

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Veronika VÁVROVÁ

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

OBOR GEODÉZIE, KARTOGRAFIE A GEOINFORMATIKA

PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Tvorba a úpravy trojúhelníkové sítě pro vytvoření
3D modelu hradu Helfenburk u Úštěka

Creation and optimalization of mesh model
of the castle Helfenburk near Ústěck

Vedoucí práce: Ing. Bronislav Koska, Ph.D.

Katedra speciální geodézie



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE


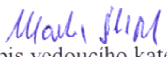
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE



Příjmení: Vávrová	Jméno: Veronika	Osobní číslo: 439227
Zadávající katedra: Katedra speciální geodézie		
Studijní program: Geodézie a kartografie		
Studijní obor: Geodézie, kartografie a geoinformatika		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Tvorba a úpravy trojúhelníkové sítě pro vytvoření 3D modelu hradu Helfenburk u Úštěka	
Název bakalářské práce anglicky: Creation and optimization of mesh model of the castle Helfenburk near Ústěka	
Pokyny pro vypracování: Fotogrammetrické zaměření hradu Helfenburk u Úštěka. Kombinace mračen bodů z laserového skenování a fotogrammetrie. Vytvoření trojúhelníkové sítě (mesh) z kombinovaného mračenja bodů. Optimalizace trojúhelníkové sítě.	
Seznam doporučené literatury: Štroner, M. - Pospíšil, J. - Koska, B. - Křemen, T. - Urban, R. - et al.: 3D skenovací systémy. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2013. 396 s. ISBN 978-80-01-05371-3, 2013.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Bronislav Koska, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 1.3.2017	Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 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

Tato bakalářská práce se zabývá zaměřením hradu Helfenburk u Úštěka a následným vytvořením jeho 3D modelu. Hrad byl podrobně zaměřen metodou letecké a pozemní fotogrammetrie.

Práce pojednává o zaměřovaném hradu a o teoretickém základu použité metody. Dále je uvedeno existující převzaté měření hradu metodou laserového skenování a popsán postup vlastního fotogrammetrického měření. Letecké snímky byly pořízeny pomocí hexakoptéry a pozemní snímkování bylo provedeno digitálními fotoaparáty. Na závěr je sepsán postup zpracování všech získaných dat. Výsledné společné mračno bodů je v S-JTSK (Souřadnicový systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální) a Bpv (Výškový systém baltský - po vyrovnání). Pro vyhotovení a úpravy trojúhelníkové sítě byl využit software Geomagic Studio společně se softwary SurfaceTrimmer a PoissonRecon.

Výsledkem zpracování je 3D trojúhelníkový model hradu. Veškeré zpracování v software Agisoft PhotoScan provedl spolužák Michal Novotný, který také vytvořil textury modelu. Společným výstupem obou prací je texturovaný 3D model hradu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotogrammetrie, trojúhelníková síť, mračno bodů, hrad Helfenburk u Úštěka, 3D model

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the measurement of castle Helfneburk near Ústěšk and subsequent creation of its 3D model. The castle was measured in detail by method of aerial and terrestrial fotogrammetry.

The thesis is about the measured castle and the theoretical bases of the used method. Further there is mentioned the existing taken measurement of the castle by the method of laser scanning and described the process of own photogrammetric measurement. The aerial pictures were taken by Hexacopter and the terrestrial shooting was done with digital cameras. In conclusion there is described the process of processing of all acquired data. The final united point cloud is in the coordinate system S-JTSK (Datum of Uniform Trigonometric Cadastral Network) and the height system Bpv (Baltic Vertical Datum - After Adjustment). For creating and andjusing the triangular mesh was used software Geomagic Studio together with softwares SurfaceTrimmer and PoissonRecon.

The result of the processing is the 3D triangular model of the castle. All processing in software Agisoft PhotoScan was done by classmate Michal Novotný, who also created the textures of the model. The common output of the both works is textured 3D model of the castle.

KEYWORDS

Photogrammetry, triangular mesh, point cloud, castle Helfenburk near Ústěšk, 3D model

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracovala pod vedením vedoucího bakalářské práce samostatně a že jiné zdroje nebo prostředky než ty, které jsou uvedeny v seznamu referencí, nebyly použity. Dále prohlašuji, že tato bakalářská práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze, dne 28. 5. 2017

.....

Veronika Vávrová

PODĚKOVÁNÍ

Mé poděkování patří Ing. Bronislavu Koskovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování bakalářské práce věnoval. Dále děkuji mému spolužákovi Michalovi Novotnému, za spolupráci jak při fotogrammetrickém měření, tak při tvorbě výstupu. Poděkování patří také panu Ing. Bohumilu Michalíkovi a panu Ing. Jakubovi Jonovi ze společnosti G4D za pořízení leteckých snímků hradu Helfenburk.

V neposlední řadě také děkuji mé rodině a blízkým za vstřícnost a podporu během celého studia.

Obsah

Význam zkratk	9
Úvod	10
1 Hrad Helfenburk u Úštěka	11
1.1 Základní informace a poloha hradu.....	11
1.2 Popis hradu.....	12
1.3 Historie hradu.....	13
2 Fotogrammetrie	14
2.1 Rozdělení metod fotogrammetrie.....	14
2.2 Základní informace o technologii letecké fotogrammetrie.....	15
2.2.1 Způsoby snímkování.....	15
2.2.2 Druhy měřických komor.....	16
2.2.3 Faktory ovlivňující snímkování.....	17
2.2.4 Výhody a nevýhody letecké fotogrammetrie.....	17
2.3 Základní informace o technologii pozemní fotogrammetrie.....	18
2.3.1 Způsoby snímkování.....	18
2.3.2 Druhy měřických komor.....	19
2.3.3 Faktory ovlivňující snímkování.....	19
2.3.4 Výhody a nevýhody pozemní fotogrammetrie.....	20
3 Měření hradu Helfenburk	21
3.1 Předchozí měření.....	21
3.1.1 Vybudování geodetického bodového pole.....	21
3.1.2 Pozemní laserové skenování.....	21
3.1.3 Data z leteckého laserového skenování z ČÚZK.....	22

3.2	Vlastní měření.....	23
3.2.1	Snímkování pomocí letecké fotogrammetrie	23
3.2.2	Snímkování pomocí pozemní fotogrammetrie	25
4	Zpracování.....	27
4.1	Zpracování fotografických snímků.....	27
4.2	Tvorba společného mračna bodů z laserového skenování a fotogrammetrického měření	28
4.3	Tvorba trojúhelníkové sítě v softwaru PoissonRecon	29
4.4	Nastavení parametrů v softwaru SurfaceTrimmer.....	30
4.5	Srovnání výstupů	31
4.6	Úprava trojúhelníkové sítě v softwaru Geomagic	31
5	Výsledky	35
6	Závěr	37
	Použitá literatura	38
	Seznam obrázků	40
	Seznam tabulek.....	41
	Seznam příloh.....	42

Význam zkratek

UAV	Bezpilotní letadlo (z anglického <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>)
UMK	Univerzální měřická komora
GNSS/INS	Zařízení pro určování polohy a orientace v prostoru (z anglického <i>Global Navigation Satellite System/Inertial Navigation System</i>)
CCD	Elektronická součástka pro snímání obrazové informace (z anglického <i>Charge-coupled device</i>)
RAM	Polovodičová paměť počítače (z anglického <i>Random-access memory</i>)
CPU	Centrální procesorová jednotka (z anglického <i>Central processing unit</i>)

Úvod

Helfenburk je zřícenina hradu nedaleko města Ústěku v Severočeském kraji, o jehož běžný provoz a údržbu se stará občanské sdružení Hrádek. Na základě žádosti členů tohoto sdružení byla se zástupci Katedry speciální geodézie z ČVUT vytvořena ústní dohoda o vytvoření 3D modelu hradu s texturami.

Pro tvorbu 3D modelu byla nejprve získána data z leteckého laserového skenování daného území z Českého úřadu zeměměřického a katastrálního a převzata mračna bodů celého hradního komplexu pořízená metodou pozemního laserového skenování, jež realizovali v roce 2014 studenti ČVUT. Pro doplnění těchto dat bylo provedeno vlastní měření metodou pozemní a letecké fotogrammetrie. Pro připojení výsledného modelu hradu do souřadnicového systému S-JTSK a výškového systému Bpv bylo využito již dříve vybudovaného bodového pole.

Tato práce je rozdělena do několika částí. V první kapitole je čtenář seznámen se základními informacemi o zaměřovaném hradu a zmíněna je i jeho stručná historie. Druhá kapitola se zabývá teoretickým základem použité technologie. Je zde uveden způsob snímání, faktory ovlivňující přesnost měření a výhody a nevýhody pozemní i letecké fotogrammetrie. Další kapitola shrnuje měření provedená v předchozích letech a popisuje polní práce realizované za pomoci profesionálních pilotů UAV. Zbývající části práce se zabývají zpracováním převzatých a naměřených dat a tvorbou 3D modelu.

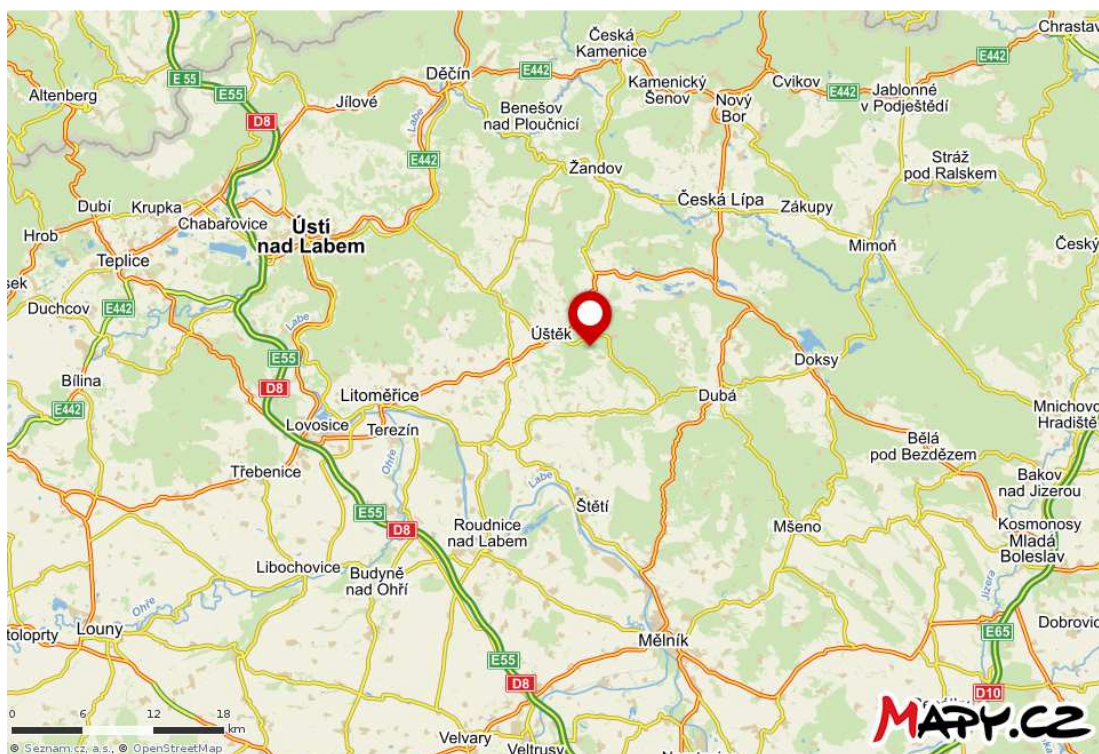
Hlavním cílem této bakalářské práce je vytvoření a úprava trojúhelníkové sítě pro vytvoření 3D modelu s texturami hradu Helfenburk u Ústěka, který by měl být vystaven v hradní věži a sloužit k prezenčním účelům. Model v digitální podobě bude využit pro rekonstrukci původní podoby hradu a využití najdou i vybrané snímky z různých úhlů pohledu.

1 Hrad Helfenburk u Úštěka

V této kapitole jsou uvedeny základní informace o zaměřovaném hradu Helfenburk u Úštěka. Pro úplnost je zde zmíněna jak poloha a popis hradu, tak i jeho stručná historie.

1.1 Základní informace a poloha hradu

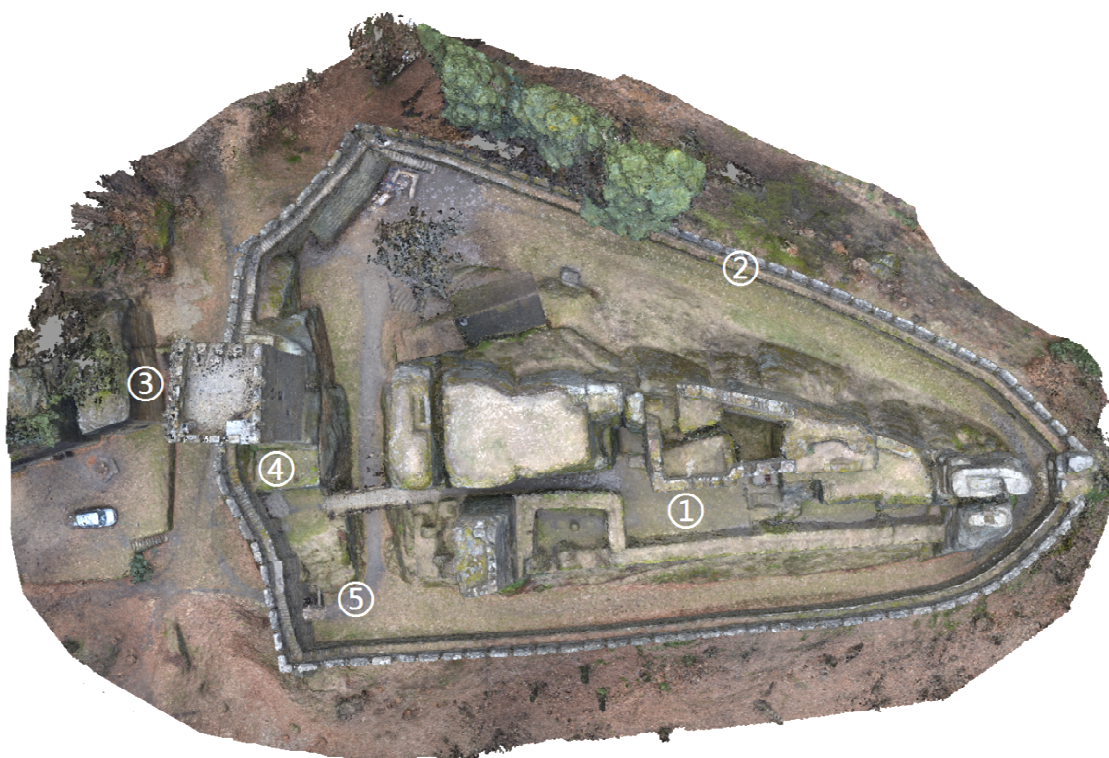
Helfenburk u Úštěka, který byl v průběhu jeho historie známý též pod názvem Hrádek, Hradec nebo Hradištko, je zřícenina hradu z poloviny 14. století vzdálená asi 2,5 km východně od města Úštěk, jež se nachází v okrese Litoměřice v severních Čechách (Obr.1). Od roku 1958 je chráněn jako kulturní památka České republiky. Hrad spadá do katastrálního území Rašovice u Kalovic a vlastníkem objektu je město Úštěk. Areál hradu je zpřístupněn veřejnosti po celý rok, věž dominující celému objektu se otevírá každý víkend v roce (včetně zimních měsíců). Z města Úštěk vede ke zřícenině několik turisticky značených cest. [1] [2] [3]



Obr. 1: Poloha hradu Helfenburk (www.mapy.cz)

1.2 Popis hradu

Helfenburk patřil mezi největší hrady v severních Čechách a byl postaven na skalnatém pískovcovém hřebeni nad Hrádeckým potokem. Hradní komplex (Obr. 2) se skládal ze dvou celků (vnitřního jádra ① a vnějšího opevnění ②), které byly postaveny v jiné době i v jiném stavebním slohu. Vnitřní část byla založena na vrcholu pískovcového hřebene, který na východní straně přechází v náhorní rovinu. Odtud dříve vedla jediná příjezdová cesta ③, k níž se hrad obracel z obranných důvodů širší částí. Vstupní brána do hradu byla chráněna hlubokým příkopem a padacím mostem. Vstup pro pěší byl umístěn napravo od této brány ④. Vnější opevnění, postavené o několik let později, obklopilo jádro hradební zdi s dominantní čtverhrannou věží v čele a zabezpečilo vstupní stranu novým vyzděným příkopem. Tím vznikla nová cesta do hradu skrz dolní bránu ⑤, která spojovala oba hradní celky. Jelikož se pískovcový hřeben rozpadl na tři skalní bloky, je v dnešní době zachováno pouze zdivo v prostředním bloku. Věž stojící na odděleném skalním bloku byla v 19. století kompletně renovována. [1] [2]



Obr. 2: Schéma hradu Helfenburk u Úštěka

1.3 Historie hradu

Podle dochovaných záznamů byl hrad založen před rokem 1375 Janem z Klinštějna, členem šlechtického rodu Ronovců. Pražský arcibiskup Jan Očko z Vlašimi koupil r. 1375 od Jana z Helfenburku nově postavený hrad, který je tak poprvé doložen, a učinil ho středem nového panství na pravém břehu Labe. Mezi roky 1375 - 1379 byly postaveny hradby měřící v obvodu 277 m a vysoké 12 m, ukončené cimbuřím, v němž byly střílny. Nejvýznamnějším držitelem Hrádku byl synovec Jana Očka, Jan z Jenštejna, který nechal mezi roky 1390 - 1395 postavit hlavní věž a v téže době vzniklo i nové opevnění.

Již před vládou posledního arcibiskupa Konráda z Vechty byly na Hrádek převezeny některé klenoty, relikvie a knihy Svatovítského chrámu a pražských biskupů. Část z nich přečkaly v hradní kapli husitské války, které v tu dobu propukly. Od druhé poloviny 15. století hrad postupně vlastnilo mnoho majitelů a na počátku třicetileté války byl úplně opuštěn, vypleněn a snad i zapálen. Kolem r. 1720 byla na Hrádku zřízena myslivna.

V 19. století, v době romantismu, byla zřícenina cílem poutníků, včetně slavného spisovatele K. H. Máchy. Roku 1871 koupil hrad textilní průmyslník Josef Scroll, který dal následující rok postavit na Hrádku novou hájenku. Za jeho vlády byl hrad dále opravován, ale později se začal znovu rozpadat. Dnes jsou ve vnitřním hradu jen malé zbytky zděných staveb, zachovaly se pouze sklepy. V roce 1967 začali dobrovolníci zchátralý hrad pod odborným vedením zabezpečovat. Byly částečně opraveny hradby s věží a byl zahájen průzkum objektu. [1] [2]

2 Fotogrammetrie

Tato kapitola shrnuje nejdůležitější informace o použité technologii, kterou je fotogrammetrie. První podkapitola je pro přehled věnovaná rozdělení metod vybrané technologie a ve zbylé části kapitoly jsou popsány principy měření, faktory ovlivňující měření a výhody a nevýhody letecké a pozemní fotogrammetrie.

2.1 Rozdělení metod fotogrammetrie

„Fotogrammetrie je věda, způsob a technologie, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které lze získat z obrazového, nejčastěji fotografického záznamu.“ (mezinárodní definice, ISPRS)

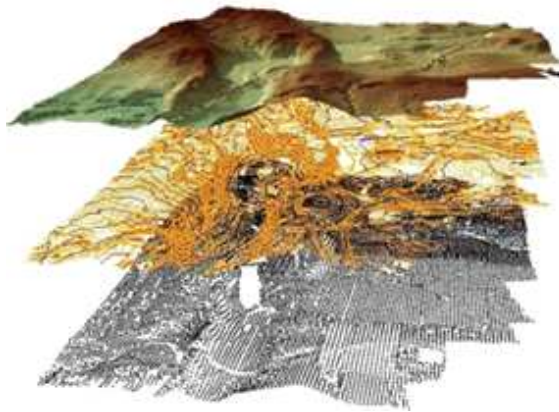
Data získaná touto technologií slouží pro následné zpracování, studium a tvorbu analýz, prováděných nejčastěji pomocí geografických informačních systémů (GIS). Tento obor můžeme dělit podle různých kritérií. Dle polohy stanoviště dělíme fotogrammetrii na pozemní, leteckou a družicovou, z pohledu konfigurace a počtu snímků rozlišujeme fotogrammetrii jednosnímkovou a vícesnímkovou a v neposlední řadě lze fotogrammetrii dělit také dle typu výstupu, jež může být grafický nebo numerický (číselný).

U jednosnímkové metody je možné získat pouze dvojrozměrné souřadnice, neboť matematickým základem je kolineární transformace, převod prostorových souřadnic na rovinné. Pro její řešení je třeba čtyř vlíčovacích bodů značených přirozenou či umělou signalizací. Jelikož ve vztazích definujících tuto transformaci nevystupují žádné fotogrammetrické proměnné, vyplývá z toho, že lze pro tuto metodu použít libovolnou komoru s malou distorzí, aniž bychom znali její parametry.

Pokud u vícesnímkové metody mají snímky zhruba rovnoběžné osy záběru, tak se pro vyhodnocení jeho obsahu používá umělého stereoskopického vjemu. Ten umožňuje vytváření prostorových modelů a metodě se říká *stereofotogrammetrie*. V případě konvergentních os záběru hovoříme o *průsekové fotogrammetrii*, u které lze snímky vyhodnotit pouze bodově za předpokladu, že lze stejný bod určit minimálně na dvou snímcích. [5]

2.2 Základní informace o technologii letecké fotogrammetrie

Počátkem 20. století se začala letecká fotogrammetrie rozvíjet jako nová metoda bezkontaktního určování souřadnic prostorových objektů, umožňující ve zlomku vteřiny zachytit celou zájmovou oblast. Díky využití GNSS navigací, umožňujících určovat prvky vnější orientace snímků přímo při letu, se tato technologie v posledních pár letech stala velmi pokrokovou. Jednosnímková metoda našla uplatnění při tvorbě fotoplánů a pro dokumentační účely (např. v archeologii nebo v kriminalistice). Vícesnímková metoda je využívána při zhotovování map, které slouží k projektování staveb, úpravě pozemků a evidenci půdy, dále při dokumentaci oblastí ohrožovaných přírodními živly a pro tvorbu digitálních modelů povrchu či terénu (Obr. 3). Hlavním typem je stereometoda, kdy z měřených rovinných souřadnic totožných bodů na dvou snímcích stereodvojice lze vypočítat jejich prostorové souřadnice. [5]



Obr. 3: Digitální model terénu (<http://www.mdpgeo.cz/24857-fotogrammetrie>)

2.2.1 Způsoby snímkování

Na základě stanovení účelu a požadované přesnosti je určena výška letu, typ měřické komory a přibližné měřítko snímku. Pokud jsou vybrány liniové objekty, je snaha snímkovat v ose těchto objektů. Podélný překryt jednotlivých snímků je obvykle volen 60-80 % a příčný překryt by měl být mezi 20-40 %. Nakonec je důležité ještě vypočítat počet snímků v řadě a v bloku a expoziční čas. Pro určení všech těchto parametrů a hodnot jsou v dnešní době využívány speciální programy propojené s navigační technologií DGPS (diferenciální globální polohový systém), díky níž je velmi snadné navedení na náletové osy. Aby výsledky GNSS a inerciálního navigačního systému GNSS/INS byly přesné, je potřeba síť referenčních stanic GNSS.

GNSS/INS sloužící k navigaci letu je tvořen soustavou gyroskopů určujících náklon systému vzhledem k tížnici, akcelerometrů pro měří zrychlení a DGPS, který opravuje měření zatížená systematickými chybami. Pokud jsou snímky analogové, je potřeba je ještě před vyhodnocením digitalizovat pomocí speciálního skeneru. [5]

2.2.2 Druhy měřických komor

S rychlým rozvojem mikroelektroniky, navigační technologie GNSS a přídavných zařízení prodělaly komory v nedávné době významný rozvoj. Zařízení GNSS/INS umožňuje v rychlém sledu přesně určovat prostorovou orientaci a polohu letecké komory a v čase určit prvky vnější orientace (poloha projekčního centra a tři rotace kolem základních os), což dříve nebylo možné.

Klasická letecká komora pro stereoskopické snímkování se skládá z těla komory, objektivu, uzávěrky, filtrů, závěsu a kazety na film, který je převíjen pohonným mechanismem v těle komory. Mezi transportní prostředky, které dopraví měřickou komoru nad snímané území, patří: letadlové laboratoře, letadla, vrtulníky a řízené bezpilotní prostředky a modely. Výběr správného nosiče závisí na průměrné výšce plánovaného snímkování. U digitálních záznamových systémů nelze výsledný korigovaný obraz zpracovat na běžných stanicích pro stereofotogrammetrii, jelikož se nejedná o středové promítání a princip stereoskopie. Z tohoto důvodu někteří výrobci podporují tvorbu klasického snímku, avšak při tomto řešení nastává problém při konstrukci maticového senzoru CCD s velkým rozlišením.



Obr. 4: Komora UltraCam D (<http://www.hyvista.com/technology/sensors/ultracam/>)

Pokud vyžadujeme rozlišovací schopnost srovnatelnou s filmovými komorami, lze zvolit ze dvou způsobů řešení. Buď je nutno fotografovat několika maticemi postupně a výsledný snímek složit, nebo dát dohromady více matic a fotografovat v jednom okamžiku. Digitální letecké komory většinou obsahují 3 kamery pro složení černobílého obrazu a další 4 mírně divergentní kamery pro získání barvy (Obr. 4). Výhodou digitálních komor je, že umožňují snímat za zhoršených světelných podmínek. [5]

2.2.3 Faktory ovlivňující snímkování

Letecké snímkování je závislé převážně na počasí. Je nevhodné snímkovat při silném větru, dešti či za jasného slunečného dne. Snímkové lety se uskutečňují převážně na jaře a na podzim, kdy pro zobrazení terénu a zachycení co nejvíce informací ze zájmové lokality nebrání vegetace či sněhová pokrývka.

Dalším faktorem je přesnost určení prvků vnější orientace, které je v dnešní době prováděno s velkou přesností pomocí GNSS. Orientace vzhledem k zemskému povrchu se neustále mění z důvodu nestability trajektorie leteckého nosiče. Pro ostrost snímků je dále nutná eliminace smazu. Kompenzace pohybu se provádí buď posunem filmu během expozice, nebo náklonem komory. U letecké fotogrammetrie se při přesnějších pracích nedá zanedbat ani vliv atmosférické refrakce a chyba ze zakřivení Země. Samozřejmostí je používání kamer, u kterých byla provedena justáž (kontrola, seřízení a rektifikace) a kalibrace (určení prvků vnitřní orientace). [5]

2.2.4 Výhody a nevýhody letecké fotogrammetrie

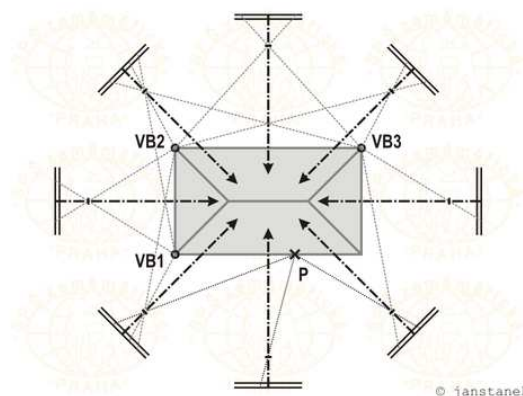
Hlavním důvodem využívání letecké fotogrammetrie je fakt, že na snímek lze zachytit značně větší plocha než z pozemního snímání, což vede ke zrychlení pracovního procesu a minimalizaci práce v terénu. Velmi hodnotné pro následné zkoumání a vyhodnocení je i věrné zobrazení terénu, který není nijak zidealizován. Díky moderní technologii je rozlišovací schopnost leteckých snímků mnohem větší než rozlišovací schopnost lidského oka. Mezi nevýhody se řadí menší přesnost (např. při tvorbě map velkých měřítek) a vysoká finanční nákladnost jak na realizaci snímkového letu, tak na samotné měřické vybavení. [6]

2.3 Základní informace o technologii pozemní fotogrammetrie

Historie vzniku fotogrammetrie sahá až do roku 1032, kdy bylo poprvé popsáno středové promítání, na jehož principu vzniká fotografický snímek. Díky vynálezům jako je dalekohled, fotografie, stereokomparátor, barevný film či přenosná paměťová karta, se tato metoda v dnešní době uplatňuje nejen v geodézii, ale i v lékařství, ve stavebnictví nebo pro územní plánování. Jednosnímková metoda je používána pro tvorbu fotoplánů (např. fasád budov) a pro dokumentační práce. Průřezová fotogrammetrie, nejstarší fotogrammetrická metoda, byla s příchodem výpočetní techniky znovuobjevena a dnes je hojně využívána pro tvorbu 3D modelů menších rozměrů. [5]

2.3.1 Způsoby snímkování

Při použité jednosnímkové metody je v ideálním případě osa záběru kolmá na objekt a měřítko snímku je konstantní, toho lze však v realitě jen těžko dosáhnout. Obraz je potom perspektivně zkreslen a měřítko je proměnné. U průřezové metody (Obr. 5) je pro vyhodnocení exteriéru malých objektů optimální poříditi 8 snímků (4 frontální a 4 diagonální). Počet konvergentních snímků je samozřejmě odvíjen od rozměrů a členitosti zaměřovaných objektů. Podmínkou je, aby měly dostatečný překryt pro identifikaci tzv. spojovacích bodů, které nejsou geodeticky měřeny a jsou voleny až na snímcích. Dále je nutné zaměřit geodeticky alespoň 6-10 vlíčovacích bodů. Při prostorovém vyhodnocení tří a více snímků je prováděna kontrola a vyrovnání. [5]



Obr. 5: Princip průřezové metody

(<http://spszem.cz/pro-studenty/studijni-materialy/grantove-projekty>)

2.3.2 Druhy měřických komor

Pokud známe u komory přesné prvky vnitřní orientace (souřadnice hlavního snímkového bodu, konstantu komory a popř. průběh distorze objektivu), lze je označit jako měřické. Prvky vnitřní orientace (PVO) lze určit laboratorně, nebo jsou známy přímo od výrobce. V praxi se nejčastěji určují výpočtem ve vhodném softwaru při využití svazkového vyrovnání, kdy je výpočet prováděn z několika snímků kalibračního pole pořízených s různým náklonem a natočením kamery. Klasické analogové komory jsou v dnešní době nahrazeny digitálními, které jsou sice mobilnější a levnější, ale na druhou stranu nedosahují takové optické kvality a pracují s menším formátem. Mezi historické komory jsou řazeny komory s vodorovnou osou záběru (např. fototeodolit PhoTheo) konstruované pro skleněné desky nízké citlivosti, širokoúhlé komory s naklonitelnou osou záběru typu UMK známé pro svou vysokou optickou kvalitu nebo dvojité komory používané pro velmi blízkou stereofotogrammetrii, které mají pevnou základnu, a tudíž mají částečně standardizované PVO. Důležité je zmínit i původně neměřické *réseau* komory, které mají před rovinou snímku připevněnou planparalelní skleněnou destičku s referenční mřížkou, tvořenou pravoúhlou sítí křížků s konstantním rozstupem. Pomocí těchto křížků, jež jsou viditelné na snímku, lze určit deformaci filmového materiálu a definovat souřadnicový systém pro měření snímkových souřadnic. Tyto komory jsou při výrobě kalibrovány a jsou určeny jejich PVO.

Od 90. let minulého století se rychle vyvíjí digitální fotoaparáty, které mají v dnešní době již rozměr matic odpovídající kinofilmu (24x35mm) a díky vysoké citlivosti CCD umožňují expozici již od 1/8000s. Výhodou digitálních komor je možnost okamžitého zhodnocení fotografie v terénu, digitální formát záznamu, stálost rozměru obrazu a opakované kopírování snímků. [5] [7]

2.3.3 Faktory ovlivňující snímkování

Mezi hlavní faktory mající špatný vliv na pořizování snímků patří především optické vady (tzv. aberace) mající vliv na kvalitu zobrazení a zkreslení (tzv. distorze) objektivu. Distorze objektivu jsou vady působící na geometrii zobrazení a přesnost měření způsobené geometrickými nepřesnostmi při výrobě objektivů. Touto vadou jsou zatíženy převážně neměřické komory, které se však kvůli pořizovací ceně v pozemní

fotogrammetrii používají nejčastěji. Řešením je určení distorzí analytickými metodami a zavedením početních oprav, nebo použití speciálního softwaru, jenž umožňuje průběh distorze vypočítat z nadbytečného počtu měření na více snímcích.

U jednosnímkové fotogrammetrie je dalším faktorem vliv hloubkové členitosti. U hloubkově členitých budov se významně projevuje rozdíl mezi pravoúhlým průmětem a středovým průmětem snímku, který způsobuje radiální distorzi podrobných bodů. [5]

2.3.4 Výhody a nevýhody pozemní fotogrammetrie

Výhodou pozemního snímkování je cenová dostupnost a velmi důležitá je i vysoká vypovídací schopnost a dokumentační hodnota fotografií. Naopak nedostatkem této metody je vzájemné zakrytí jednotlivých částí prostorově členitých objektů, kvůli kterému se nedají některé oblasti snímku vyhodnotit. Pozemní fotogrammetrie se s výhodou používá tam, kde zeměpisná poloha, nadmořská výška nebo klimatické podmínky znemožňují použití fotogrammetrie letecké. [5] [6]

3 Měření hradu Helfenburk

V této kapitole jsou nejprve stručně uvedena všechna předchozí zaměření hradu, ze kterých byla částečně převzata data, a poté je podrobně popsán pracovní postup vlastního fotogrammetrického měření.

3.1 Předchozí měření

Předchozí měření hradu byla uskutečněna mezi roky 2014 a 2015 studenty ČVUT v Praze, v jejichž bakalářských a diplomových pracích lze najít podrobné informace o způsobu zaměření a následném zpracování získaných dat. Pro tuto bakalářskou práci byla převzata výsledná mračna bodů z laserového skenování vytvořená Ing. Janou Poesovou, Ing. Marií Tichou, Ing. Martinem Touškem a Ing. Petrou Dífkovou, v rámci jejich diplomových prací.

3.1.1 Vybudování geodetického bodového pole

V roce 2014 bylo v okolí a uvnitř hradu vybudováno Ing. Lukášem Vosykou v rámci jeho diplomové práce geodetické bodové pole za účelem možnosti připojení 3D modelu vytvořeného z laserového skenování do S-JTSK a Bpv. Souřadnicové připojení bylo provedeno pomocí kontrolních bodů, jejichž souřadnice byly převzaty z bodového pole. Jako základ bodového pole byly zvoleny 2 nejvyšší body zaměřené pomocí technologie GNSS. [4]

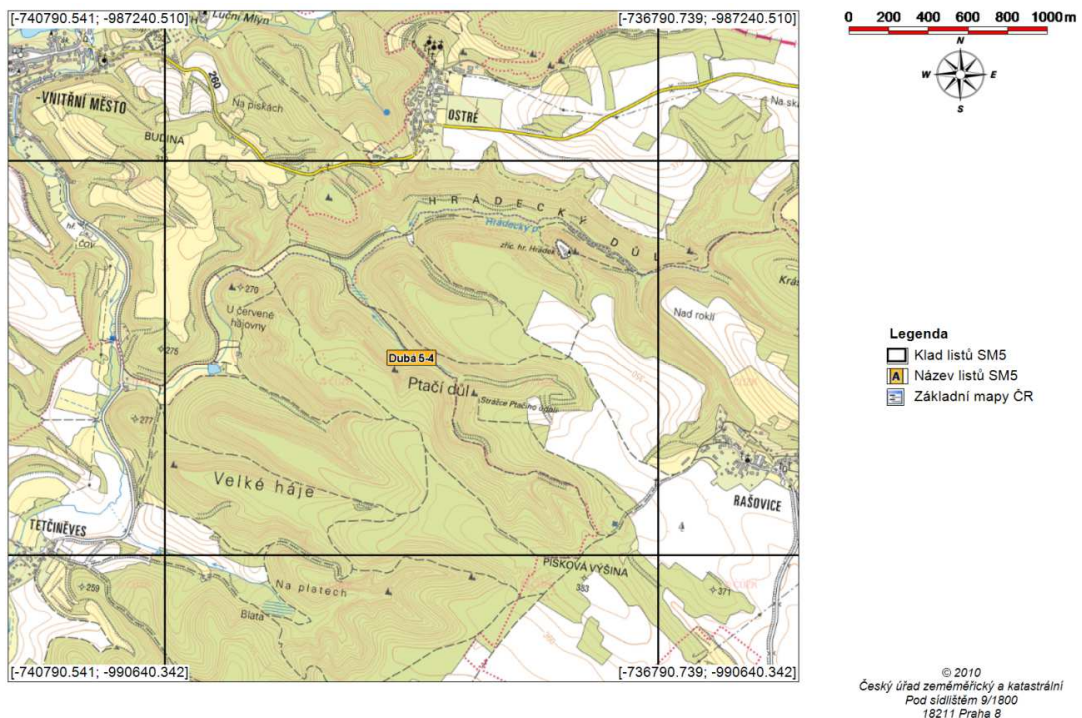
3.1.2 Pozemní laserové skenování

Po vybudování geodetického bodového pole následovalo zaměření hradu metodou laserového skenování. Celkem bylo pořízeno 91 skenů v areálu hradu a 36 skenů uvnitř hradní věže pomocí laserového skeneru Trimble TX5. Před samotným měřením byly v zájmové lokalitě umístěny šachovnicové a kulové terče pro usnadnění registrace mračen a transformaci modelu do zvolených souřadnicových systémů. Stanoviska pro skenování exteriéru byla vybrána tak, aby byl dodržen dostatečný překryt skenovaných oblastí s nejméně dvěma kulovými terči na každém skenu. Pro spojení skenů vnitřní a vnější části hradu byly tyto kulové terče umístěny na horní část hradních zdí tak, aby byly vidět z obou stran. Z časových důvodů bylo skenování provedeno bez barevné informace a vzdálenost dvou bodů měřených ve vzdálenosti 10 m od skeneru byla

natavena 6,136 mm v exteriéru, 7,670 mm ve všech místnostech věže a 12,272 mm pro schodiště věže. Celkem byla provedena dvě kontrolní měření, jejichž cílem bylo určit přesnost výsledného 3D modelu a odhalit případné deformace nebo systematické chyby registrovaného mračna bodů. První bylo realizováno již během laserového skenování, druhé bylo uskutečněno v roce 2015 za účelem zhodnocení přesnosti porovnáním prostorových délek získaných měřením polární metodou pomocí totální stanice Trimble M3 a odečtených z modelu hradu. Celkem bylo zaměřeno 79 kontrolních bodů, z nichž 66 bylo identifikováno v mračnu bodů. [4]

3.1.3 Data z leteckého laserového skenování z ČÚZK

Aby bylo možné 3D model hradu zasadit do okolní krajiny, bylo na internetovém obchodě Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK) požádáno o data z leteckého laserového skenování, a to konkrétně o digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G) a digitální model povrchu České republiky 1. generace (DMP 1G) pro jednotku (mapový list) Dubá 5-4 (Obr. 6). Data byla z úřadu zaslána elektronicky ve formátu *.xyz. Důvod objednání 2 druhů dat byl ten, že data DMP obsahují i vegetaci, budovy a jiné uměle postavené objekty a data DMR zobrazují pouze přirozený či zemskou činností upravený zemský povrch. [8] [9]



Obr. 6: Mapový list Dubá 5-4 [10]

3.2 Vlastní měření

Vlastní měření metodou letecké i pozemní fotogrammetrie bylo uskutečněno dne 8. 3. 2017 pod dohledem místního správce hradu pana Chourka, který je členem občanského sdružení Hrádek, jež hradilo finanční náklady na pořízení leteckých fotografií. Před samotným měřením byla provedena důsledná rekognoskace terénu. Na jejím základě bylo vhodně zvoleno nastavení měřicích pomůcek (viz. kapitola 3.2.1) a odhadnut počet letů.

Celkem bylo pořízeno 2091 snímků (z toho 1060 snímků pozemně a 1031 snímků letecky). Počasí téměř bez větru a bez deště se zataženou oblohou tvořilo ideální podmínky pro snímkování.

3.2.1 Snímkování pomocí letecké fotogrammetrie

Letecké snímky byly pořízeny panem Ing. Bohumilem Michalíkem a panem Ing. Jakubem Jonem ze společnosti G4D, která se specializuje na laserové skenování, letecké snímkování, tvorbu digitálních 3D modelů a další geodetické práce. Pro naše snímkování byla použita hexakoptéra od firmy HiSystems GmbH (Obr. 7), jež nesl digitální fotoaparát Nikon Coolpix A. Společnost G4D má bezpilotní systémy a jejich piloty registrovány u Úřadu pro civilní letectví, konkrétně tato hexakoptéra nese poznávací značku OK-X002D. [11]



Obr. 7: Hexakoptéra (HiSystems GmbH)

Jelikož hrad je obklopen vysokými stromy, nebylo možné použít bezpilotního systému navigovaného pomocí GNSS. Před samotným vzletem však bylo nutné zajistit viditelnost nejméně 6 družic GNSS, aby bylo možné určovat výšku letu. Hexakoptéra byla ovládána pomocí dvou rádiových ovladačů. První ovladač zobrazoval na přídavném displeji obraz zaznamenaný fotoaparátem a sledované údaje jako je letová výška či napětí baterií pohánějící hexakoptéru, tudíž sloužil k navigaci a rozhodování o délce letu. Druhý ovladač byl použit pro ovládání letecké trajektorie pomocí zabudovaného kompasu, ke změně pozorovacího úhlu kamery a k pořizování jednotlivých fotografií. Aby byl dodržen dostatečný překryt snímků, byla velmi důležitá při snímkování vzájemná komunikace pilota a navigátora. Velmi lehká konstrukce tohoto nosiče zaručuje poměrně dlouhé časové lety, jež mohly trvat 15 až 20 min. Hradní komplex byl celkově nasnímán na 7 letů.

Použitý fotoaparát Nikon Coolpix A vyniká kvalitou obrazu s nízkým šumem a vysokou mírou detailů. Vybrané technické specifikace tohoto fotoaparátu a parametry nastavení použité při leteckém snímkování jsou uvedeny v Tab. 1 a Tab. 2.

Tab. 1: Technická specifikace fotoaparátu Nikon Coolpix A [12]

Vlastnost	Hodnota
Celkový počet pixelů	16,93 MPx
Typ snímače	APS-C CMOS
Velikost snímače	23,6 x 15,6 mm
Typ objektivu	NIKKOR
Optický zoom	1x
Rozsah ohnisek (reálný)	18,5 mm
Zaostřování	AF-S, AF-F, MF

Tab. 2: Nastavení fotoaparátu Nikon Coolpix A pro leteckou fotogrammetrii

Vlastnost	Hodnota
Délka expozice	1/640 s
Rychlost ISO	400
Formát záznamu	NEF (RAW)
Rozlišení fotografií	4928 x 3264 pixelů

3.2.2 Snímkování pomocí pozemní fotogrammetrie

Měření metodou pozemní fotogrammetrie bylo realizováno ihned po dokončení veškerých prací při letecké fotogrammetrii. Snímky vnitřního paláce byly pořízeny spolužákem Michalem Novotným a snímky hradeb z vnitřní i vnější části byly doplněny mnou. V závislosti na terénu bylo snímáno ze vzdálenosti 2 - 20 m od objektu, jelikož požadavkem bylo dosáhnout na výsledných fotografiích centimetrové přesnosti. Aby software pro výpočet 3D modelu správně identifikoval identické body na snímcích, bylo nutné dodržet minimální překryt snímků 60 - 80 %. Oproti původnímu plánu pořídit všechny fotografie pomocí fotoaparátu Nikon Coolpix A, byl pro snímkování interiéru vnitřního paláce z důvodu malé kapacity Li-Ion akumulátoru použit fotoaparát Nikon Coolpix L810. V Tab. 3 jsou uvedeny technické specifikace tohoto fotoaparátu.

Tab. 3: Technická specifikace fotoaparátu Nikon Coolpix L810 [13]

Vlastnost	Hodnota
Celkový počet pixelů	16,44 MPx
Typ snímače	1/2,3" CCD
Velikost snímače	přibližně 6,16 x 4,62 mm
Typ objektivu	NIKKOR
Optický zoom	26x
Rozsah ohnisek (reálný)	4,0 - 104 mm
Zaostřování	AF-S

Kvalita digitálního fotoaparátu Nikon Coolpix L810 (Obr. 8) je oproti fotoaparátu Nikon Coolpix A (Obr. 9) výrazně nižší a nelze u něj ani zvolit formát záznamu NEF (Nikon Electronic Format - RAW formát upravený firmou Nikon). Fotoaparát byl nastaven na automatický režim, přičemž hodnota ISO byla proměnlivá a optický zoom byl ponechán v krajní hodnotě. Dalším omezujícím faktorem při pořizování snímků touto kamerou byla horší světelná viditelnost. Z těchto důvodů jsou pořízené snímky zatíženy nadměrným šumem. Parametry nastavení jednotlivých fotoaparátů jsou uvedeny v Tab. 4 a v Tab. 5.

Tab. 4: Nastavení fotoaparátu Nikon Coolpix A pro pozemní fotogrammetrii

Vlastnost	Hodnota
Délka expozice	1/320 s
Rychlost ISO	400
Formát záznamu	NEF (RAW)
Rozlišení fotografií	4928 x 3264 pixelů

Tab. 5: Nastavení fotoaparátu Nikon Coolpix L810 pro pozemní fotogrammetrii

Vlastnost	Hodnota
Formát záznamu	JPEG
Rozlišení fotografií	4608 x 3456 pixelů

U obou digitálních fotoaparátů bylo nastaveno automatické ostření, a tak došlo při pořízení každé fotografie k malému posunu optické soustavy čoček. Kalibrační protokoly fotoaparátů byly získány až při pozdějším zpracování v programu Agisoft PhotoScan.



Obr. 8: Nikon Coolpix L810 [13]



Obr. 9: Nikon Coolpix A [12]

4 Zpracování

V této kapitole je popsáno zpracování získaných dat od zorientování snímků, přes tvorbu trojúhelníkové sítě, až po tvorbu 3D modelu s texturami. Pro hromadné zpracování měření z laserového skenování a fotogrammetrického měření bylo nutné použít více speciálních softwarů. V této bakalářské práci je podrobně popsán postup práce v softwarech PoissonRecon, SurfaceTrimmer a Geomagic a zpracování dat v ostatních softwarech je detailněji popsáno v bakalářské práci Michala Novotného.

Vyhodnocení tak velkého objemu dat je velmi náročné jak na výpočetní výkon procesoru, tak grafické karty (při zobrazení mračna bodů a modelu). Z tohoto důvodu bylo veškeré zpracování a výpočty provedeny na výkonném počítači na Katedře speciální geodézie, jehož konfigurace je uvedena v Tab. 6. Postup práce byl proveden na základě rad a zkušeností vedoucího práce, na základě informací získaných ze souborů nápovědy jednotlivých softwarů nebo z příruček stažených na internetu.

Tab. 6: Konfigurace počítače

Operační systém	Windows 10 Pro
Operační paměť	64 GB RAM
Procesor	Intel(R) Core(TM) i7 5820 CPU @ 3,30 GHz
Grafická karta	NVIDIA GeForce GTX 1070

4.1 Zpracování fotografických snímků

Nejprve byla provedena orientace snímků z letecké a pozemní fotogrammetrie a vytvořeno společné mračno tzv. klíčových bodů. Tento krok byl opakovaně učiněn v softwaru Agisoft PhotoScan pomocí funkce *Align Photos*. Při neoptimálnějším nastavení parametrů pro výpočet bylo zorientováno 1600 snímků (tzv. Chunk 1). Snímky pořízené fotoaparátem Nikon Coolpix L810 do zpracování nebyly zahrnuty, jelikož nedosahovaly dostatečné kvality. Jako prohlížeč mesh modelu vytvořeného z laserového skenování byl použit software CloudCompare, ve kterém byly vyhledány souřadnice (S-JTSK) zvolených vlíčovacích bodů. Tyto body byly následně identifikovány

na několika snímcích v softwaru Agisoft PhotoScan a po importu jejich souřadnic z textového souboru došlo k transformaci klíčových bodů do výsledného souřadnicového systému. Po nastavení přesnosti jednotlivým vlíčovacím bodům byla provedena optimalizace, přičemž nejméně vyhovující body nebyly do výpočtu zahrnuty. Kalibrace fotoaparátu byla pro těchto 1600 snímků vypočtena automaticky softwarem. Dalším krokem bylo smazání odlehlých a nepřesných bodů a nový výpočet optimalizace, po které následovalo ruční připojení zbylých 57 snímků (tzv. Chunk 2), jež se na začátku neorientovaly. Po importu souřadnic vlíčovacích bodů odečtených z Chunku 1 do Chunku 2 byla provedena kontrola bodů a spuštěna optimalizace. Následně byly oba Chunky spojeny a byl spuštěn výpočet pro výpočet mračna bodů, který trval přibližně 4 dny. Postup práce a výsledné hodnoty jsou podrobně popsány v bakalářské práci Michala Novotného.

4.2 Tvorba společného mračna bodů z laserového skenování a fotogrammetrického měření

Pro zjištění neoptimálnějšího nastavení parametrů byly kroky v kapitolách 4.2, 4.3 a 4.4 provedeny nejprve s pouhým výřezem části hradu, který obsahoval věž, část hradeb se schodištěm a přilehlou oblast vnitřního paláce. Jelikož naším požadavkem bylo, aby fotogrammetrické měření mělo menší váhu, byla velikost všech normál těchto bodů 10x zmenšena. V této fázi zpracování tak byly vytvořeny 3 textové soubory se souřadnicemi a normálami bodů, a sice z laserového skenování, z fotogrammetrie s původními hodnotami normál a z fotogrammetrie se zmenšenými hodnotami normál. Celkový počet bodů v obou mračnech pouhého výřezu byl odhadnut na 80 milionů. Takové množství dat není možné spojovat či upravovat v žádném volně dostupném textovém editoru. Proto bylo ke kopírování jednoho textového souboru do druhého využito příkazu *copy*, jež byl zadán do příkazové řádky. Tento příkaz vyžaduje minimálně dva parametry, a sice cesty ke zdrojovému souboru a do cílového umístění, přičemž cesty mohou být zadány relativně (např. *copy a.txt + b.txt spojene_ab.txt*). Kontrola napojení obou textových souborů byla ověřena v programu EditPad Pro 7.

4.3 Tvorba trojúhelníkové sítě v softwaru PoissonRecon

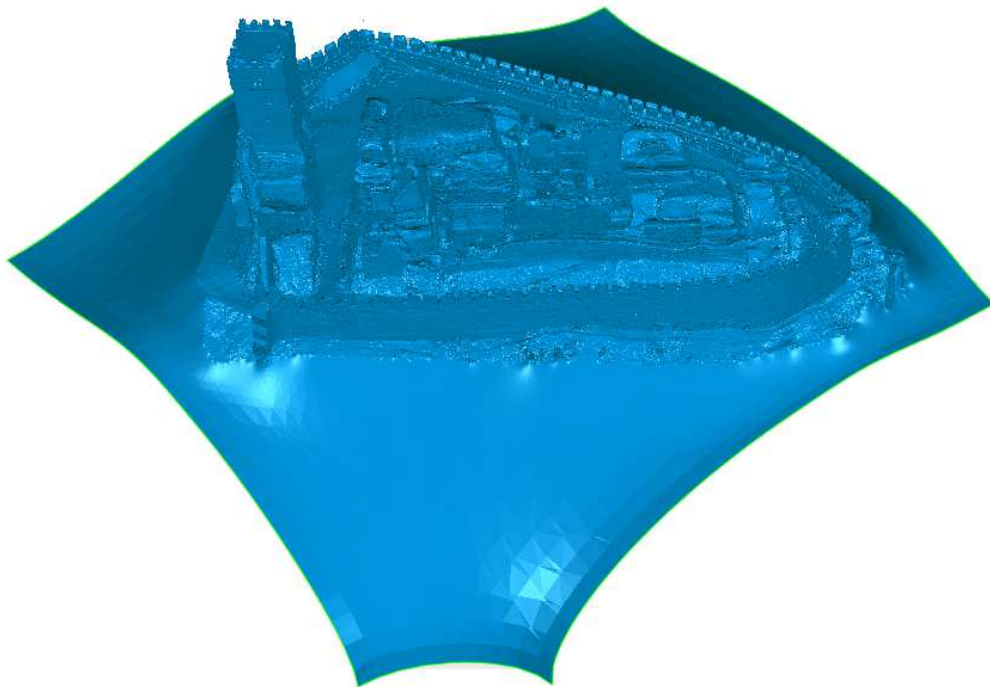
Jako jedno z nejlepších řešení pro rekonstrukci povrchu hradu z mračna bodů byl vybrán software Screened Poisson Surface Reconstruction, který obsahuje tři programy: PoissonRecon, SSDRecon a SurfaceTrimmer. Poissonova povrchová rekonstrukce je založena na řešení Poissonovy rovnice [15] a vytváří vodotěsný povrch z orientovaných mračen bodů získaných nejčastěji 3D skenery, umožňuje tedy spojení naměřených dat, zaplnění povrchových děr a obnovu zasíťování existujících modelů. Poissonova formulace je globální řešení, které zvažuje všechny body najednou, aniž by se uchýlilo k prostorovému rozdělení či ke smíchání bodů, a proto je vysoce odolné datovému šumu a vytváří perfektně hladké povrchy. Časová a prostorová složitost použitého prostorově přizpůsobivého algoritmu je adekvátní k velikosti rekonstruovaného objektu, tedy k velikosti dat.

Podmínky při registraci dat nejsou nikdy ideální a z toho důvodu mají polohy a normály bodů obecně vysoký šum. Omezený přístup během měření může dokonce zanechat některé povrchové oblasti bez dat. S těmito problémy se pokoušejí vypořádat různé metody rekonstrukce povrchu, které se snaží rozumně odvodit topologii neznámého povrchu a co nejlépe aproximovat zašumělá data. Několik přístupů je založeno na splnění podmínky tzv. Delaunayovy triangulace, která maximalizuje minimální úhel v trojúhelnících. Geometrickým duálem této triangulace jsou Voronoiiny diagramy. Tato schémata vytvářejí trojúhelníkové sítě, které interpolují všechny nebo většinu bodů. Pokud však máme zašumělá data, tak je výsledný povrch velmi hrbolatý a je nutné ho pro další zpracování vyhladit. Jiná schémata přímo rekonstruují aproximovaný povrch a dají se obecně klasifikovat jako globální nebo lokální. Globální metody definují implicitní funkci jako součet radiálně založených funkcí se středem v jednotlivých bodech. Nicméně matice řešení těchto funkcí jsou velmi husté a nepodmíněné. Lokální metody pracují s jednotlivými podmnožinami blízkých bodů. Po odhadu dotykové roviny definují implicitní funkci jako orientovanou vzdálenost k tečné rovině nejbližšího bodu. Poissonova rekonstrukce kombinuje výhody globálních i lokálních schémat. Za tímto řešením povrchové rekonstrukce stojí vývojáři Michael Kazhdan z Univerzity Johnse Hopkinse a Hugues Hoppe z výzkumného oddělení společnosti Microsoft. [7] [15]

Tento volně dostupný program byl stažen na webových stránkách [14] a následně spuštěn z příkazové řádky. Generování trojúhelníkové sítě (Obr. 10) bylo provedeno pomocí softwaru PoissonRecon. V příkazové řádce byl nastaven adresář, ve kterém byly uloženy jak vstupující textové soubory se souřadnicemi a normálami všech bodů, tak i všechny tři EXE soubory s výše uvedenými programy. Výpočet trojúhelníkové sítě byl spuštěn pomocí vybraných vstupních parametrů, jejichž význam je podrobně popsán v Příloze A.

Příklad použitého příkazu:

```
PoissonRecon --in komplex.txt --depth 12 --pointWeight 8 --polygonMesh --density --verbose --out komplex_d12_pw8.ply
```



Obr. 10: Trojúhelníková síť vygenerovaná softwarem PoissonRecon

4.4 Nastavení parametrů v softwaru SurfaceTrimmer

Odlehlé body vygenerované v trojúhelníkové síti byly ořezány v softwaru SurfaceTrimmer pomocí příkazu *trim*. Význam vybraných vstupních parametrů je opět podrobně popsán v Příloze A. Veškeré výstupy byly ukládány ve formátu *.ply s binárním typem kódování pro rychlé a snadné nahrávání v ostatních softwarech.

Příklad použitého příkazu:

```
SurfaceTrimmer --in komplex_d12_pw8.ply --trim 10 --aRatio 0 --polygonMesh --  
out komplex_d12_pw8_t10.ply
```

4.5 Srovnání výstupů

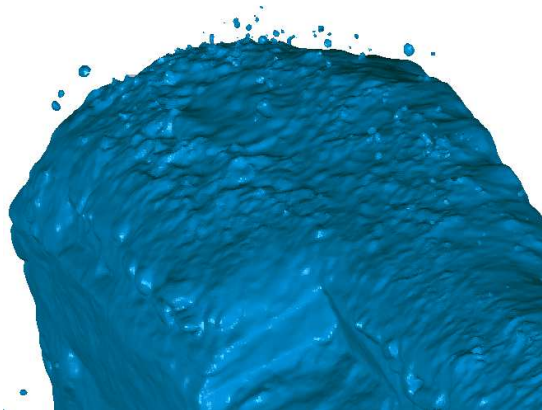
Na základě vyhodnocení vyříznuté části hradu byla jako nejvíce vyhovující varianta zvolena kombinace mračna bodů z laserového skenování a z fotogrammetrie se zmenšenými hodnotami normál, jelikož mračno bodů z laserového skenování je velmi podrobné a důležité z hlediska přesnosti a fotogrammetrické měření (pouze) doplňuje svrchní části zaměřovaného objektu. Srovnání výsledných síťových modelů je uvedeno v Příloze B. Pro vybranou variantu byl nejprve vytvořen síťový model, pro který byla v softwaru PoissonRecon pro parametr *depth* zvolena hodnota 12 a pro parametr *pointWeight* hodnota 8. V softwaru SurfaceTrimmer byla dále pro parametr *aRation* zvolena hodnota 0 a pro parametr *trim* hodnota 10. Poté byl pro porovnání ze stejných vstupních dat vytvořen druhý síťový model, pro který byl parametr *depth* přepsán na hodnotu 13 a parametr *trim* na hodnotu 11. Kvůli nedostatku paměti však tento výpočet skončil chybou a proto bylo nutné mračno bodů z laserového skenování i z fotogrammetrického měření rozdělit v softwaru CloudCompare na dvě poloviny a každou část vygenerovat zvlášť. Jelikož tento software při nahrání modelu přepíše hodnoty normál všech bodů na jednotkové, musely být normály z fotogrammetrického měření pro obě nově vzniklé části hradu opět 10x zmenšeny. Rozdělením se zmenšila ohraničující plocha aproximované oblasti a po přepočítání byly změněné hodnoty parametrů opět nastaveny na hodnotu 12 pro parametr *depth* a 10 pro parametr *trim*. Po výpočtu byly všechny vygenerované modely nahrány do softwaru Geomagic, kde byly detailně porovnány. Na základě rozboru bylo rozhodnuto, že pro další zpracování bude použit první síťový model a z druhého modelu bude použit pouze most mezi vnějším opevněním a vnitřním palácem.

4.6 Úprava trojúhelníkové sítě v softwaru Geomagic

Pro úpravu trojúhelníkové sítě byl využit software Geomagic Studio (dále jen Geomagic). Tento software poskytuje vynikající nástroj pro editaci mračen bodů a síťových modelů a pokročilé funkce pro povrchové úpravy. Funkce pro zpracování

3D naskenovaných dat společně s automatizovanými nástroji umožňují vytvářet v krátkém čase modely té nejvyšší kvality. Tento software mimo jiné umožňuje automatické čištění mračen bodů, analýzy a opravy síťových modelů, rychlejší zpracování objemných dat či přizpůsobení pracovních postupů zpracování mračen bodů ve skriptovacím prostředí Python. [16]

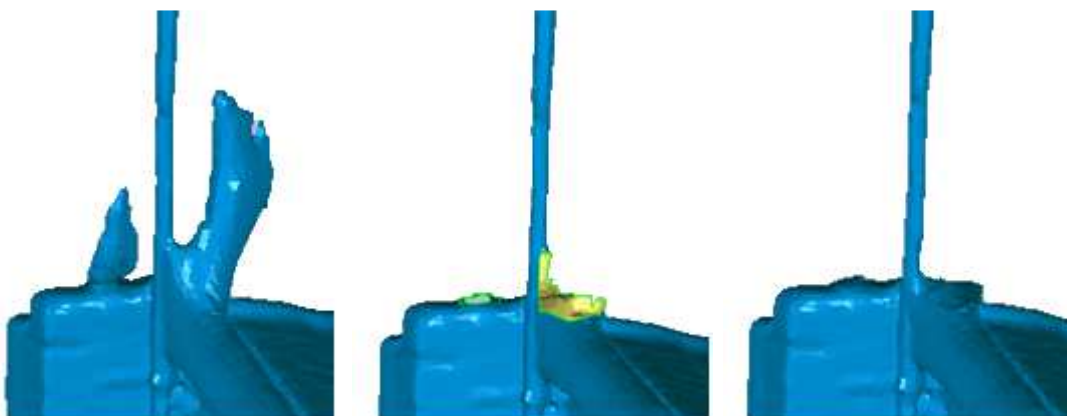
V prvním kroku byla vhodně vyříznuta z druhého modelu část s mostem, jež byla následně pomocí funkce *Decimate* zredukována na 20% své velikosti a uložena ve formátu *.wrp. Poté byl otevřen první model vybraný pro následné zpracování, který obsahoval velké množství chybně vygenerovaných částí modelu (Obr. 11). Důvodem těchto chyb byl fakt, že od zaměření hradu laserovým skenováním uběhly již 2 roky a mezi tím došlo ke změně reality. Proto byly automaticky identifikovány pomocí funkce *Select - Data - Select by - Area* objekty, které měly menší obsah než 50% celkového modelu. Ještě před smazáním těchto vybraných částí byla provedena jejich vizuální kontrola, aby nedošlo ke ztrátě potřebných dat. Po této úpravě tvořilo síť přes 64 milionů trojúhelníků. S takto velkým souborem je téměř nemožné pracovat, a proto byl model v softwaru Agisoft PhotoScan zredukován na 10 milionů trojúhelníků. Redukce dat je podrobněji popsána v bakalářské práci Michala Novotného.



Obr. 11: Chybně vygenerované části modelu nad cimbuřím

Po redukci trojúhelníků byl model zpět nahrán do softwaru Geomegic, ve kterém byly provedeny ruční opravy modelu. Tato část zpracování byla časově nejnáročnější a pro usnadnění práce byl model rozdělen na 2 části. Mezi hlavní úpravy spadalo

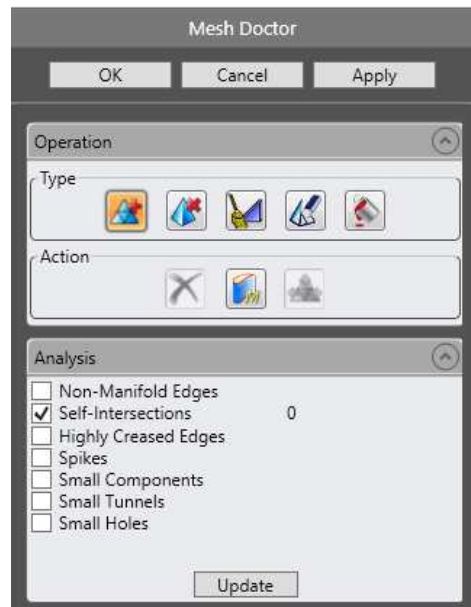
čištění chybně vygenerovaných často nepřístupných částí hradu a zaplnění všech děr tak, aby se model stal tzv. vodotěsným (Obr. 12). Pro zaplnění chybějících či vyřezaných částí sítě byla použita funkce *Polygons - Fill holes - Fill single*, ve které bylo možné vybírat ze tří variant způsobu zaplnění. Při použití varianty *Curvature* došlo při zaplnění i k úpravě okolí, zatímco při volbě varianty *Flat* byl otvor zaplněn rovinou bez změny okolí. Poslední varianta *Tangent* sice také poupravila okolní síť, ale ne v takovém rozsahu jako varianta *Curvature*. U rozsáhlejších děr bylo nutné pro zachování alespoň přibližného tvaru využít funkce *Bridge*, díky níž se dala plocha propojit vhodně zvolenými spojnicemi. Rozdělením vzniklo několik menších částí, které mohly být již korektně zaplněny pomocí funkce *Completed filling* stejně jako ostatní díry. Úpravy byly provedeny v takovém rozsahu, aby nedošlo k vlastnímu modelování reality.



Obr. 12: Úprava trojúhelníkové sítě a zaplnění děr

Po dokončení hrubých úprav byla z modelu vyříznuta přibližná oblast mostu, ve které byl vytvořen otvor o trochu větší než lépe vygenerovaný již dříve uložený most. Tato oblast byla následně spojena pomocí funkce *Polygons - Combine* s kvalitnějším mostem. Mezera mezi polygonovými sítěmi byla zaplněna pomocí funkcí *Bridge* a *Completed filling* a upravený výsledek byl zpátky napojen na trojúhelníkovou síť celého komplexu hradu. Díky identickým bodům byl tento krok proveden již automaticky bez jakýchkoliv úprav modelu.

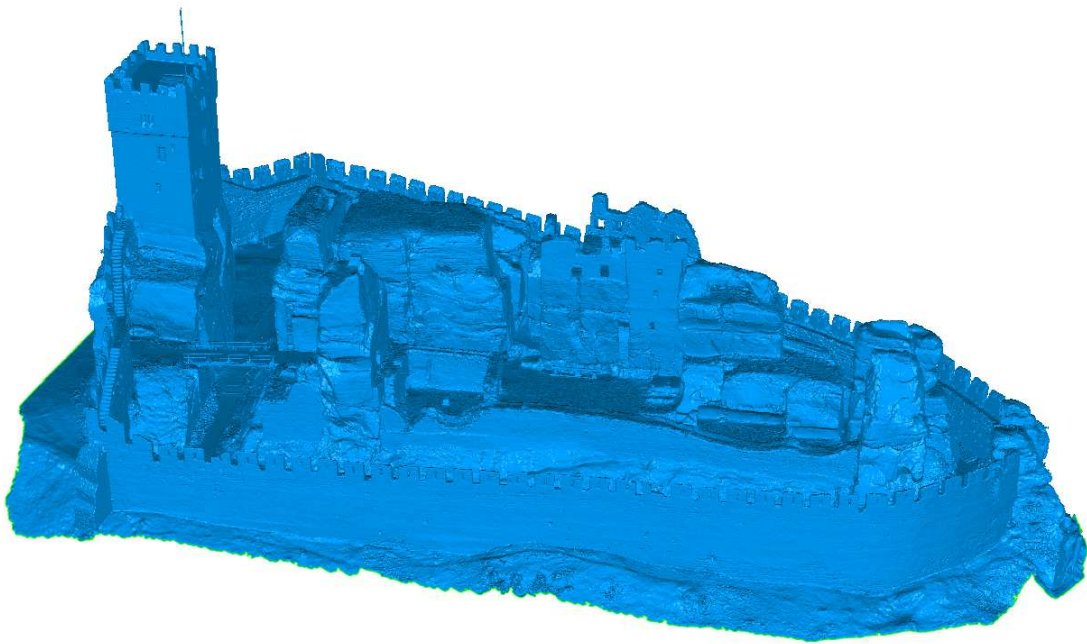
Pro zajištění topologické čistoty modelu byla spuštěna funkce *Mesh Doctor*, díky které byly nalezeny překřížené trojúhelníky, jež byly následně vymazány (Obr. 13). Tím vzniklo v trojúhelníkové síti cca 750 děr. Pro zrychlení práce byly vyhledány díry o velikosti do 1 m, které byly následně zaplněny automatickou funkcí. Zbýlých 250 děr bylo zkontrolováno a zaplněno ručně. Tento krok byl pro kontrolu ještě jednou zopakován a nalezené nedostatky byly opraveny.



Obr. 13: Kontrola topologie funkcí Mesh Doctor

5 Výsledky

Pomocí speciálního postupu propojení dvou metod měření, laserového skenování a fotogrammetrie, byl vytvořen trojúhelníkový model (Obr. 14), který slouží nejen pro vizualizaci a prezentační účely, ale díky přibližnému zachování přesnosti z laserového skenování, jež dosahovala hodnoty 13 mm, lze model použít i pro přesná měření. Při úpravách trojúhelníkové sítě v softwaru Geomagic byla zajištěna topologická čistota a vodotěsnost modelu. Pro samotnou vizualizaci není nutné zajišťovat vodotěsnost, ale pro plánovaný tisk na 3D tiskárně či pro výpočty objemu je tento krok nezbytný. Výsledný model obsahuje 9,9 milionů trojúhelníků a jeho velikost ve formátu PLY je 188 MB.



Obr. 14: Výsledná trojúhelníková síť

Na závěr bylo provedeno v softwaru Agisoft PhotoScan maskování částí fotografií, které by narušovaly výslednou texturu. Z takto upravených fotografií byl ve stejném softwaru vytvořen automatickou funkcí 3D model s texturami (Obr. 15). Celková velikost modelu i s texturami je 792 MB. Více informací o postupu tvorby textur a maskování fotografií je uvedeno v bakalářské práci Michala Novotného.

Z důvodu malé hustoty dat z leteckého laserového skenování pořízených z ČÚZK nebyla tato data pro zasazení 3D modelu hradu do okolní krajiny použita. Kolem hradních zdí tak byl ponechán pouze pás krajiny o šířce 1 - 2 m získaný z kombinace měření laserovým skenováním a fotogrammetrickým měřením. Výsledný model lze prohlížet či upravovat např. v softwarech Geomagic Studio nebo CloudCompare. Pro tisk modelu 3D tiskárnou je doporučeno v závislosti na zvoleném měřítku data redukovat. Všechny digitální výstupy společně s naměřenými daty jsou uloženy v elektronické podobě na přiloženém flash disku, jehož struktura je popsána v Příloze C. Více pohledů na výsledné modely je součástí Příloh D, E a F.



Obr. 15: Výsledný 3D model s texturami

6 Závěr

Hlavním úkolem pro zpracování bakalářské práce bylo pořídit fotogrammetrické snímky, které doplnily již existující data získaná z pozemního laserového skenování. Hlavním cílem práce bylo ze všech získaných dat vytvořit a upravit trojúhelníkovou síť pro vytvoření 3D modelu hradu Helfenburk u Úštěka s texturami.

Na hradě bylo provedeno letecké i pozemní fotogrammetrické měření ve spolupráci se společností G4D pomocí hexakoptéry a kompaktních fotoaparátů. Vybrané snímky vhodné pro následné zpracování byly zorientovány a transformovány do S-JTSK a Bpv. Po optimalizaci orientace snímků následoval automatický výpočet mračna bodů, jež bylo spojeno v příkazové řádce s převzatým mračnem bodů z laserového skenování. V dalším kroku byla z těchto spojených mračen bodů vytvořena pomocí softwaru PoissonRecon trojúhelníková síť, která byla následně ořezána pomocí softwaru SurfaceTrimmer. Pro snadnější následné zpracování byl počet trojúhelníků vygenerované sítě výrazně zredukován v softwaru Agisoft Photoscan. Zredukováná trojúhelníková síť byla načtena do softwaru Geomagic Studio, ve kterém byly provedeny veškeré její úpravy a korekce. Mezi hlavní úkony patřilo zaplnění děr, mazání chybně vygenerovaných částí hradu, zajištění topologické čistoty dat a vytvoření vodotěsného modelu. V komplikovaných částech hradu byla provedena částečná generalizace. Pro tvorbu textury 3D modelu byly využity zamaskované fotografie z pozemního a leteckého fotogrammetrického měření. Výsledný model doplněný o textury byl zaslán občanskému sdružení Hrádek, na jehož žádost byla tato práce vyhotovena.

Použitá literatura

- [1] Hrad Helfenburk (Hrádek) u Úštěka. *HRADY.CZ: Cestujte s přehledem* [online]. [Praha: ViGo Agency], ©1995-2017 [cit. 2017-02-09]. ISSN 1803-0076. Dostupné z: <http://www.hrady.cz/?OID=356>
- [2] ANDĚL, Rudolf a kol. *Hrady, zámky a tvrze v Čechách, na Moravě a ve Slezsku - Severní Čechy*. Svazek III. Praha: Svoboda, 1984. ISBN 25-089-84
- [3] Zřícenina hradu Helfenburk. *Památkový katalog* [online]. Praha: Národní památkový ústav, ©2015 [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <http://www.pamatkovykatalog.cz/?element=2166430&sequence=2&mode=fulltext&keywords=helfenburk&order=relevance%3Adesc&action=element&presenter=ElementsResults>
- [4] POESOVÁ, Jana. *Zaměření a vytvoření prostorového modelu vnitřního paláce hradu Helfenburk u Úštěka*. Diplomová práce. ČVUT v Praze. [online] 2015 [cit.2017-02-09]. Dostupné z: <http://geo.fsv.cvut.cz/-proj/dp/2016/jana-poesova-dp-2016.pdf>
- [5] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6
- [6] HERMANY, Josef. *Fotogrametria III*. 2. vyd. Bratislava: ALFA, 1984.
- [7] ŠTRONER, Martin a kol. *3D skenovací systémy*. 1. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2013. 396 s. ISBN 978-80-01-05371-3, 2013.
- [8] *Digitální model reliéfu České republiky 5. generace (DMR 5G)* [mapový list Dubá 5-4]. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální, [aktualizace 2010] [cit. 2017-04-29]. Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(rgunxqh5jgrm5mf2vsig0rfz\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302](http://geoportal.cuzk.cz/(S(rgunxqh5jgrm5mf2vsig0rfz))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZZK-DMR5G-V&mapid=8&menu=302)

- [9] *Digitální model povrchu České republiky 1. generace (DMP 1G)* [mapový list Dubá 5-4]. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální, [aktualizace 2010] [cit. 2017-04-29]. Dostupné z:
[http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(ufbfkvdhf1oq5x3wumqyeou\)\)/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&mapid=8&menu=303](http://geoportal.cuzk.cz/(S(ufbfkvdhf1oq5x3wumqyeou))/Default.aspx?lng=CZ&mode=TextMeta&side=vyskopis&metadataID=CZ-CUZK-DMP1G-V&mapid=8&menu=303)
- [10] *Geoprohlížeč* [Prohlížečící služba WMTS - Základní mapy ČR]. Praha: Český úřad zeměměřický a katastrální, [spuštěno 1. 3. 2012] [cit. 2017-03-06]. Dostupné z:
<http://geoportal.cuzk.cz/geoprohlizec/>
- [11] *G4D: Blíže k realitě* [online]. Praha: G4D, © 2013 [cit. 2017-03-11]. Dostupné z:
<https://www.g4d.cz>
- [12] ŠARKALA, Milan. Nikon Coolpix A: velmi příjemná (ne)výraznost. *Digimanie* [online]. oXy Online, 17. 6. 2013 [cit. 2017-03-06]. ISSN 1214-2190 Dostupné z:
<http://www.digimanie.cz/recenze-nikon-coolpix-a-velmi-prijemna-nevyraznost/5087>
- [13] ŠARKALA, Milan. Nikon Coolpix L810: pro nenáročné. *Digimanie* [online]. oXy Online, 14. 8. 2012 [cit. 2017-03-06]. ISSN 1214-2190 Dostupné z:
<http://www.digimanie.cz/recenze-nikon-coolpix-l810-pro-nenarocne/4637>
- [14] KAZHDAN, Michael. *Screened Poisson Surface Reconstruction (and Smoothed Signed Distance Reconstruction) Version 9.01* [online]. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.cs.jhu.edu/~misha/Code/PoissonRecon/Version9.01/>
- [15] KAZHDAN, Michael, BOLITHO, Matthew a HOPPE, Hugues. *Poisson Surface Reconstruction* [online]. The Eurographics Association, © 2006. [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://www.cs.jhu.edu/~misha/MyPapers/SGP06.pdf>
- [16] *Geomagic Studio: The Ultimate 3D Scan Processing Solution* [online]. Morrisville: Geomagic, ©2013 [cit. 2017-04-09]. Dostupné z: <http://applications3d.com/wp-content/uploads/2013/10/Geomagic-Studio-Brochure.pdf>

Seznam obrázků

Obr. 1: <i>Poloha hradu Helfenburk</i>	11
Obr. 2: <i>Schéma hradu Helfenburk u Úštěka</i>	12
Obr. 3: <i>Digitální model terénu</i>	15
Obr. 4: <i>Komora UltraCam D</i>	16
Obr. 5: <i>Princip průsekové metody</i>	18
Obr. 6: <i>Mapový list Dubá 5-4</i>	22
Obr. 7: <i>Hexakoptéra (HiSystems GmbH)</i>	23
Obr. 8: <i>Nikon Coolpix L810</i>	23
Obr. 9: <i>Nikon Coolpix A</i>	23
Obr. 10: <i>Trojúhelníková síť vygenerovaná softwarem PoissonRecon</i>	30
Obr. 11: <i>Chybně vygenerované části modelu nad cimbuřím</i>	32
Obr. 12: <i>Úprava trojúhelníkové sítě a zaplnění děr</i>	33
Obr. 13: <i>Kontrola topologie funkcí Mesh Doctor</i>	34
Obr. 14: <i>Výsledná trojúhelníková síť</i>	35
Obr. 15: <i>Výsledný 3D model s texturami</i>	36

Seznam tabulek

Tab. 1: <i>Technická specifikace fotoaparátu Nikon Coolpix A</i>	24
Tab. 2: <i>Nastavení fotoaparátu Nikon Coolpix A pro leteckou fotogrammetrii</i>	24
Tab. 3: <i>Technická specifikace fotoaparátu Nikon Coolpix L810</i>	25
Tab. 4: <i>Nastavení fotoaparátu Nikon Coolpix A pro pozemní fotogrammetrii</i>	26
Tab. 5: <i>Nastavení fotoaparátu Nikon Coolpix L810 pro pozemní fotogrammetrii</i>	26
Tab. 6: <i>Konfigurace počítače</i>	27

Seznam příloh

- Příloha A** *Použité vstupní parametry v Poisson Surface Reconstruction*
- Příloha B** *Srovnání výsledných síťových modelů*
- Příloha C** *Struktura elektronických příloh*
- Příloha D** *Výsledná trojúhelníková síť - severovýchodní pohled*
- Příloha E** *Výsledný 3D model s texturami - severovýchodní pohled*
- Příloha F** *Výsledný 3D model s texturami - ortogonální pohled*

Použité vstupní parametry v Poisson Surface Reconstruction

POISSON RECON

-- **in** < vstupní body >

Tento řetězec je název souboru, ze kterého se budou načítat nastavené hodnoty.

V našem případě se jednalo o ASCII soubor se 6 sloupci oddělenými čistými mezerami.

V prvních třech sloupcích byly obsaženy souřadnice bodů

(x,y,z), za nimiž následovaly hodnoty normál těchto bodů.

-- **out** < výstupní trojúhelníková síť >

Tento řetězec je název souboru, do kterého bude vytvořena trojúhelníková síť. Tento soubor bude uložen ve formátu PLY.

-- **depth** < hloubka rekonstrukce >

Toto celé číslo je maximální hloubka binárního stromu, který bude použit pro rekonstrukci povrchu a definuje, jak bude soubor veliký. Přibližná délka trojúhelníkové hrany je následující: $l = B/2^d$

kde B ... maximální ohraničující rozměr mračna bodů [m],

d ... parametr hloubky

-- **pointWeight** <váha interpolace>

Toto reálné číslo specifikuje důležitost faktu, že interpolace vzorku bodu je dána formulací Poissonovy rovnice. Výsledek originální rekonstrukce může být získán nastavením hodnoty 0. Nejvíce aplikovaná hodnota pro části hradu byla empiricky určena a nastavena na hodnotu 8.

-- **density**

Povolení tohoto parametru dodá programu informaci, aby k jednotlivým vrcholům zapsal odhadnuté hodnoty hloubky.

-- polygonMesh

Povolení tohoto příkazu dodá programu informaci, že výstup je síť polygonů.

-- verbose

Povolení tohoto parametru poskytuje kompletnější popis časů zpracování a využití paměti u jednotlivých kroků programu.

SURFACE TRIMMER**-- in** <vstupní trojúhelníková síť>

Tento řetězec nese název souboru, ze kterého se bude načítat trojúhelníková síť. Soubor je načítán ve formátu PLY.

-- trim <hodnota ořezu>

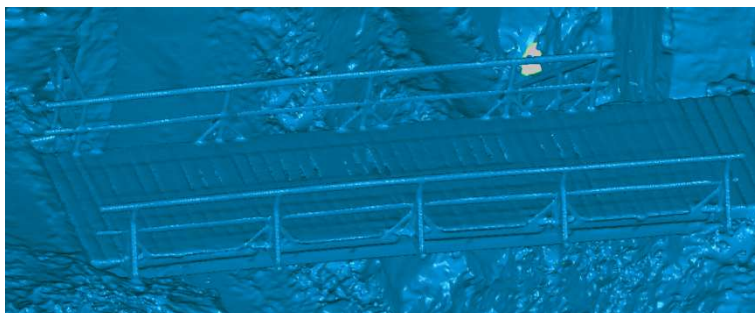
Toto reálné číslo určuje hodnotu pro ořezávání sítě. Podmnožina sítě s hodnotou signálu (hustoty) menší než je nastavená hodnota se odstraní.

--aRatio <island area ratio>

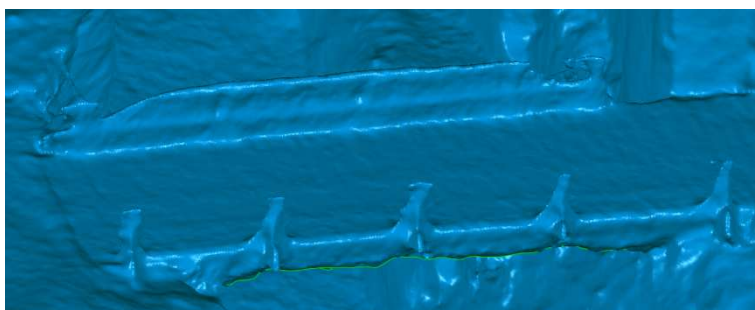
Toto reálné číslo určuje poměr plochy, jež definuje odpojené části modelu. Připojené části, jejichž plocha (relativně k celkové ploše sítě) je menší než tato hodnota, budou sloučeny do výsledného povrchu k uzavření malých otvorů a budou odstraněny z výsledného povrchu k odstranění malých nepřipojených částí. Empirickým určením byla určena jako nejvhodnější hodnota 0. Izolované nežádoucí připojené části byly následně odstraněny v softwaru Geomagic Studio pomocí funkce *Select by Area*.

Informace o parametrech byly získány z [14].

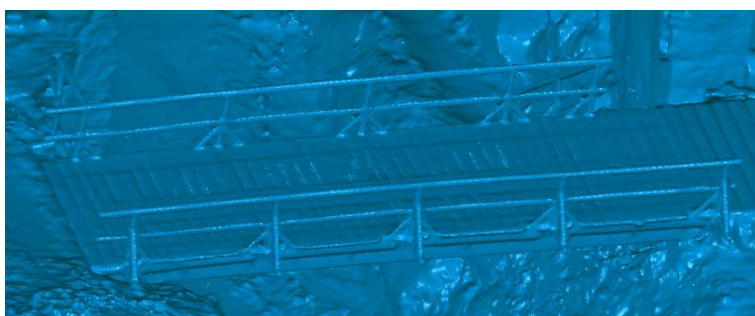
Srovnání výsledných síťových modelů



Síťový model z laserového skenování



Síťový model z fotogrammetrického měření



Síťový model z obou měření (varianta se zmenšenými hodnotami normál)



Síťový model z obou měření (varianta s původními hodnotami normál)

Struktura elektronických příloh

- **1_Fotogrammetricke_Mereni** (snímky z fotogrammetrického měření)
 - › **NikonCoolpix_A** (použitý fotoaparát)
 - › **Letecke_A** (snímky z letecké fotogrammetrie)
 - › **Pozemni_A** (snímky z pozemní fotogrammetrie)
 - › **NikonCoolpix_L810** (použitý fotoaparát)
 - › **Pozemni_L810** (snímky z pozemní fotogrammetrie)

- **2_Vstupy** (vstupní data)
 - › **part1_LS** (1.část mračna bodů z laserového skenování)
 - › **part2_LS** (2. část mračna bodů z laserového skenování)
 - › **u_part1_FTGM** (1.část mračna bodů z fot. měření se zmenšenými normálami)
 - › **u_part2_FTGM** (2. část mračna bodů z fot. měření se zmenšenými normálami)
 - › **cast1** (spojené mračno bodů part1_LS a u_part1_FTGM)
 - › **cast2** (spojené mračno bodů part2_LS a u_part2_FTGM)
 - › **DUBA54_1g** (digitální model povrchu České republiky 1. generace, Dubá 5-4)
 - › **DUBA54_5g** (digitální model reliéfu České republiky 5. generace, Dubá 5-4)

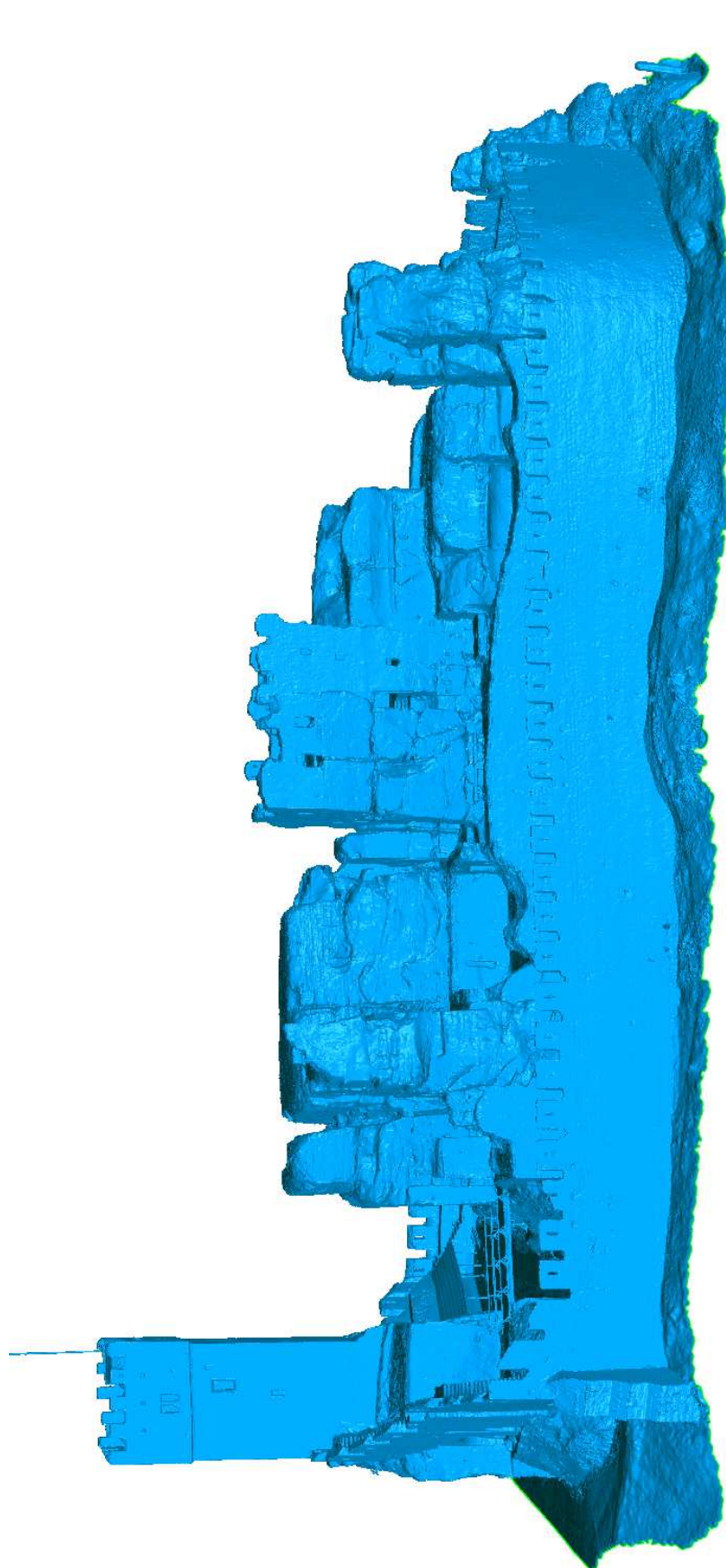
- **3_Poisson_Surface_Reconstruction**
(výstupy získané ze softwarů PoissonRecon (PR) a SurfaceTrimmer (ST))
 - › **cast1_d12_pw8** (první část trojúhelníkové sítě z PR - depth 12, pointWeight 8)
 - › **cast1_d12_pw8_t10** (první část trojúhelníkové sítě ze ST - trim 10)
 - › **cast2_d12_pw8** (druhá část trojúhelníkové sítě z PR - depth 12, pointWeight 8)
 - › **cast2_d12_pw8_t10** (druhá část trojúhelníkové sítě ze ST - trim 10)
 - › **cast3_most** (vyříznutý most z druhého modelu - Viz. Kapitola 4.4)

- **4_Geomagic_Studio** (soubory upravované v softwaru Geomagic a Agisoft PhotoScan)
 - › **komplex_smazane_male** (spojená trojúhel. síť s odmazanými malými chybami)
 - › **most_20p** (most redukovaný na 20% své původní velikosti)
 - › **01_redukce10m** (trojúhelníková síť redukovaná na 10 mil. trojúhelníků)
 - › **32_celek** (celková upravená trojúhelníková síť)

- **5_Vystupy** (další výstupy této práce)
 - › **model** (model hradu s texturami)
 - › **tiled_model** (dlaždicový model hradu s texturami)
 - › **video_textury** (video modelu s texturami)
 - › **video_mix** (video modelu střídavě s texturami a bez textur - 8 změn)
 - › **screen_mix** (soubor s fotografiemi pro tvorbu videa s názvem video_mix)

- **6_Bakalarska_prace**
 - › **BP_Vavrova** (elektronická verze bakalářské práce)

Výsledná trojúhelníková síť - severovýchodní pohled



Current Triangles: 9,909,211
Selected Triangles: 0

Výsledný 3D model s texturami - severovýchodní pohled



Current Triangles: 9,909,211
Selected Triangles: 0

Výsledný 3D model s texturami - ortogonální pohled

