť pomocí virtuální reality. Autoři zdokumentovali postupně tři hrobky v Tarquinii v Itálii. Po vytvoření 3D modelů všech objektů byly výsledky zpracovány v softwaru Unity ve spolupráci s dalšími programy, které modely převedly do virtuální reality. Autoři uvádějí i omezení, která s sebou nese převod dat do virtuální reality, jako např. omezený výkon počítačů a s tím spojená časová náročnost nebo nároky na

paměť disku. Výsledné VR slouží nejen k edukativním, ale i vědeckým účelům [11].

Autoři Karsten Lambers, Henri Eisenbeiss, Martin Sauerbier, Denise Kupferschmidt, Thomas Gaisecker, Soheil Sotoodeh, Thomas Hanusch ve svém článku *Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru* popisují na příkladu archeologického naleziště v Peru, jak vytvořit 3D model objektu na základě dat z digitální letecké fotogrammetrie a laserového skenování. Data byla letecky snímána kamerou upevněnou na mini helikoptěře. Tato kombinace laserového skenování a fotogrammetrie se ukázala být velice efektivní, a to jak časově, tak z hlediska přesnosti [12].

Pracovníci Varšavské technologické univerzity K. Choromański, J. Łobodecki, K. Puchała, W. Ostrowski se ve svém článku *Development of Virtual Reality Application for Cultural Heritage Visualization from Multi-source 3D Data* zabývají experimentálním přístupem k rozvoji systému virtuální reality používanému v muzeu Paláce Jana III. ve Varšavě. Postupně byly nasnímány veškeré místnosti, a to jak fotogrammetrickou metodou, tak laserovým skenováním. Následné zpracování proběhlo dvěma různými pracovními postupy, které se lišily softwarovým řešením pro jednotlivé kroky. Následně proběhlo srovnání obou pracovních postupů, přičemž oba daly podobné výsledky [13].

Autoři George Pavlidis, Anestis Koutsoudis, Fotis Arnaoutoglou, Vassilios Tsiouka a Christodoulos Chamzas ve svém článku *Methods for 3D digitization of Cultural Heritage* shrnují některé s užívaných metod 3D digitalizace objektů, které lze využít k uchování kulturního dědictví. Článek je rozdělen do dvou hlavních částí, digitalizace objektů a digitalizace monumentů, obě jsou poté dále děleny na podkapitoly, přičemž každá z nich se věnuje jednomu způsobu digitalizace. Mezi metody, které jsou

v článku zmíněny, patří například digitalizace dat laserového skenování, dat získaných z videa či topografických dat [14].

3 Popis lokality

Archeologické naleziště, kterým se tato práce zabývá, se nachází v blízkosti města Koya v Iráckém Kurdistanu.

Kurdistán je oblast, která zasahuje do pěti blízkovýchodních států (Irák, Turecko, Írán, Sýrie a Arménie), není však uznávaný jako samostatný stát. Jediný Irák však Kurdistanu na svém území uznal jistou autonomii s vlastní vládou, armádou a dalšími institucemi. Irácký Kurdistan se rozkládá v severní části Iráku a obývá ho přibližně 5 milionů obyvatel [15].



Obrázek 1 - Mapa Kurdistanu [16]

. V roce 1979 se k moci dostal Saddám Husajn, jenž má na svědomí genocidu Kurdů v 80. letech 20. století, kdy přišlo o život asi 180 000 lidí a bylo zničeno více než 4 000 vesnic a značné množství historických památek. Irácký Kurdistan dosáhl své autonomie až v roce 1991 po porážce Iráku v Perském zálivu, čehož Kurdové využili a násilným převratem si iráckou část Kurdistanu vydobyli zpět [17].

Koya je jedna z 10 oblastí regionu Erbil, což je zároveň hlavní město Iráckého Kurdistanu. Koya je z východu ohraničená pohořím Zagros a z jihu řekou Malý Záb [1]. Díky archeologickým nálezům lze předpokládat, že oblast Koya byla osídlena již přibližně v roce 2 500 př. n. l. Ze starověkých dob je ve stejnojmenném městě Koya uchováno mnoho kulturního dědictví, jako je citadela aj [18].

V oblasti Koya byly provedeny archeologické práce, které porovnávaly skutečnost s Archeologickým atlasem Iráku z roku 1975 a s daty z družicových snímků. V rámci těchto prací bylo objeveno několik nových nalezišť, včetně naleziště Qala Shila. To se skládá z dvou pahorků spojených menší prohlubní. Qala Shila se nachází poblíž soutoku řek Shalga a Malý Záb a jsou zde mimo jiné i ruiny kláštera, které jsou předmětem této práce [1].



Obrázek 2 - Qala Shila [1]

4 Použité přístroje

V rámci dokumentace byly použity metody blízké fotogrammetrie. Využita byla pozemní blízká fotogrammetrie s ručním snímáním objektu klasickou digitální zrcadlovkou, a dále letecká (dronová) fotogrammetrie.

4.1 Pozemní snímkování

K pozemnímu snímkování objektu byl použit fotoaparát Canon EOS 450D. Jedná se o digitální zrcadlovku disponující funkcemi použitými v řadě profesionálních fotoaparátů Canon EOS-1. Tento model nabízí např. možnost zpracování snímků ve formátu RAW pomocí softwaru Digital Photo Professional, plnou kompatibilitu mezi všemi objektivy Canon EF a Canon EF-S a blesky Speedlite EX, obrazový procesor DIGIC III, integrovaný čistící systém Canon EOS, nebo antiprachový filtr [19]. Parametry kamery jsou podrobně popsány v tabulce 1.

Konkrétní specifikace parametrů fotoaparátu využitých pro tuto práci jsou následující: clona = $f/8$, délka expozice = $1/250$, citlivost ISO - 100 a ohnisková vzdálenost = 18 mm. Fotografováno bylo v režimu preference clony, tedy podle světelných podmínek se měnil čas, ale vzhledem k silnému nasvícení objektu Sluncem byly expoziční časy obecně velmi krátké a smaz snímků byl minimální.



Obrázek 3 - Canon EOS 450D [20]

Tabulka 1 - Parametry fotoaparátu [19]

Obrazový snímač	
Formát snímače	APS-C
Rozlišení	12.2 Mpx
Rozlišení fotografií	3088x2056, 2256x1504, 4272x2848
Obrazový snímač	CMOS
Poměr stran snímku	3:2
Obrazový procesor	
Typ obrazového procesoru	DIGIC III
Objektiv	
Typ objektivu	Canon EF, Canon EF-S
Crop faktor	1.6x
Zaostřování	
Pomocné světlo AF	Blesk
Nastavení expozice	
Korekce expozice	± 3 EV po 1/3 EV, ± 3 EV po 1/2 EV
ISO - minimální citlivost	100
ISO - maximální citlivost	1600
Závěrka	
Nejdelší expoziční čas	30
Nejkratší expoziční čas	1/4000
Fotografování	
Expoziční režimy	Auto, P, A (Av), M, S (Tv)
Rychlost sériového snímání	3,5 sn./s
Scénické režimy	Portrét, Krajina, Detail, Sport, Noční portrét, Bez blesku
Hledáček	
Typ hledáčku	Optický
LCD	
Velikost displeje	3"
Rozlišení displeje	230000
Blesk	
Vestavěný blesk	Ano
Synchronizační čas blesku	1/200
Korekce zábleskové expozice	± 2 EV po 1/3 EV, ± 2 EV po 1/2 EV
Možnost připojení ext. blesku	Ano, hot-shoe
Záznam	
Typ paměťového media	SD / SDHC / SDXC (UHS-I)
Fyzické specifikace	
Rozměry v mm	129x98x62
Hmotnost	475 g

4.2 Letecké snímkování

Letecké snímky byly pořízeny z dronu DJI Phantom 4. Jedná se o dron, který je vybaven 4K ultra HD kamerou, umístěnou na tříosém stabilizovaném závěsu. Dron umožňuje jak ovládání v reálném čase přes aplikaci, tak určení trasy předem, či sledování pohybujícího se objektu. Kamera je schopna mechanické stabilizace obrazu a také dává možnost sklopit kameru kolmo k zemi [21]. Parametry dronu a kamery jsou podrobně popsány v tabulce 2.

Tabulka 2 - Parametry dronu [21]

Dron	
Baterie	Li-Pol 5350 mAh, 15,2 V, 81,3 Wh
Hmotnost baterie	462 g
Celková hmotnost	1380 g
Maximální rychlost	20 m/s
Max. rychlost vzestupu	6 m/s
Max. rychlost sestupu	4 m/s
Maximální nadm. výška	6 km
Maximální letový čas	cca 28 minut
Provozní teplota	5° - 40° C
Satelitní systémy	GPS / GLONASS
Rozsah detekování překážky	15 - 30 m
Kamera	
Senzor	1/2,3"
Rozlišení	12 Mpx
Zorný úhel	94°
Clona	f/2,8
Ostření	od 0,5 m
Rozsah ISO	100 - 1600
Rychlost závěrky	8 - 1/8000 s
Maximální rozlišení obrazu	4000×3000
Fotografické módy	jeden snímek, sériové snímání (3/5/7 snímků), časosběr, bracketing (AEB; 3/5 snímků s odstupem 0,7 EV), HDR
Foto formáty	JPEG, DNG (RAW)

Konkrétní specifikace parametrů kamery využitých pro letecké snímkování jsou následující: délka expozice = $1/120$, citlivost ISO - 100 a ohnisková vzdálenost = 4 mm. Opět se měnil expoziční čas vzhledem k osvětlení objektu Sluncem, zde automaticky.



Obrázek 4 - Dron Phantom 4
[22]

5 Postup zpracování

Obrazová data archeologického naleziště Qala Shila pořídil během expedice v r. 2018 prof. Pavelka (ČVUT, FSv, Katedra geomatiky). Fotografie byly pořízeny jak metodou pozemní fotogrammetrie, tak fotogrammetrií leteckou pomocí dronu. Soubor obsahoval 485 snímků z pozemní fotogrammetrie (použito bylo 476 snímků) a 180 snímků z letecké fotogrammetrie (použity byly všechny). Tyto snímky byly dále zpracovány následujícími postupy.

5.1 Tvorba modelů

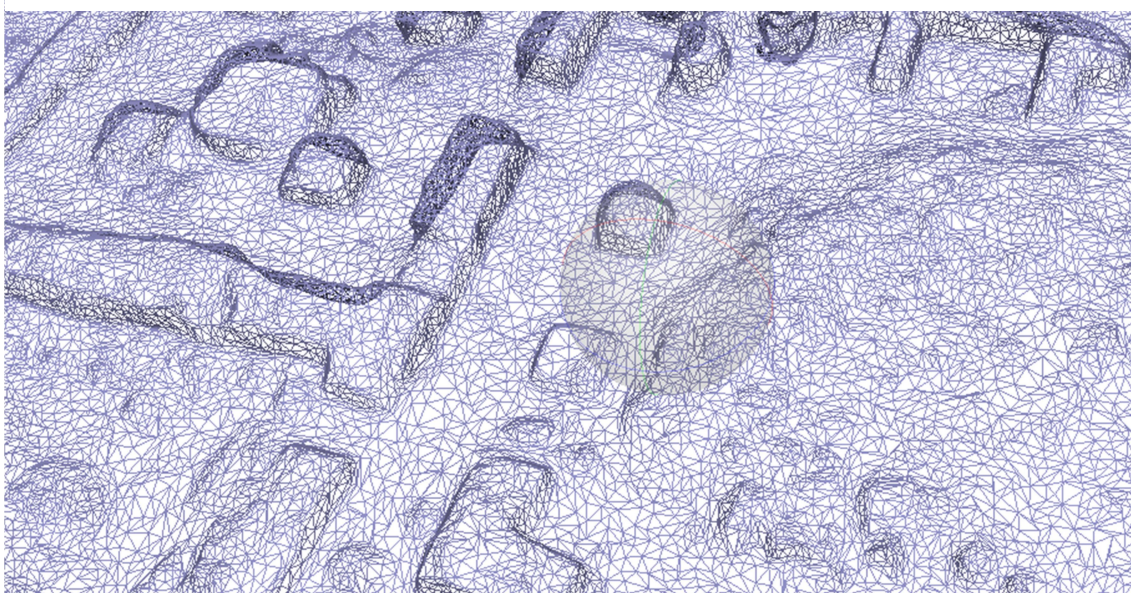
Jedním z cílů této práce bylo vytvořit 3D texturovaný model z dat obou metod a následně tyto modely spojit v jeden. Pro tento účel byl použit program Agisoft Metashape. Snímky byly po nahrání zorientovány a proběhlo svazkové vyrovnání, za využití řídkého mračka bodů. Z tohoto mračka musely být následně selektovány body s nízkou přesností, z bodů zbylých byla optimalizována kalibrace kamer. Na základě známé vnitřní a vnější orientace kamer bylo vypočteno husté mračno. To obsahovalo celkem 66 061 022 bodů z pozemní fotogrammetrie a 40 335 487 bodů z letecké fotogrammetrie. Užití metody pozemní fotografie vytvořilo detailnější model, což je dáno větším počtem snímků a menším odstupem od objektu (tedy i menším pixelem na objektu – GDS-ground sampling distance). Aby byl vytvořen výsledný model, musely být body hustého mračka propojeny trojúhelníkovou sítí. Při vytváření této polygonové sítě je třeba brát ohled na výkon počítače a zvolit odpovídající kvalitu sítě. Vytvořením sítě (mesh) je zároveň hotov výsledný model, kterému byla přiřazena textura z pořízených snímků.



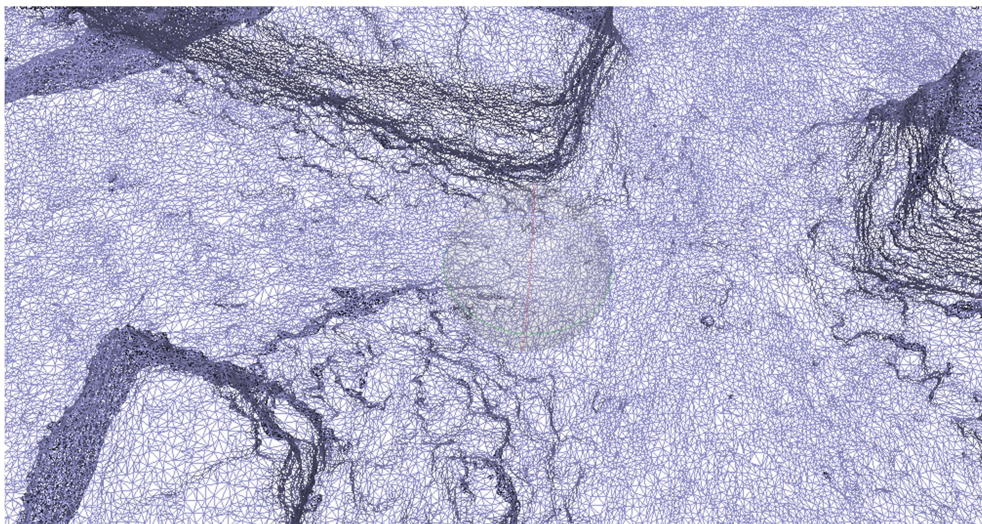
Obrázek 5 - Husté mračno bodů - letecká fotogrammetrie



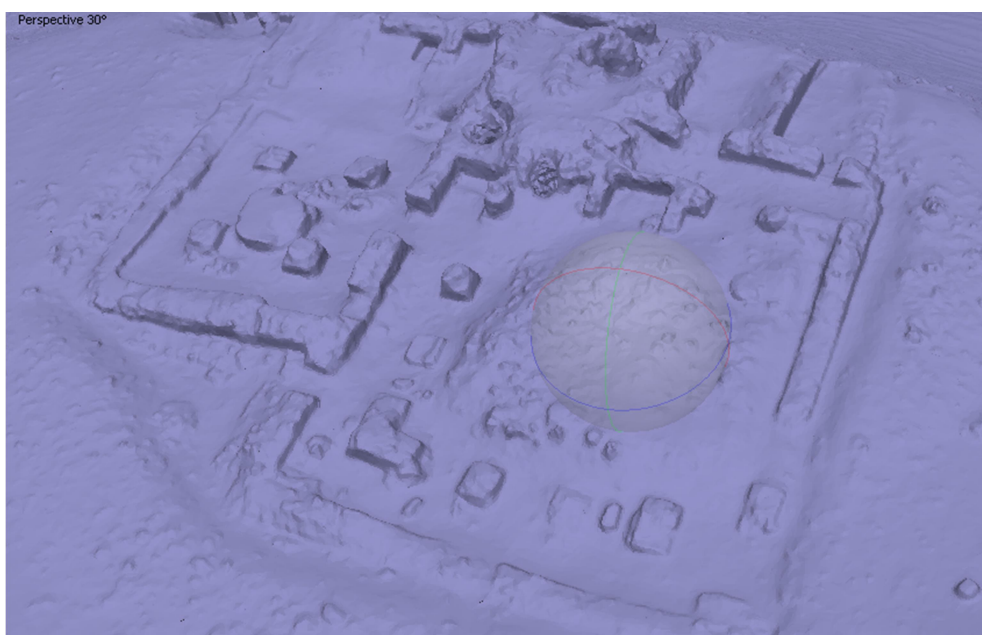
Obrázek 6 - Husté mračno bodů - pozemní fotogrammetrie



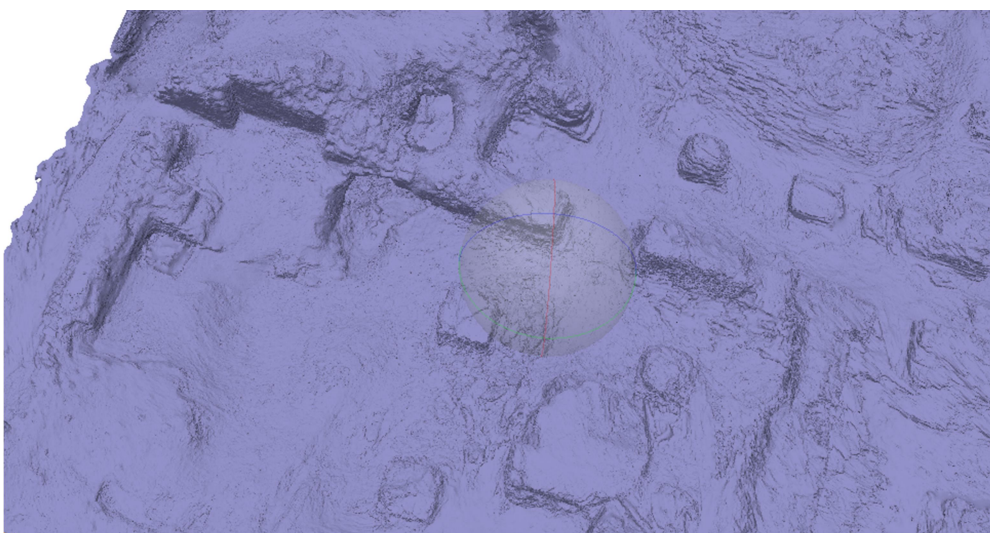
Obrázek 7 - Trojúhelníková síť - letecká fotogrammetrie



Obrázek 8 - Trojúhelníková síť - pozemní fotogrammetrie



Obrázek 9 - Model bez textury - letecká fotogrammetrie



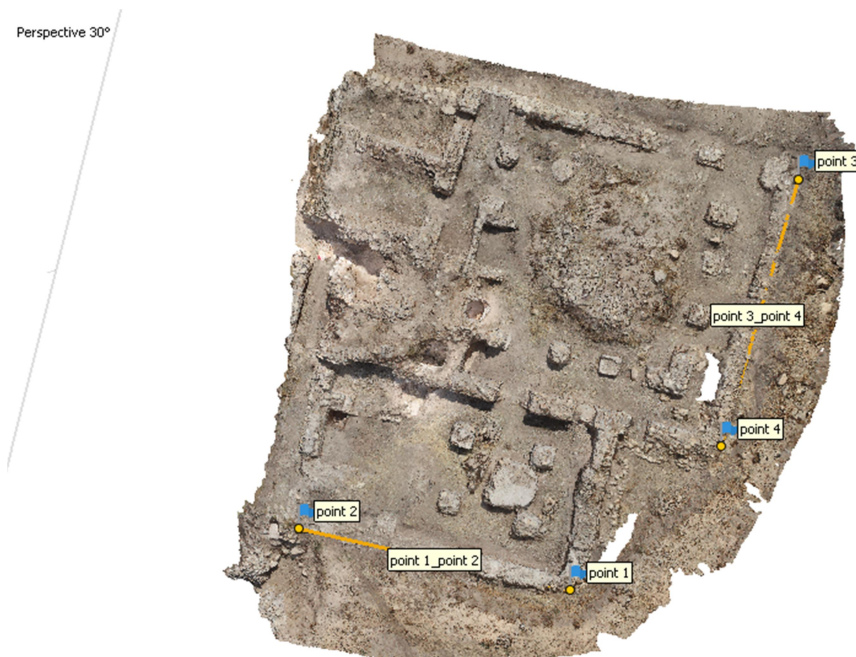
Obrázek 10 - Model bez textury - pozemní fotogrammetrie

Perspective 30°



Obrázek 11 - Model s texturou - letecká fotogrammetrie

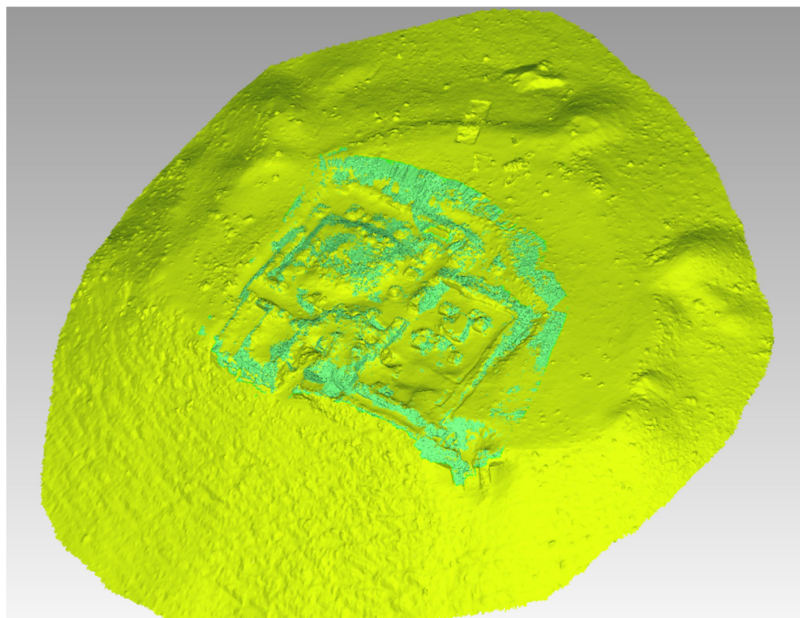
Perspective 30°



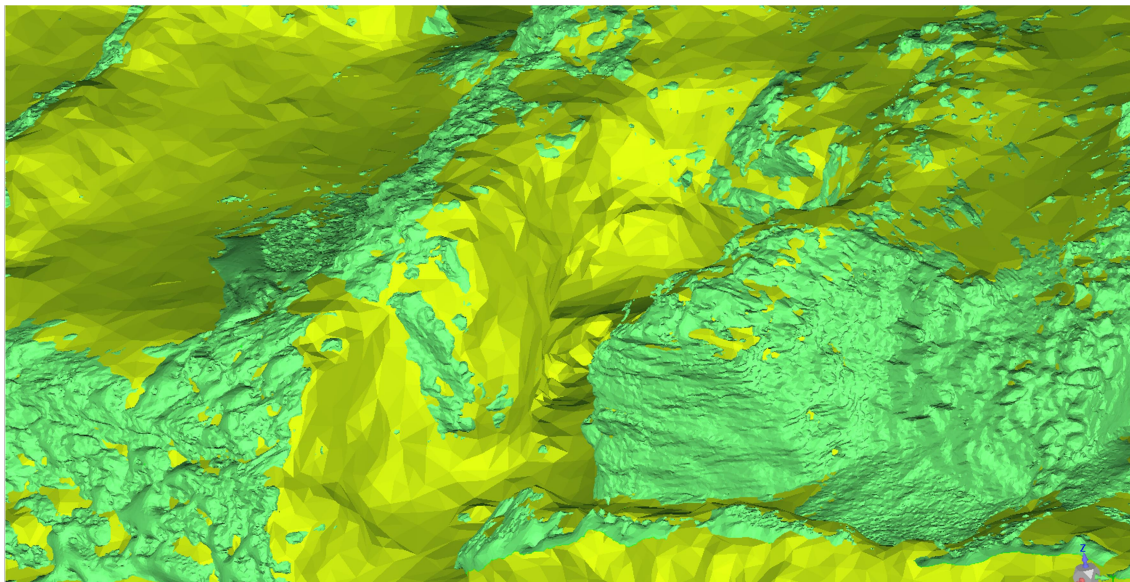
Obrázek 12 – Model s texturou - pozemní fotogrammetrie

5.2 Spojení modelů

Model z letecké fotogrammetrie má daný rozměr díky v dronu zabudované GNSS, kdežto modelu z fotogrammetrie pozemní bylo třeba rozměr manuálně určit. Oba modely byly nahrány do programu Geomagic Wrap. Následně bylo třeba na sebe modely natransformovat, kdy letecký model byl použit jako pevný (tj. neměnný v měřítku, poloze i rotaci) a pozemní model byl referencovaný (měnil měřítko, polohu i rotaci vůči pevnému). Byly zvoleny 3 spojovací body, vhodně rozmístěné po modelech (tvořily přibližně rovnostranný trojúhelník po celém území), a byla provedena přibližná transformace. Následně byla provedena transformace finální, která automatizovaně iteračně porovnává všechny body a přesně zorientuje model z pozemní fotogrammetrie vůči modelu z fotogrammetrie letecké. Mračno bodů z pozemní fotogrammetrie bylo nutno před finálním spojením s druhým modelem detailně oříznout tak, aby se využily všechny vhodné detaily objektu a odstranily řídké, nekompletní a vzdálené části, které vznikají automaticky při metodě obrazové korelace.

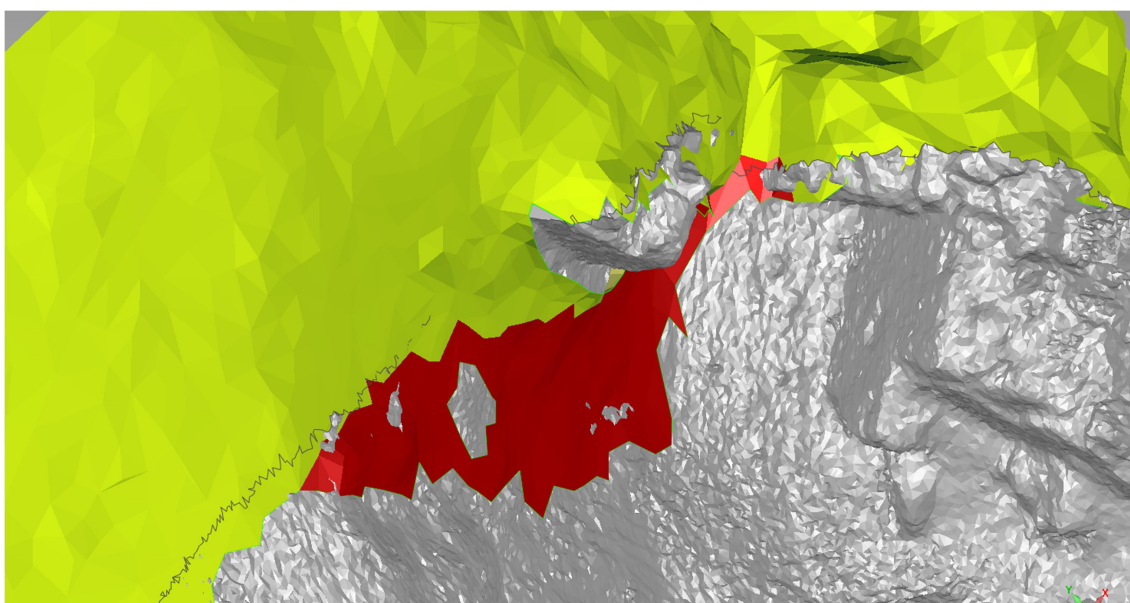


Obrázek 13 - Celkový pohled na neupravené natransformované modely

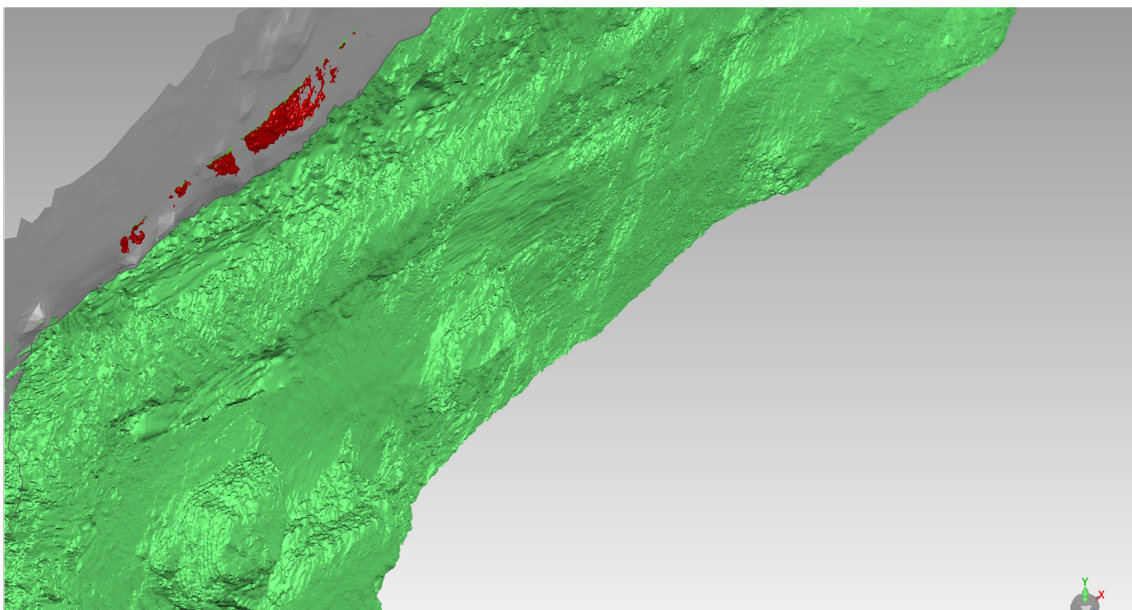


Obrázek 14 - Detail neupravených natransformovaných modelů

Na obrázcích 13 a 14 jsou modely zobrazeny jinou barvou (letecký žlutě a pozemní zeleně) a je vidět, jak se vzájemně překrývají. Dalším důležitým krokem bylo oříznutí obou modelů tak, aby na sebe vzájemně navazovaly a zároveň se zbytečně příliš nepřekrývaly. Pozemní model je přesnější a komplexnější než model letecký, proto bylo důležité, aby v oblasti vykopávek byl zachován právě tento model. Letecký model byl proto z většiny této části území vyříznut. Dále byla důležitá návaznost obou modelů na sebe. Proto byl pozemní model oříznut tak, aby jeho hranice navazovala na hranici leteckého. V celém modelu byly tedy vyhledány části, které na sebe vhodně nenavazovaly, a byly oříznuty.

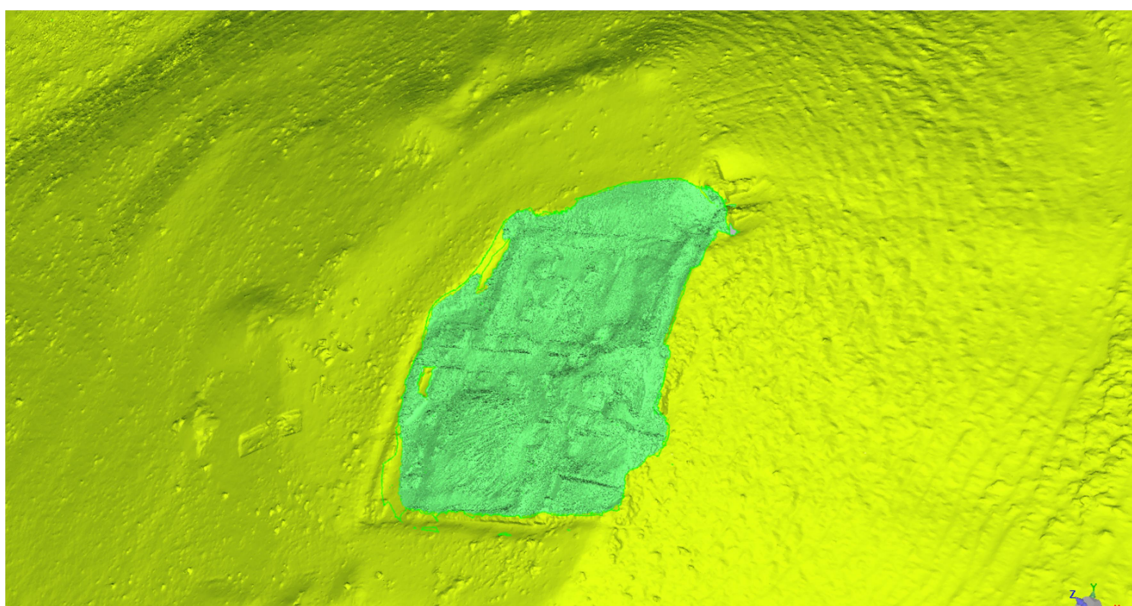


Obrázek 15 - Oříznutí leteckého modelu

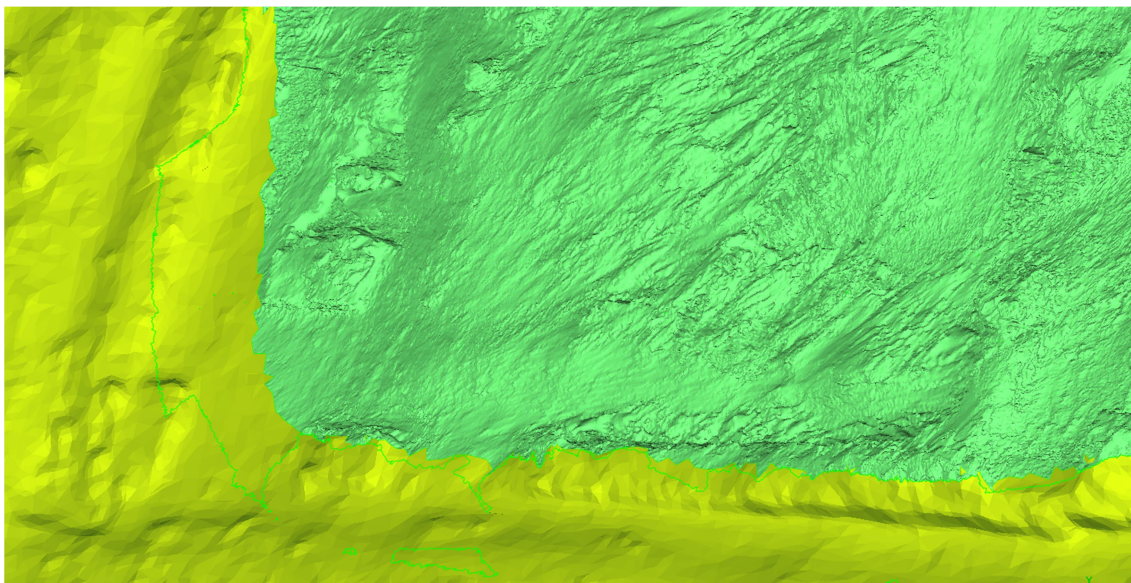


Obrázek 16 - Oříznutí pozemního modelu

Na obrázcích 15 a 16 je vybraná část určena k oříznutí červená a model, který je ořezáván, je barevný. Hranice, kam až sahá druhý model, je zobrazena šedou linií. Na obrázku 10 je názorně vidět, že vybraná část pozemního modelu zbytečně zasahuje do modelu leteckého.



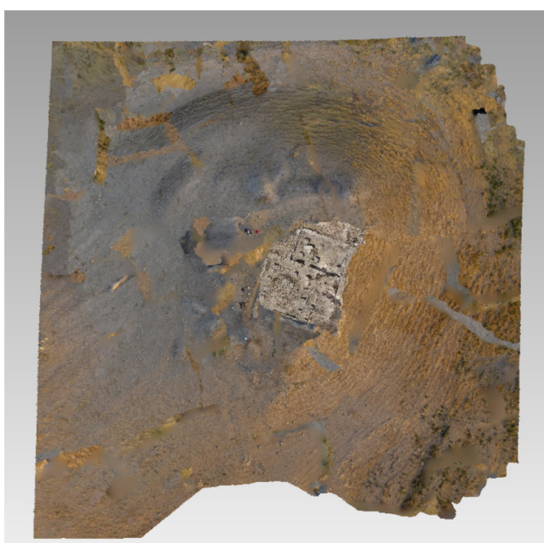
Obrázek 17 - Ořezané modely s navazujícími hranicemi



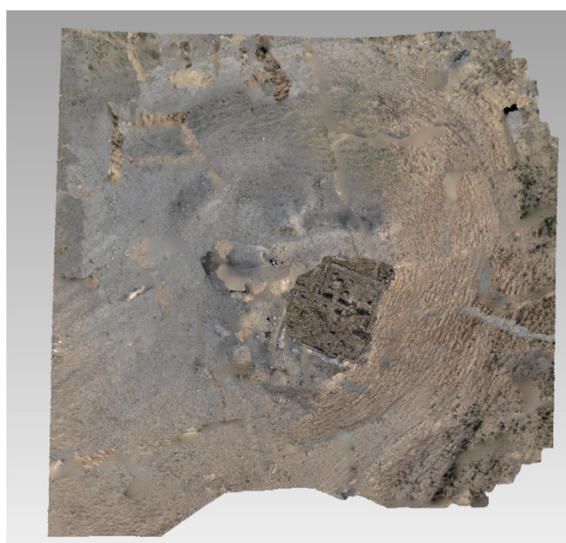
Obrázek 18 - Detail ořezaných modelů

Při ořezávání může nastat situace, kdy se smaže část jednoho modelu, která již nezasahuje do modelu druhého a vznikne tak mezera. Tuto mezeru lze v programu Geomagic Wrap vyplnit tak, že se převezme textura z okolních částí modelu.

Po ořezu se textury obou modelů barevně lišily, proto byla vyexportována textura leteckého modelu z programu Metashape a byla následně jednoduše upravena ve Windows prohlížeči fotografií tak, aby se textury obou modelů vzájemně barevně podobaly. Tato textura byla importována do programu Geomagic Wrap.



Obrázek 19 - Původní textura

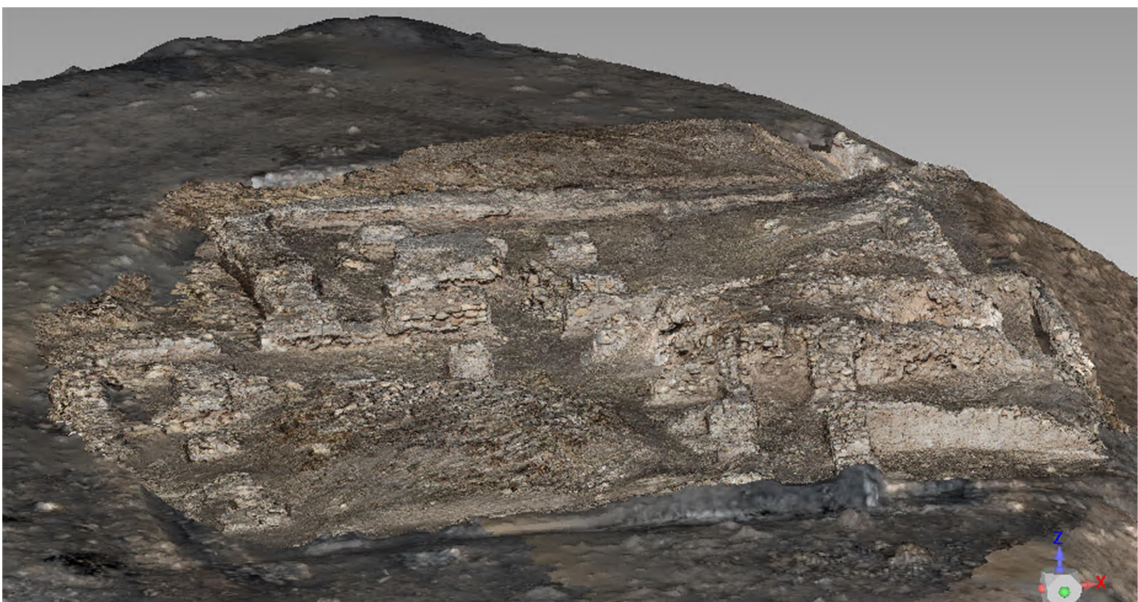


Obrázek 20 - Upravená textura

Posledním krokem bylo oba modely spojit v jeden. Pomocí funkce kombinovat byl tedy vytvořen jeden výsledný model.



Obrázek 21 - Výsledný model



Obrázek 22 - Výsledný model



Obrázek 23 - Detail výsledného modelu



Obrázek 24 - Vstup do podzemí

5.3 Tvorba virtuální reality

V této kapitole je popsán pouze teoretický postup tvorby virtuální reality, samotná virtuální realita nebyla z časových důvodů vytvořena.

Pro tvorbu virtuální reality je využito prostředí Unreal Engine 4. Po založení projektu je vybrána šablona Virtual Reality, která uživateli umožňuje pracovat s předem připravenými funkcemi. Před importem modelu je nutné ještě vybrat správnou mapu pro fungování a orientaci

v prostoru, která definuje herní prostředí (osvětlení vnějšího virtuálního světa, příp. hraniční stěny či podlaha) [23].

Pro import modelu do prostředí UE4 je nutné dodržet maximální počet trojúhelníků v polygonové síti modelu (10 milionů). V případě, že je počet trojúhelníků vyšší, je třeba model zdecimovat (snížit počet trojúhelníků), případně model rozdělit na více částí, což se doporučuje kvůli jednodušší práci s velkými objekty. V prostředí UE4 lze potom modely jednoduše spojit zpět dohromady [24]. Před importem je ještě nutné převést model do formátu FBX, ve kterém umí prostředí UE4 pracovat. Automaticky se naimportuje i textura [23].

Po importu lze modelu nastavit tzv. kolizní systém, který způsobí, že hranice modelu nejsou průchozí a fungují jako stěny [24]. Následně je možné model obalit různými geometrickými tvary (v případě této práce by byl na obalení nejvhodnější kvádr), kterým lze nastavit vhodné virtuální okolí (např. obloha), které lze získat buď fotogrammetrickou metodou, anebo si odpovídající okolí stáhnout z internetu. Kvůli obalu neproniká na model žádné světlo, je proto nutné dodat zdroj světla.

Po dokončení všech kroků je model exportován do formátu EXE, ve kterém je možné si virtuální realitu prohlédnout na výkonných počítačích či VR headsetech [23].

6 Závěr

V rámci této bakalářské práce byly vyhotoveny dva prostorové modely archeologického naleziště Qala Shila. Jedná se o model z pozemní fotogrammetrie a model z letecké fotogrammetrie. Tyto modely byly spojeny v jeden finální.

Vzhledem k dnešním softwarovým možnostem je tvorba modelů zčásti automatizovaná, po prvotním nastavení parametrů není potřebný výrazný zásah uživatele. Ten v podstatě hlavně hlídá, zda průběžné výsledky kvalitativně odpovídají jeho požadavkům a provádí drobné úpravy. Spojování modelů je nicméně o něco náročnější. Uživatel musí brát na vědomí několik faktorů, ať už měřítko jednotlivých modelů (programy mají problém pracovat s modely s výrazně odlišným, případně zcela nedefinovaným měřítkem) nebo lišící se zpracování textury v jednotlivých programech. Zabere tedy značné množství času vybrat správný postup, jak modely spojovat.

Z důvodu omezených výkonnostních možností počítače nebyly modely vytvářeny v nejvyšší možné kvalitě (např. omezený počet trojúhelníků při tvorbě polygonové sítě). To je pozorovatelné např. při přiblížení na detail modelu (jsou viditelné jednotlivé plošky trojúhelníků).

Vzhledem k tomu, že při pozemní fotogrammetrii bylo pořízeno více fotografií než při letecké fotogrammetrii a zároveň jsou snímky detailnější, je pozemní model přesnější, což potvrzuje i větší počet bodů v hustém mračnu.

Tvorba virtuální reality byla přiblížena alespoň teoreticky, samotná realizace nebyla z časových důvodů provedena. Tvorba virtuální reality podle nastíněného postupu je možností pro další pokračování této práce.

Výstupem této bakalářské práce je spojený prostorový model.

7 Seznam literatury

- [1] PAPPI, Cinzia. *The Archaeological Survey of Koi Sanjaq/Koya (Iraqi Kurdistan): Scientific Investigations and Teaching Programs* [online]. [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: https://www.academia.edu/31288643/In_the_Field_The_Survey_of_Koya
- [2] ABER, James, Irene MARZOLFF a Johannes B. RIES. *Small-format aerial photography: principles, techniques and geoscience applications* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2010, 15-22, 23-39, 69-80, 81-89, 91-118 [cit. 2021-11-16]. ISBN 978-0-444-53260-2 Add to Citavi project by ISBN. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/book/9780444532602/small-format-aerial-photography>
- [3] THORMAHLEN, Thorsten a Hans-Peter SEIDEL. *3D-Modeling by Ortho-Image Generation from Image Sequences*. ACM Transactions on Graphics [online]. Saarbrucken, 2008, 27(3) [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/1360612.1360685>
- [4] POLLEFEYS, Marc, Luc VAN GOOL, Maarten VERGAUWEN, Frank VERBIEST, Kurt CORNELIS, Jan TOPS a Reinhard KOCH. *Visual Modeling with a Hand-Held Camera*. International Journal of Computer Vision [online]. Nizozemsko, 2004 [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1023/B:VISI.0000025798.50602.3a.pdf>
- [5] OGLEBY, C. L. *From Rubble to Virtual Reality: Photogrammetry and the Virtual World of Ancient Ayutthaya, Thailand*. *The Photogrammetric Record* [online]. 2003, 16(94) [cit. 2021-11-16]. ISSN 0031-868X. Dostupné z: doi:10.1111/0031-868X.00145
- [6] KERSTEN, Thomas P. *Virtual Reality Model of the Northern Sluice of the Ancient Dam in Marib/Yemen by Combination of Digital Photogrammetry and Terrestrial Laser Scanning for Archaeological Applications*.

International Journal of Architectural Computing [online]. 2007, 5(2) [cit. 2021-11-16]. Dostupné z: doi:10.1260/1478-0771.5.2.340

[7] OBRADOVIĆ, Miloš, Ivana VASILJEVIĆ, Isidora ĐURIĆ, Jelena KIĆANOVIĆ, Vesna STOJAKOVIĆ a Ratko OBRADOVIĆ. Virtual Reality Models Based on Photogrammetric Surveys—A Case Study of the Iconostasis of the Serbian Orthodox Cathedral Church of Saint Nicholas in Sremski Karlovci (Serbia). Applied Sciences [online]. 2020, 10(8) [cit. 2021-11-16]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app10082743

[8] KAUFMAN, John, Morag CLEMENT a Allan EW RENNIE. Reverse Engineering Using Close Range Photogrammetry for Additive Manufactured Reproduction of Egyptian Artifacts and Other Objets d'art2. Journal of Computing and Information Science in Engineering [online]. 2015, 15(1) [cit. 2021-12-15]. ISSN 1530-9827. Dostupné z: doi:10.1115/1.4028960

[9] DRAP, Pierre, A. DURAND, M. NEDIR, et al. Towards a Photogrammetry and Virtual Reality Based Heritage Information System: A Case Study of Shawbak Castle in Jordan [online]. 2006 [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: doi:10.2312/VAST/VAST06/067-074

[10] DHANDA, A., M. REINA ORTIZ, A. WEIGERT, et al. RECREATING CULTURAL HERITAGE ENVIRONMENTS FOR VR USING PHOTOGRAMMETRY: A Case Study of Shawbak Castle in Jordan. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences [online]. 2019, 42(2) [cit. 2021-12-15]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-305-2019

[11] JIMÉNEZ FERNÁNDEZ-PALACIOS, Belen, Daniele MORABITO, Fabio REMONDINO, et al. Access to complex reality-based 3D models using virtual reality solutions: A Case Study of Shawbak Castle in Jordan. Journal of Cultural Heritage [online]. 2017, 23(2) [cit. 2021-12-15]. ISSN 12962074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2016.09.003

- [12] LAMBERS, Karsten, Henri EISENBEISS, Martin SAUERBIER, et al. Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modelling of the Late Intermediate Period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru: A Case Study of Shawbak Castle in Jordan. *Journal of Archaeological Science* [online]. 2007, 34(10) [cit. 2021-12-15]. ISSN 03054403. Dostupné z: doi:10.1016/j.jas.2006.12.008
- [13] CHOROMAŃSKI, K., J. ŁOBODECKI, K. PUCHAŁA, et al. Development Of Virtual Reality Application For Cultural Heritage Visualization From Multi-source 3D Data: A Case Study of Shawbak Castle in Jordan. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* [online]. 2019, 42(2) [cit. 2021-12-15]. ISSN 2194-9034. Dostupné z: doi:10.5194/isprs-archives-XLII-2-W9-261-2019
- [14] PAVLIDIS, George, Anestis KOUTSOUDIS, Fotis ARNAOUTOGLOU, et al. Methods for 3D digitization of Cultural Heritage: A Case Study of Shawbak Castle in Jordan. *Journal of Cultural Heritage* [online]. 2007, 8(1) [cit. 2021-12-15]. ISSN 12962074. Dostupné z: doi:10.1016/j.culher.2006.10.007
- [15] Irácký Kurdistan: Národ v nemilosti, který stojí na rozcestí. 100+1 zahraniční zajímavost [online]. 2018 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.stoplusjednicka.cz/iracky-kurdistan-narod-v-nemilosti-ktery-stoji-na-rozcesti>
- [16] Irácký Kurdistan. 100+1 zahraniční zajímavost [online]. 2018 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.stoplusjednicka.cz/iracky-kurdistan-narod-v-nemilosti-ktery-stoji-na-rozcesti>
- [17] Kdo jsou Kurdové a co to znamená cestovat do Kurdistanu? HedvabnaStezka.cz | cestování, poznávání, dobrodružství [online]. Praha, 2020 [cit. 2021-11-25]. Dostupné z: <https://www.hedvabnastezka.cz/kdo-jsou-kurdove-a-co-to-znamená-cestovat-do-kurdistanu/>
- [18] AL QAISI, H. M. Ways to protect the cultural heritage of Koya district. *First International Symposium on Urban Development: Koya as a Case*

Study [online]. Southampton: WIT Press, 2013, 2013-12-16 [cit. 2021-11-25]. ISBN 9781845648886 Add to Citavi project by ISBN. Dostupné z: doi:10.2495/ISUD130221

[19] Canon EOS 450D tělo | Megapixel. Megapixel.cz - digitální fotoaparáty a videokamery Sony, Canon, Nikon, Olympus, Panasonic a další | Megapixel [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.megapixel.cz/canon-eos-450d#section-parameters>

[20] Canon EOS 450D + 18-55 EF-S IS | MALL.CZ. MALL.CZ – bílé zboží, elektronika, PC, outdoor, hobby, hračky, kosmetika, chovatelské potřeby [online]. [cit. 2021-12-14]. Dostupné z: <https://www.mall.cz/digitalni-fotoaparaty/canon-eos-450d-ef-s-18-55-is>

[21] DJI Phantom 4 | RobotWorld.cz. ROBOT WORLD - obchod s robotickými pomocníky [online]. [cit. 2021-12-15]. Dostupné z: <https://www.robotworld.cz/dji-phantom-4>

[22] Zboží.cz | Tisíce obchodů na jednom místě. Zboží.cz | Tisíce obchodů na jednom místě [online]. [cit. 2021-12-16]. Dostupné z: <https://www.zbozi.cz/vyrobek/dji-phantom-4/fotogalerie/>

[23] KÝHOS, Martin. Využití blízké fotogrammetrie v podzemních prostorech spojené s moderními metodami vizualizace [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/95915/F1-DP-2021-Kyhos-Martin-DP__2021__Kyhos__text.pdf?sequence=-1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta stavební, Katedra geomatiky. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka.

[24] HUDEČEK, Martin. Dokumentace historických objektů malými laserovými skenery a vizualizace pomocí VR [online]. Praha, 2021 [cit. 2022-01-09]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/95898/F1-DP-2021-Hudecek-Martin-Martin__Hudecek__dp-final.pdf?sequence=-

1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta stavební, Katedra
geomatiky. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Karel Pavelka.

8 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Parametry fotoaparátu [19].....	14
Tabulka 2 – Parametry dronu [21]	15

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Mapa Kurdistánu [16]	14
Obrázek 2 - Qala Shila [1]	155
Obrázek 3 – Canon EOS 450D [20].....	156
Obrázek 4 – Dron Phantom 4 [22].....	14
Obrázek 5 – Husté mračno bodů - letecká fotogrammetrie.....	15
Obrázek 6 – Husté mračno bodů - pozemní fotogrammetrie.....	14
Obrázek 7 – Trojúhelníková síť - letecká fotogrammetrie	15
Obrázek 8 – Trojúhelníková síť - pozemní fotogrammetrie.....	22
Obrázek 9 – Model bez textury - letecká fotogrammetrie.....	22
Obrázek 10 – Model bez textury - pozemní fotogrammetrie	22
Obrázek 11 – Model s texturou - letecká fotogrammetrie.....	15
Obrázek 12 – Model s texturou - pozemní fotogrammetrie.....	23
Obrázek 13 - Celkový pohled na neupravené natransformované modely.....	24

Obrázek 14 - Detail neupravených natransformovaných modelů.....	25
Obrázek 15 - Oříznutí leteckého modelu	25
Obrázek 16 - Oříznutí pozemního modelu	26
Obrázek 17 - Ořezané modely s navazujícími hranicemi.....	26
Obrázek 18 - Detail ořezaných modelů	27
Obrázek 19 - Původní textura	27
Obrázek 20 – Upravená textura	27
Obrázek 21 – Výsledný model.....	28
Obrázek 22 – Výsledný model.....	28
Obrázek 23 – Detail výsledného modelu.....	29
Obrázek 24 – Vstup do podzemí	29