

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta životního prostředí

Katedra prostorových věd



Bakalářská práce

Modelování významného krajinného objektu za využití leteckých dat
z bezpilotního prostředku

Vedoucí Bakalářské práce: Ing. Jan Komárek, Ph. D.

Autor Bakalářské práce: Tomáš Hadrava

2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Tomáš Hadrava

Územní technická a správní služba v životním prostředí

Název práce

Modelování významného krajinného objektu za využití leteckých dat z bezpilotního prostředku

Název anglicky

Modelling of a significant landscape object using aerial data from an unmanned vehicle

Cíle práce

Cílem práce je vytvoření precizního prostorového objektového modelu státního hradu Trosky na základě kolmých a šikmých leteckých snímků z bezpilotního letadla za využití stereofotogrammetrických metod. Dílčím cílem je vytvoření rastrů digitálního modelu povrchu a georeferencované ortorektifikované mozaiky.

Metodika

Autor zpracuje literární rešerši k tématu leteckého snímkování významných krajinných objektů, letecké fotogrammetrie a metodám Structure from Motion a Multi-View Stereo. Dále se autor zaměří na detailní metodický postup práce v software Agisoft Metashape Professional, pomocí kterého vymodeluje zájmový objekt. Autor následně vyhodnotí kvalitu vstupních leteckých dat, přesnost vytvořených výstupů, vyhodnotí možné následné využití 3D modelu a stanoví odpovídající závěry a doporučení.

Doporučený rozsah práce

30-50 stran

Klíčová slova

Fotogrammetrie, letecké snímky, Structure from Motion, UAV, 3D model, Agisoft Metashape

Doporučené zdroje informací

- Inzerillo, L., Di Mino, G., & Roberts, R. (2018). Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress. *Automation in Construction*, 96, 457-469
- Manajitprasert, S., Tripathi, N. K., & Arunplod, S. (2019). Three-dimensional (3D) modeling of cultural heritage site using UAV imagery: A case study of the pagodas in Wat Maha That, Thailand. *Applied Sciences*, 9(18), 3640.
- Martínez-Carricondo, P., Carvajal-Ramírez, F., Yero-Paneque, L., & Agüera-Vega, F. (2020). Combination of nadir and oblique UAV photogrammetry and HBIM for the virtual reconstruction of cultural heritage. Case study of Cortijo del Fraile in Níjar, Almería (Spain). *Building research & information*, 48(2), 140-159.
- Scianna, A., & La Guardia, M. (2019). Survey and Photogrammetric Restitution of Monumental Complexes: Issues and Solutions—The Case of the Manfredonic Castle of Mussomeli. *Heritage*, 2(1), 774-786.
- Tmušić, Goran, et al. "Current practices in UAS-based environmental monitoring." *Remote Sensing* 12.6 (2020): 1001.

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Jan Komárek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Konzultant

Ing. Anna-Marie Poskočilová

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2022

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 22. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 24. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: Modelování významného krajinného objektu za využití leteckých dat z bezpilotního prostředku vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů. Jsem si vědom, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla. Jsem si vědom, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby. Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

Podpis autora práce:

V Praze dne 24. 3. 2022

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Komárkovi, Ph.D. za jeho přístup, cenné rady, připomínky a odborné vedení této práce. Za jazykové korektury, formulaci textů a konzultaci dalších témat děkuji Ing. Anně-Marii Poskočilové.

Abstrakt

Modelování pomocí fotogrammetrické metody Structure from Motion umožňuje z 2D snímků sesbíraných v pohybu zobrazit po řadě procesů model ve 3D prostoru. Teoretická část této práce popisuje jednotlivé dílčí části metody Structure from Motion, které je nutné znát pro modelování. Názorně metodu Structure from Motion práce ukazuje na příkladu státního hradu Trosky. Z obdrženého datasetu snímků pořízených bezpilotním prostředkem byla data přetransformována do souvislého, čistého a georeferencovaného 3D modelu, orthomosaiky a digitálního modelu povrchu. Výsledky dokazují, že data byla dostatečně kvalitní, aby bylo možné z 2D snímků výsledný 3D model, orthomosaiku a digitální model povrchu vytvořit.

Klíčová slova: Fotogrammetrie, letecké snímky, Structure from Motion, UAV, 3D model, Agisoft Metashape

Abstract

Modeling by using the Structure from Motion photogrammetric method which allows 2D images collected in motion to display a model in 3D space after a series of processes. The theoretical part of this work describes the particular parts of the Structure from Motion method, which must be known before 3D modeling. The work demonstrates the Structure from Motion method on the example of the state castle Trosky. From the received dataset of images taken by the drone, the data were transformed into a continuous, clean and georeferenced 3D model, orthomosaic and digital surface model. The results prove that the data were of sufficient quality to be able to create the resulting 3D model, orthomosaic and digital surface model from 2D images.

Keywords: Photogrammetry, aerial images, Structure from Motion, UAV, 3D model, Agisoft Metashape

Obsah

1. Úvod.....	1
2. Cíle práce	3
3. Teoretická část	4
3.1 Fotogrammetrická metoda	4
3.1.1 Výstupy fotogrammetrie	5
3.2 Structure from Motion, Multi View Stereo, SfM - MVS.....	6
3.3 Unmanned Aerial System, Unmanned Aerial Vehicle	8
3.3.1 Regulace UAS/UAV	9
3.3.2 Globální družicové polohové systémy pro UAV	10
3.4 Příklady softwarů pro tvorbu 3D modelu pomocí metody SfM	11
3.4.1 Agisoft Metashape	11
3.4.2 Pix4D	12
3.4.3 Srovnání Agisoft Metashape a Pix4D.....	12
4. Popis zájmové lokality	13
4.1 Hrad Trosky	13
4.2 Charakteristika krajinného rázu hradu Trosky a okolí.....	14
5. Metodika	16
5.1 Sběr dat	16
5.1.1 Využití šikmých a kolmých snímků.....	17
5.2 Příprava dat	18
5.3 Práce s daty	18
5.3.1 Nahrání snímků	18
5.3.2 Align Photos.....	18
5.3.3 Dense Cloud	21
5.3.4 Mesh.....	23
5.3.5 Textura	26
5.3.6 Digitální model povrchu (DEM).....	28
5.3.7 Orthomosaika	29
6. Výsledky	31
6.1 Tie points.....	31
6.2 Dense Cloud	32
6.3 3D Model (Mesh, Mesh s texturou)	32
6.4 Digitální model povrchu (DEM).....	33
6.5 Orthomosaika	34
7. Diskuse.....	37

7.1 Možnost 3D tisku hradu Trosky.....	38
8. Závěr	40
9. Seznam použité literatury.....	41
10. Přílohy.....	46

1. Úvod

Tato bakalářská práce popisuje tvorbu 3D modelu státního hradu Trosky. Samotné modelování se tvoří v software Agisoft Metashape fotogrammetrickou metodou zvanou Structure from Motion (SfM), kde z 2D snímků opatřenými souřadnicemi vychází skrze operace provedené v software 3D model, který je začištěný a plně georeferencovaný, což vede k přesnému umístění modelu do krajiny. Samotná tvorba modelu začíná u sběru dat, který se provádí pomocí tzv. UAS – Unmanned Aerial System popř. UAV – Unmanned Aerial Vehicle, které nalétávají po dané trajektorii nad vybraným objektem nebo lokalitou a pořizují fotografie objektu nebo lokality z různých úhlů a výšek. Často se pro tyto typy zařízení, které se v různých formách využívají od 1. poloviny 20. století, používají názvy jako “aerial robot” nebo jednoslovně “dron” (Colomina, Molina, 2014).

Jelikož je model této práce v prostoru trojrozměrný, jedná se o tzv. vícesnímkovou fotogrammetrii. Snímky jsou tedy opatřeny souřadnicemi určující Longitude, Latitude a Altitude (= *délka, šířka, výška*) v daném souřadnicovém systému, což slouží později k určení přesné polohy snímku, resp. bodů. Do skupiny vícesnímkových fotogrammetrií patří i fotogrammetrie průseková, která popisuje geometrické objekty, na rozdíl od jednosnímkové, která popisuje snímky v rovině. Stereofotogrammetrie je vyhodnocování pomocí stereoskopického vjemu. Kombinace stereofotogrammetrie s fotogrammetrií průsekovou dává vznik metodě Structure from Motion, kterou je státní hrad Trosky modelován. Snímky by měly mít stejný souřadnicový systém jako tzv. markery (virtuální značky reálných GCP — Ground Control Points), což jsou skutečné terče výrazné barvy, které se pokládají do terénu a později v procesu modelování jsou v software vyhledávány a označovány pomocí virtuálních markerů, ale není to podmínkou. Jelikož souřadnice skutečných Ground Control Points jsou známé, tak se model dle nich lícuje (Šimíček, 2014).

Po získání fotografií státního hradu Trosky z dronu následují procesy v software, v této práci je to Agisoft Metachape, 1. Alignment of the photographs, který vyrovnává dané fotografie pořízené dronem, 2. The calculation of a dense 3D surface, což je orientace a georeferencování dle markerů reálných a virtuálních, 3. Generating dense point cloud — proces, kterým vzniká husté bodové mračno, kde jsou již jasně definované hranice modelu a model je dobře zřetelný. 4. Generating

mesh — vytvoření 3D sítě modelu spojením všech bodů kroku 3 pomocí trojúhelníkové sítě, která pokryje i místa, kde nebyly vytvořené body. 5. Texture making — dodá 3D modelu texturu, čímž se model hradu Trosky stane kompletním a detailním (Maharani, 2020).

2. Cíle práce

Hlavním cílem bakalářské práce je, na základě dodaných dat, vymodelovat 3D model státního hradu Trosky pomocí software Agisoft Metahsape. Cílem je vytvoření začištěného, ořezaného (o nevalidní části) a georeferencovaného modelu v prostoru. Model bude následně uložen na webovém veřejném úložišti. Součástí výstupu bude 3D model, digitální model povrchu a orthomosaika. Na základě tohoto modelu bude popsána metoda fotogrammetrie a fotogrammetrická metoda Structure from Motion a bude dokázáno nebo vyvráceno, že dodaná data jsou dostatečně kvalitní pro vymodelování hradu Trosky. Dalším z cílů je důkladně popsat konkrétní kroky během modelování a odůvodnit je tak, aby tato práce mohla sloužit v budoucnu i dalším autorům.

3. Teoretická část

3.1 Fotogrammetrická metoda

Fotogrammetrie (z *anglického Photogrammetry*, *photo* = *snímek*, *gram* = *pozorování/recording*, *metry* = *měření*) metoda, která umožňuje modelování i ve 3D prostoru za využití 2D snímků (Kasser, Egels, 2002). Zároveň se fotogrammetrie považuje za vědu, způsob a technologii, která se zabývá získáváním využitelných měření, map, DMT (digitálního modelu terénu) a takových produktů, které lze získávat z obrazového, resp. fotografického záznamu (Pavelka, 2003). Díky současnému rozšíření bezpilotních letounů schopných získat georeferencované fotografie s vysokým rozlišením a relativně nízkým úsilím a náklady je fotogrammetrická metoda široce používána v geomatických aplikacích (Di Angelo a kol., 2021).

Platí, že fotogrammetrická metoda zachycuje realitu snímkem, tedy fotografií z konkrétního UAS (unmanned aerial system). Na pořízených fotografiích lze určit z polohy bodů přesné tvary a umístění předmětů nejen na fotografii, ale primárně v prostoru a definovat vzájemné polohy bodů. Z toho tedy vyplývá, že fotogrammetrie je metoda bezkontaktní (Böhm, 2002).

Samotná fotogrammetrie se dělí na fotogrammetrii jednosnímkovou a vícesnímkovou. Jak již plyne z názvu — u metody jednosnímkové uživatel pracuje právě s jedním snímkem např. snímkem terénu a může měřit např. vzdálenost dvou bodů (vzdálenost města A a B), které pořízená fotografie zachycuje. Znamená to, že pracovní prostředí je 2D, tedy že výpočty uživatele probíhají vždy jen v rovině a že výstupem není 3D model (Böhm, 2002).

Opakem jednosnímkové fotogrammetrie je fotogrammetrie vícesnímková. U této metody uživatel pracuje s dvěma a více snímky, které se vzájemně částečně překrývají. Z jednoho ze snímků se určují souřadnice v rovině, tedy 2D souřadnice a když se přidá do sestavy druhý snímek, dostaneme tak informace o třetím rozměru, tedy 3D. Podmínkou pro získání dat o třetím rozměru předmětu je dostatečné překrytí a zobrazení předmětu na obou snímcích (Kubíčková, 2016). Dále se fotogrammetrie dělí dle následujících aspektů: poloha stanoviště (pozemní, letecká), způsob zpracování snímků (analogová, analytická, digitální) a druh záznamu výstupních hodnot (grafická, číselná) (Böhm, 2002).

Jak je zmiňováno v úvodu práce, k vícesnímkové fotogrammetrii se řadí i stereofotogrammetrie, která vyhodnocuje na základě stereoskopického vjemu 3D souřadnice a průseková fotogrammetrie, která pracuje na základě protínání os záběrů snímků pod konvergentním úhlem (Pavelka, 2003). Kombinací těchto dvou metod je již výše zmíněná metoda Structure from Motion (Šimíček, 2014), kterou byl státní hrad Trosky modelován.

3.1.1 Výstupy fotogrammetrie

Mezi výstupy metody fotogrammetrie patří standardně Orthomosaika (Orthomosaic), Husté bodové mračno (Dense point cloud), Polygonová síť (3D mesh) a Digitální model povrchu (Digital elevations model = DEM).

Orthomosaika – jedná se o jednotnou vrstvu, jediný snímek ve vysokém rozlišení, který vzešel ze sloučení všech snímků daného pozorování. Jedná se o podobný proces, jako při pořizování snímků během satelitního pozorování, ale rozlišení je zde daleko větší. Výsledkem je tedy 2D snímek v rovině.

Husté bodové mračno – nejvíce “přímým” výsledkem mapování pixelů po vyrovnání kamery je 3D bodové mračno. Jedná se o hustý “mrak” bodů, ze kterého lze určit detaily modelu. Je zde např. již možné odvodit změnu struktury v průběhu času přímým zarovnáním 3D mračna bodů odvozených ze sad snímků, které byly pořizeny v různých časech. Nedochozí ke ztrátě prostorových informací, jako u orthomosaiky (Ferrari, 2021).

3D síť – tento výstup je většinou odvozen z nejvhodnějšího “přístupu” k hustému bodovému mračnu a jedná se o jakýsi derivát hustého bodového mračna. Nevýhodou je, že při tvorbě 3D sítě dochází přirozeně k interpolaci dat. Jedná se o plochu nepravidelných trojúhelníků, které lze využít pro odhad plochy povrchu objektu a pro výpočet objemu uzavřeného objektu. Tato funkce tak například umožňuje porovnávání změn ekologicky relevantních parametrů v průběhu času.

Digitální model terénu/povrchu – bodové mračno lze pomocí software rastrovat a vytvořit tak digitální výškový model povrchu. Lze tímto způsobem získat informace o výškách daného modelu, nicméně DEM nelze označit za 3D, ale za 2,5D, jelikož neobsahuje informace o převislých strukturách (Ferrari, 2021).

3.2 Structure from Motion, Multi View Stereo, SfM – MVS

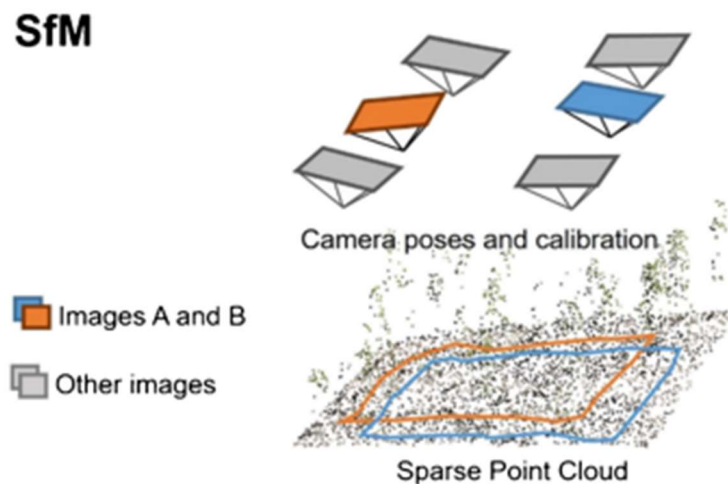
Samotné metodě a kroku SfM v praxi předchází nejprve krok algoritmu SIFT (z anglického Scale – Invariant Feature Transform) popř. dalších algoritmů jako FAST, SURF, ORB popř. BRIEF (Purandare, Talele, 2014). SIFT je metoda, která detekuje a popisuje lokální funkce snímků. Funkce extrahované metodou SIFT jsou neměnné k měřítku, orientaci a změně osvětlení snímku. Tento krok tak definuje klíčové body (Purandare, Talele, 2014). Běžné stereofotogrammetrické metody jsou založeny na obdobném fungování, jako je lidský zrak. Standardně je hloubka vnímána dvěma body, jejichž pozice je známá, ale může být vnímána i jen jedním bodem, pakliže se pozorovatel nebo předmět hýbe (Obrázek č. 1: Zobrazení principu sběru a hodnocení dat metodou SfM pomocí pohyblivého UAV (Iglhaut a kol., 2019)). Metoda Structure from Motion je založena na obou výše zmíněných principech (Di Angelo a kol., 2021). Někdy bývá spojena společně s metodou Multi View Stereo (MVS) za cílem co největšího rozlišení a v místech, kde např. LiDAR nemůže být využit (Jacq, 2021). MVS přitom předpokládá, že je známo jak externí, tak interní nastavení kamery (tj. pozice kamery), zatímco SfM počítá pozici kamery až společně s rekonstruovaným – modelovaným – objektem nebo prostředím (Fergus, 2012). MVS je obecný termín, používaný pro danou skupinu technik, které používají stereo techniky o více než dvou obrázcích. Algoritmus MVS je vždy kvalitní jen tak, jak jsou kvalitní vstupní data, tedy snímky a parametry fotoaparátu. Velká část kvality výstupu MVS je ale tvořena kvalitou výstupu SfM, jelikož metoda SfM předchází metodě MVS (Furukawa, Hernández, 2015).

SfM tak vypočítává fotografickou hodnotu kamery a polohy snímků, zatímco MVS se používá pro generování 3D modelu. Výsledná kombinace SfM– MVS tak dohromady vytváří mračna bodů s vysokou hustotou bodů, navíc vytváří spolehlivou shodu mezi obrazy (Nakano, 2014).

V teorii to znamená, že SfM se používá k “odhadnutí” 3D modelu z jakési posloupnosti překrývajících se 2D snímků. Jelikož je ale tato fotogrammetrická metoda bezkontaktní a automatizovaná, velice záleží na kvalitě vstupních dat. Přesnost konečného 3D modelu je jedním z nejnáročnějších aspektů fotogrammetrie. 3D bodové mračno je rekonstruováno spojením stejného geometrického bodu v různých záběrech – snímcích– získaných z různých pozic kamery na UAV (Di Angelo a kol., 2021).

V praxi to ale znamená, že je nutné pro sběr dat touto metodou nastavit přesně kameru. Následně dle požadavků okolí nastavit, jaké jsou například světelné podmínky, viditelnost, na čem je kamera připevněná (tripod, UAV) a také specifikovat typ objektivu. “Geometrie” obrazové sítě má pak vliv na kvalitu reprodukce. Pro každý průzkum konvergentního zobrazování by se měla hledat geometrie tam, kde se hlavní osa použitých snímků sbíhá, aby se tím eliminovala systematická chyba (Iglhaut a kol., 2019).

SfM je inovativní fotogrammetrická metoda, která umožňuje uživateli vytvořit 3D snímek z datasetu fotografií. Je to metoda, kterou po prvním kroku, tj. určení homogenních bodů snímku, lze využít na další analýzu fotografií v prostoru a to např. informace o velikosti, tvaru a pozici objektu v prostoru. Poté je na základě Ground Control Points (GCP) určena orientace v prostoru absolutním. (Inzerillo a kol., 2018). Počty GCP v terénu se liší, ale řádově se pohybují v nižších desítkách (Manajitprasert, 2019). Pro sběr dat se standardně používá Unmanned Aerial Vehicle (UAV), neboli drone. Společně s pilotem na zemi tak tvoří Unmanned Aerial System (Inzerillo a kol., 2018). Počty pořizovaných snímků pomocí UAV se standardně pohybují ve vyšších stovkách (Martínez-Carricondo, 2020).



Obrázek č.1: Zobrazení principu sběru a hodnocení dat metodou SfM pomocí pohyblivého UAV (Iglhaut a kol., 2019).

3.3 Unmanned Aerial System, Unmanned Aerial Vehicle

Unmanned Aerial Vehicle je letoun, který není pilotován za přítomnosti člověka v letounu, ale je pilotován ze země. UAV společně s pilotem na zemi spadá pod UAS — tvoří jakýsi systém. Historie UAS, popř. UAV sahá již do konce 19. století, kdy Rakousko použilo bezpilotní létající balóny plné výbušnin proti Itálii (Aswini a kol., 2018). Primárně tedy sloužily pro vojenské účely. Např. Queen Bee drone používala Royal Navy během První světové války, Firebees používala USAF během války ve Vietnamu a také bezpilotní letouny používal Izrael ve válce proti Egyptu. Všechny tyto modely letounů byly využívány také jako cvičné terče (Colomina, Molina, 2014). USA nicméně již během první světové války používala tzv. Kettering Bug, což bylo automatické létající torpédo, které nebylo cvičné a bylo řízeno soustavou gyroskopů (Aswini a kol., 2018). Potenciál pro jejich využití jako bezpilotních mapovacích zařízení, byl objeven až na konci sedmdesátých letch dvacátého století. Nicméně velkého využití z řad akademické půdy se této rádiově řízené technologické novince nedostalo. Výrobci se však naopak začali na tento sektor poměrně rychle orientovat. Jako první se jednalo o bezpilotní letoun s rozpětím křídel 3 m a s kamerou od firmy Przybilla and Wester-Ebbinghaus. (Colomina, Molina, 2014).

Dnes lze drony rozdělit do osmi kategorií: Drony s pevným křídlem (tzv. fixed-wing), Drony s mávajícím křídlem (tzv. flapping-wing), drony s rotorem (tzv. rotary-wing), drony se sklopným rotorem (tilt-rotor), helikoptérové drony, ornitoptéry a nekonvenční typy dronů (Shahmoradi a kol., 2020). Dají se ale také dělit jen na dvě a tři kategorie: Fixed-wing a Multi-rotor a nebo Rotary-wing, Fixed-wing a Hybrid VTOL (Vertical Take-Off and Landing) (Tmušić, 2020). Fixed-wing se používá pro rychlé létání ve vysokých výškách a pro rozsáhlejší území, vzlet je náročnější než u Multi-rotor z důvodu nutnosti nabrat rychlost a vztlak na křídla. Multi-rotor UAV je vhodný k létání v nižších výškách, vhodný je i pro létání kolem budov a v budovách, pořizuje stabilní videozáznam, má možnost vertikálního vzletu, oproti Fixed-wing dronu je Multi-rotor drone mechanicky složitější (Aswini a kol., 2018). Hybrid VTOL je vhodný pro mapování rozsáhlých území, má možnost vertikálního vzletu a přistání, ale nevýhodou je složitá mechanika dronu (Tmušić, 2020).

Drony se postupem času začaly používat i v jiných odvětvích než jen armádních jako např.: Search and Rescue (SAR), hašení požárů, monitoring vody, monitoring inženýrských sítí. Používají se i v rámci územního plánování, monitoringu životního prostředí, monitoringu městského provozu, monitoringu druhového rozdělení, monitoringu populační ekologie. Používají se v archeologii, v rámci kulturního dědictví, existují osobní drony pro fotografování, pořizování videonahrávek a dnes také již i jako kurýrní služby. UAS jsou součástí mnoha odvětví jako je zemědělství, stavebnictví, ochrana životního prostředí, těžební činnosti a jiná další odvětví (Shahmoradi a kol., 2020).

Běžně jsou drony po tyto účely osazeny senzory, které již v dnešní době nemusí znamenat nutně velký finanční náklad, vysokou váhu, nadměrnou velikost apod. Drony jsou vybaveny speciálními zařízeními, které byly vyvinuty pro použití na UAV. Jedná se např. o panchromatické kamery, RGB kamery, multispektrální kamery, hyperspektrální kamery, termokamery a LiDAR senzory. Senzory bezpilotních letadel jsou však limitovány maximální vzletovou hmotností a nosností UAV (Adade a kol., 2021). UAS standardně používané pro fotogrammetrii jsou vybavené dvoufrekvenčními přijímači Global Navigation Satellite Systems (GNSS = Celosvětový navigační satelitní systém), které hlásí standardní odchylky 1–2 cm v horizontální rovině a 3 cm vertikálně. Některé UAS jsou vybavené i inerciálními navigačními systémy, které hlásí úhly a rotace dronu v momentu expozice (Berber, 2021).

3.3.1 Regulace UAS/UAV

S nástupem využívání dronů odborníky a širší veřejností přichází i výzva ohledně zákonné regulace. Z tohoto důvodu přišly zákonodárci s třemi statusy létání “Go”, “No go” a “How to go”, které buď umožňují létání v lokalitě (*Go*), zakazují létání v lokalitě (*No go*), anebo regulují létání v lokalitě (*How to go*) (Stöcker a kol., 2017).

Od 31. 12. 2020 platí také nařízení, které reguluje oblast UAS jako takovou. Každý majitel, resp. provozovatel dronu nesoucího kameru (nejedná-li se o tzv. hračku), tak musí mít svůj stroj zaregistrován a pilot dronu musí projít školením. Zároveň musí mít dron patřičné označení. Štítek značící třídu C0 je UAS s maximální vzletovou hmotností do 250 g. Štítek značící třídu C1 je UAS s maximálním užitečným

zatížením 900 g a náraz na lidskou hlavu je nižší než 80 J a má jedinečné fyzické sériové číslo, které je v souladu s normou ANSI/CTA-2063 Small Unmanned Aerial Systems Serial Numbers (Sériová Čísla malých bezpilotních systémů). Štítkem značící kategorii C2 musí opatřit majitel UAS takový stroj, který má maximální dosažitelnou výšku stanovenou na 120 m a má jedinečné fyzické sériové číslo, které je v souladu s výše uvedenou normou a váha nepřesahuje 4 kg. Štítkem značící kategorii C3 je nutné označit UAS, který má maximální vzletovou hmotnost do 25 kg a maximální rozměr jsou 3 m a má jedinečné fyzické sériové číslo, které je v souladu s výše uvedenou normou. UAS kategorie C4 jsou bezpilotní letadla se vzletovou maximální hmotností do 25 kg, které nejsou omezeny rozměrem (Nařízení Komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945, 2019).

3.3.2 Globální družicové polohové systémy pro UAV

Poloha různých UAVs je během letu řízena různými družicovými polohovými systémy, obecně se používá termín Globální družicový polohový systém (GNSS z anglického názvu Global Navigation Satellite System). Nejběžnější je v rámci GNSS GPS, dále GLONASS a Galileo. Globální družicový polohový systém je vysoce přesná a stálá mikrovlnná technologie, která je nezávislá na počasí a funguje v reálném čase napříč atmosférou (Jin a kol., 2014).

GPS (zkratka z anglického Global Positioning System) je družicový navigační systém a je určený primárně pro určení pozemní polohy objektu. Jedná se o americkou technologii z 60. let 20. století. Určení polohy je založeno na poloze uživatele a poloze 3 družic. V případě UAV se používají družice 4, jelikož je důležitým faktorem i výška. Systém byl vyvinut v USA. (Czernin, 2021).

GLONASS (zkratka z ruského: *ГЛОбальная НАвигационная Спутниковая Система* = *Globální Navigační Satelitní Systém*) je určen k neustálému určování času, polohy v prostoru a vektoru rychlosti vesmírných, leteckých a námořních prostředků na jakémkoliv místě zemského povrchu nebo prostoru kolem planety Země. Systém byl vyvinut v Ruské federaci, resp. v Sovětském svazu (Petrov a kol., 2010).

Galileo je Evropský navigační systém, konkrétně se jedná o projekt Evropské unie. Systém Galileo je, na rozdíl od výše zmíněných systémů, od samého začátku určen primárně pro civilní užití. V budoucnu má být tento systém, jehož historie sahá do 90. let 20. století, přesnější než GPS (Galileo, 2021).

Obecně tedy globální družicové polohové systémy mají za cíl v tomto případě určit vektory, po kterých se UAV pohybuje a tím určit polohu dronu a tedy polohu snímku. Mohou určovat přepočtem i rychlost dronu (Gross, 2016). Zároveň je doporučeno, aby během vzletu a přistání měl UAV kolem sebe dostatečně otevřený prostor, aby tím zvýšil přesnost pozice určenou GNSS modulem (Scianna, 2019).

3.4 Příklady softwarů pro tvorbu 3D modelu pomocí metody SfM

3.4.1 Agisoft Metashape

Agisoft Metashape je komerčně dostupný software, který poskytuje vyšší rychlost zarovnání snímků, jemnější rozlišení orthomosaiky a vylepšení vzdálenosti vzorku SfM země – drone než obdobný software Pix4D (Lastilla a kol., 2020). Agisoft Metashape je software produkt, kterým se provádí fotogrammetrické digitální zpracování snímků, jako je třeba letecká fotografie, fotografie z blízka (tzv. close-range), satelitní fotografie apod. Generují se tak 3D prostorová data, která se dají využít v aplikacích GIS, dokumentacích kulturního dědictví a produkci různých vizuálních efektů pro přímé i nepřímé měření objektů různých měřítek. Tento software umožňuje pracovat se snímky z RGB, termokamer a multispektrálními snímky. Další následné zpracování umožňuje eliminovat např. stíny a zbytky textur z modelů, vypočítat indexy a extrahovat potřebné informace např. zemědělského vybavení a automaticky klasifikovat hustá bodová mračna atd. (Uživatelský manuál Agisoft Metashape, 2022).

Agisoft Metashape, který dříve nesl název Photoscan, je tedy fotogrammetrický software sloužící pro 3D modelování, podporovaný metodami počítačového vidění, a je založen na tvorbě techniky Structure from Motion. Proces v software Agisoft Metashape provádí dvě hlavní části: zarovnání obrazu pomocí výpočtu polohy kamery a orientace pomocí detekce klíčových bodů (GCP a markerů) a vygenerování hustého bodového mračna pomocí “hloubkových map” vypočítaných ze stereo shody, tedy ze shody více bodů (Tinkham, Swayze, 2021).

3.4.2 Pix4D

Pix4D je software pro zpracování obrazu, který je založen na automatickém vyhledávání tisíců společných bodů mezi snímky. Každý tento bod nalezený v konkrétním obrázku se nazývá klíčový bod. V případě, že software zjistí, že dva klíčové body na dvou různých snímcích jsou totožné, tak je vyhodnotí jako shodné klíčové body. Každá skupina správně spárovaných klíčových bodů automaticky vygeneruje 3D bod. V případě, že mezi dvěma snímky je velké překrytí, zachycená oblast je tím pádem větší a může tím být spárováno více klíčových bodů. Čím více klíčových bodů je, tím přesněji lze počítat polohu 3D bodů. Hlavním pravidlem je zachovat co největší překrytí mezi jednotlivými snímky (Pix4Dmapper 4.1 User Manual, 2017). Pix4D má zároveň třístupňový pracovní postup. První krok je nazýván Prvotní zpracování, které spočívá v odhadu orientace všech snímků pomocí pokročilého nastavení bloku svazků snímků objektu, popř. lokality a celek je georeferencován pomocí GCP, obdobně jako je tomu v software Agisoft Metashape. Tvorba hustého bodového mračna je druhý krok, kdy je po prvotním zpracování vygenerováno husté bodové mračno a na jehož základě se následně dopočítá i 3D síť. Posledním krokem je možnost tvorby orthomosaiky (Cubero-Castan, 2018).

3.4.3 Srovnání Agisoft Metashape a Pix4D

Na základě srovnání, které provedli Adrianna Barbasiewicz, Tadeusz Widderski a Karol Daliga v roce 2018, a které je detailněji popsáno v článku *“The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D”* vychází, že u obou software jsou za daných podmínek odchylky v milimetrech. Většina úhlových a lineárních hodnot je v rozsahu přesnosti 95 %. Bylo zjištěno, že odchylky úhlově-radiálního posuvu pro střední a vysokou přesnost jsou v obou programech podobné. Na základě těchto údajů lze předpokládat, že výpočty prováděné se střední přesností jsou stejně spolehlivé, jako výpočty prováděné s vysokou přesností s tím, že výpočty na střední přesnost proběhly rychleji v obou softwarech. Pix4D nicméně nenastavilo přesné umístění 12 bodů, což by v jistém případě mohlo vést k menší přesnosti (Barbasiewicz a kol., 2018).

4. Popis zájmové lokality

Státní hrad Trosky, který je zároveň nejvyšším bodem území se nachází v CHKO Český ráj, která má rozlohu 181,523 km². Z toho lesní plochy zaujímají 46 %, trvalý travní porost 13 %, orná půda 26 % a vodní plochy 15 %. Samotná chráněná krajinná oblast se rozkládá 50 km severovýchodně od našeho hlavního města. Celé území je ohraničeno dalšími významnými lokalitami. Na severu to jsou Jizerské hory, na jihu tvoří hranici Polabí a na východě je oblast ohraničena Podkrkonoším. Jelikož tato lokalita má velmi pestrou a rozmanitou členitost krajiny, charakteristická skalní města, rostlinná a živočišná společenstva, byla tak jako úplně první vyhlášena chráněnou krajinnou oblastí ještě v dobách Československa roku 1955. O padesát let později, roku 2005, byla CHKO Český ráj vyhlášena geologickým parkem UNESCO (Kráčmera, 2013).

Zmiňovaná skalní města jsou tvořena pískovci a vznikla během druhohor zaplavením Českého masivu. Následně se tvořily další, dnes již významné, krajinné prvky Českého ráje sopečnou činností v třetihorách. Byly to zejména hory Kozákov, Zebín, Mužský a výše zmiňované Trosky (Drahotská, 2017).

Chráněná krajinná oblast Český ráj se rozkládá na území 3 krajů: Libereckého, Královéhradeckého a Středočeského. Zahrnuje 2 Národní přírodní památky (NPP), 11 přírodních památek (PP) a 11 Přírodních rezervací (PR). Nejnižší položené místo je Žabakor (234 m n. m.) a nejvýše pak Kozákov (744 m n.m.) (cesky-raj.cz).

4.1 Hrad Trosky

Zřícenina hradu Trosky stojí na ojedinělém skalním útvaru sopečného původu. Na první pohled je zřetelné, že útvar je tvořen dvěma částmi. Jedná se o lávové sopouchy, které vyvřely v období třetihor. Následovalo postupné erodování, které odplavilo zeminu, písek a další horniny kolem útvaru a odhalila celý útvar, který v této podobě vidíme dnes.

Samotná stavba hradu je datována do let 1380–1390, kdy Čeněk z Vartemberka chtěl využít přirozených vlastností čedičových skal. Hrad tedy nechal postavit se třemi částmi. Mezi vrcholky postavil vnitřní hrad s obytnými paláci a na každém z vrcholků nechal vystavit obranné, ale zároveň obytné věže. Šestiboká dvoupatrová věž stála na vrcholku jménem Baba, což je ten nižší z obou vrcholků hradu, a byla přístupná ze severní strany hradu. Vyšší a užší obdélníková věž stála na vrcholku jménem Panna

a údajně v ní bývala kaple. Tomu nasvědčuje i fakt, že samotný palác byl obýván jen v horních patrech, a tak spodní části celého hradu mohly být využívány na skladování potravin a materiálu pro dobu obléhání. Pod hradem je také vybudován systém sklepení, která společně se skalními trhlinami tvoří bludištní systém, který vede až do nedalekého skalního města Apolena. Ještě dnes jsou viditelné zbytky purkrabství, strážnice a prostory vnějšího hradu, které sloužily jako hospodářské zázemí (NPÚ, hrad-trosky.cz).

Po Vartembercích vlastnili hrad Trosky dále páni z Bergova (1399-1455), páni z Házmburka (1455-1497), Šelmberkové (1497-1551), Smiřičtí (1559-1618) a Albrecht z Valdštejna (1621-1634). Následně proběhlo několik bitev o hrad Trosky v 17. století mezi Švédy a císařskými vojsky, a nakonec byl hrad císařskými vojsky roku 1648 zpusťován a vypálen. Zřícenina se stala středem pozornosti opět v dobách romantismu, kdy lákala vlastence, spisovatele básníky a další umělce, jako byl např. Karel Hynek Mácha. Valdštejnové, jimž hrad stále patřil, ho prodali roku 1821 Janu Lexovi z Aehrenthalu, jehož syn roku 1841 nechal na Pannu vystavět točité schodiště. V roce 1925 se stal hrad Trosky majetkem Československého státu a Česká republika vlastní hrad až do současnosti (hradtrosky.eu).

4.2 Charakteristika krajinného rázu hradu Trosky a okolí

Ráz krajiny určuje významnou hodnotu dochovaného přírodního a kulturního prostředí a je ze zákona chráněn před znehodnocením. Krajinný ráz je definován v Zákoně o ochraně přírody a krajiny (114/1992 Sb. §2) (zakonyprolidi.cz).

Krajinný ráz vytváří rázovitost – odlišnost a jedinečnost, je dán specifickými rysy a znaky a vyjadřuje kulturní a duchovní dimenzi krajiny. Charakter krajiny je tvořen především morfologií terénu, vodními toky a plochami, vegetačním krytem a osídlením (Vorel, Sklenička, 1999). Ochrana krajinného rázu je ochranou obecnou, platí tedy na celém území státu. Zvýšená pozornost je problematice věnována v chráněných krajinných oblastech, kde je zachování harmonického obrazu kulturní krajiny a omezení případných rušivých vlivů významným předmětem zájmu Agentury ochrany přírody a krajiny (ochranaprirody.cz).

Na území CHKO Český ráj bylo vymezeno celkem 11 oblastí krajinného rázu. Hlavní roli při vymezení oblastí mají nejvýznamnější terénní tvary, např. Kozákovský hřbet, vrchy Hrada, Přivýšina, Střelečská hůra, skalní hrana

Klokočských skal, Příhrazských skal nebo hrana Hruboskalska. Tento poměrně jednotvárný reliéf je členěn několika výrazněji vystupujícími vrchy. Mezi ty nevýraznější patří nejvyšší vrchol území Kozákov a tři vulkanické vrchy Trosky, Vyskeř a Mužský. Většina území je odvodňována řekou Jizerou. V nížinách oblastí prostupují mělká a široká údolí vodních toků. Naopak na vyzdvižených plošinách se vodní toky rychle zahlubují do zaříznutých údolí. Narušení krajinného rázu CHKO Český ráj nejvíce ovlivňuje především rostoucí urbanizace území, rozšiřování zástavby do volné krajiny, zahušťování zástavby a zásahy nerespektující urbanistickou charakteristiku sídel. Mezi další rizika patří odstraňování sídelní zeleně, úbytek zemědělsky obhospodařovaných ploch a jejich využívání pro zástavbu a tendence rozvoje technických prvků v krajině (stožáry mobilních operátorů, fotovoltaické elektrárny, průmyslové haly). Výjimečnou pozornost a ochranu je třeba věnovat krajinným dominantám, pohledově exponovaným hřebenům, horizontům a svahům. Ochrana krajinných struktur patří k základním úkolům ochrany přírody a krajiny (Plán péče o CHKO Český ráj).

Ochrana krajinného rázu v CHKO Český ráj patří mezi dlouhodobé cíle plánu péče na období 2014-2023. Krajinný ráz by měl být chráněn jako celek, aby byly zachovány přírodní a kulturní dominanty. Usměrněný rozvoj území zajistí, aby nedocházelo k narušování krajinného rázu. Mezi navrhovaná opatření patří mimo jiné tyto body: v procesu územního plánování uplatňovat zásady ochrany krajinného rázu, chránit volnou krajinu před rozšiřováním zástavby, podporovat maloplošné obhospodařování zemědělské půdy, pestrou mozaiku ploch, nepodporovat plošně rozsáhlé zalesňování, případně jiné změny, které mohou mít výrazný vliv na změnu charakteru krajiny atp. (Plán péče o CHKO Český ráj).

Na lučních biotopech v okolí hradu Trosky lze v současné době jen obtížně nahradit tradiční hospodaření původních vlastníků managementem ochrany přírody. Mnohé louky a pastviny nejsou udržované a dochází k jejich zarůstání dřevinami. O navrácení krajinného rázu do původní podoby se ale v Českém ráji snaží ochránci přírody společně s farmáři, kteří zde pasou kozy. Ty zde spásají akáty, které by mohly znovu narůst na již odlesněných částech kopce. Extenzivní pastva tak napomůže obnově bezlesí, které zde historicky bylo a dojde k obnově travních porostů (Plán péče o PP Trosky).

5. Metodika

Práce je založena na analýze a zpracování 2D leteckých snímků. Nejprve došlo k určení snímků na vhodné pro následující proces a méně vhodné. Následovalo nahrání snímků do konkrétního software (zvolen byl software Agisoft Metashape Professional, 64 bit). V software Agisoft Metashape Professional byl vytvořen 3D model hradu Trosky. Následovala tvorba orthomosaiky a digitálního modelu povrchu (DEM). Poté proběhlo začištění modelu a ořezání 3D modelu i 2D a 2,5D výstupových částí o nepotřebná území. Veškeré postupy byly v souladu s Uživatelským manuálem Agisoft Metashape 2022, Professional Edition, verze 1.8 a verze 1.6 z roku 2020. Všechny níže popsané postupy jsou komentovány postupně, tedy tak, jak byly na časové ose vypracovány.

5.1 Sběr dat

Data byla sesbírána dronem UAV DJI FC6310 Phantom 4 Pro. Jedná se o kvadrokoptéru se zavěšenou kamerou na jejím trupu. Data pochází ze dne 20. 10. 2020, let byl proveden odpoledne kolem 14. hodiny a trval 22 minut a 9 vteřin (tyto informace byly uloženy a přeneseny do software Agisoft Metashape). Ohnisková vzdálenost kamery byla zvolena 8.80 mm, snímky byly pořízeny jako RGB. Během letu bylo pořízeno 294 šikmých snímků a 250 kolmých snímků. Výška UAV byla po dobu letu 498 m n. m. dle GNSS, zdroj světla pro kameru byl nastaven na denní světlo. Tabulka níže znázorňuje hodnoty z vygenerovaného reportu v části Údaje z průzkumu. Zobrazuje typ kamery, rozlišení, ohniskovou vzdálenost, velikost pixelu a zda-li byla kamera předem kalibrována.

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
FC6310 (8.8mm)	5472 x 3648	8.8 mm	2.41 x 2.41 μm	No

Tabulka č.1: Údaje z průzkumu

Před pořízením snímků bylo dále nutné do lokality umístit tzv. GCP (Ground Control Points), tedy pozemní kontrolní body, aby se následně model mohl dle těchto rozmístěných bodů georeferencovat a lícovat. GCP nemusí být vždy jen terče výrazné barvy. Jako GCP lze použít např. i roh budovy, roh cedule, nějaký konkrétní nehybný prvek objektu. Bylo tedy zvoleno 17 míst, kam se GCP rozmístily.

Jednalo se o 9 černobílých terčů, část plotu, dvě části vstupní brány, část horní brány, bod na schodech hradu, část zábradlí, bod na zídce a část okna. Následovalo pořízení snímků, automatické uložení snímků na SD kartu a export snímků do PC.

5.1.1 Využití šikmých a kolmých snímků

Během modelování bylo doporučeno použít oba datasey snímků, tedy kolmé i šikmé. Jejich kombinace měla pokrýt maximální počet snímaných povrchů. Kolmé snímky zajišťovaly, aby byl snímán maximální počet ploch zájmového území ze shora. Tyto snímky byly tedy použity pro práci s daty kolmo. Úhel byl mezi kamerou a povrchem tzv. ortogonální. Při pohledu na výsledný model je zřejmé, že kolmých snímků byl dostatečný počet, a že data byla dostatečně kvalitní, jelikož data v kolmém směru téměř nechybí. Téměř veškeré kolmé plochy směrem ke kameře jsou bez chyb, bez mezer a vymodelované, což dokládá i výstup Orthomosaika, který vyšel čistě. Kolmé plochy na výsledném 3D modelu jsou také čisté. Snímání kolmých snímků tak bylo použito na popsání ploch střech budov, korun stromů, cest, horních stran zdiva apod.

Další typ snímků v obdrženém datasetu byly snímky šikmé. Těch bylo obdrženo 294, tedy o 44 více než kolmých. Tyto snímky sloužily k pokrytí ploch, které kolmo usazená kamera nemohla snímat, anebo by je snímala pod odchylkou 30° od ortogonálního úhlu a docházelo by tak k distorzi. Snímání šikmých snímků je důležité proto, aby byly vyfocené plochy i pod plochami kolmými ke kameře, a hlavně ke snímání ploch, které mají vertikální charakter. Standardně se tak v zájmové lokalitě jednalo o zdivo, turistické tabule, boky věží, boční části poschodí apod., jelikož ostatní plochy již byly snímány kolmo. Možná chybějící data šikmých snímků jsou vidět na *Obrázku č. 4: Výsledek kroku Dense Cloud*, který je uveden níže v textu práce. Jedná se o boční chybějící část dat.

3D model hradu Trosky byl v tomto kroku bez chybějících dat, ať už kolmých, nebo šikmých. Veškeré plochy hradu byly tedy zmapovány. Chybějící data, tedy prázdná místa, byla nalezena v přilehlé vegetaci. V případě chybějících dat v minimální míře nabízí software Agisoft Metashape možnost Interpolace, která je detailněji popsána v části 5.3.4 Mesh.

5.2 Příprava dat

Obdržená data ve formátu .JPG byla nahrána do PC značky Lenovo, typu ThinkPad E470 s 64bitovým operačním systémem Windows 10 Education, procesorem IntelCore i5-7200U CPU 7. generace, s nainstalovanou pamětí RAM 8 GB. Data byla nahrána do předem vytvořené složky k tomu určené a byla rozřazena do 2 podsložek jménem Šikmé a Kolmé, aby bylo možné odlišit, o jaký typ fotografie se jedná. Do stejného zařízení a jiné složky byl nahrán .CSV soubor s daty o GCP.

5.3 Práce s daty

5.3.1 Nahrání snímků

Následovalo nahrání fotek do software Agisoft Metashape, a to označením všech fotek ve složkách Šikmé a Kolmé. Přetažením se snímky nahrály do složky Photos v software Agisoft Metashape. Druhá možnost byla otevření Workflow a zvolení možnosti Add Photos a zvolit ty snímky, které jsou žádoucí. Bylo také potřeba najít fotky, které nenesly žádná relevantní data, tedy nebylo na snímku to, kvůli čemu se snímky pořizovaly. Jednalo se o snímky ze vzletu a přistání a bylo nutné je vyřadit ze souboru nahraných fotek.

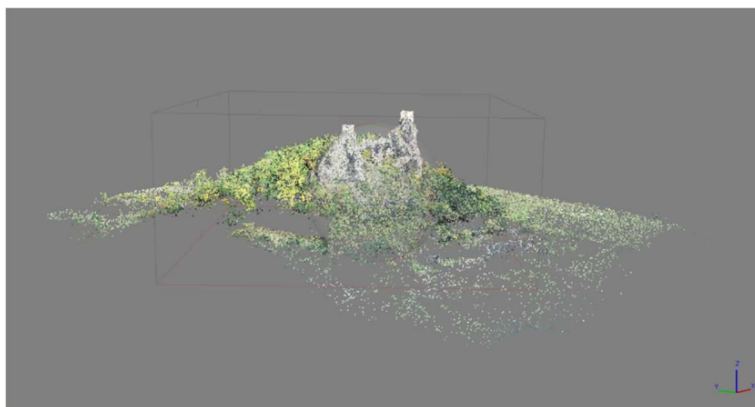
Agisoft Metashape akceptuje tyto formáty snímků: JPEG, JPEG 2000, JPEG XL, TIFF, DNG, PNG, OpenEXR, BMP, TARGA, PPM, PGM, SEQ, ARA a JPEG Multi-Picture Format (MPO). V případě nalezení nežádoucího snímku byla zvolena možnost pravým tlačítkem myši a nalezení možnosti Remove Items, která odebrala zvolený snímek.

5.3.2 Align Photos

Po přípravě dat bylo nezbytné vyrovnat fotky dle jejich souřadnic. Jedná se o první krok v tzv. Workflow (= *Pracovní postup*) pro tvorby 3D modelu, na jehož konci je vidět již předběžný náhled. Workflow je tedy rozhraní v rámci software Agisoft Metashape, kde je možné si volit postupně jednotlivé kroky práce. Pro tento krok byla použita funkce Align Photos. Poloha kamery v době pořízení snímku byla určena vnitřní a vnější orientací.

Align Photos nabízí zvolení si tolerancí a přesností. V našem případě bylo zvoleno Accuracy Medium, Key point limit, což je limit klíčových bodů a udává horní hranici bodů vlastností každého snímku, který je relevantní. Čím je menší číslo, tím více Agisoft Metashape klíčových bodů najde, ale snižuje se tím počet relevance bodů. Proto bylo doporučeno a zvoleno pro modelování hradu Trosky číslo 40 000. Tie point limit, je limit adekvátních bodů pro každý snímek, a proto bylo doporučeno a zvoleno číslo 4 000.

Možnost Workflow je umístěna v levém horním rohu a po rozbalení této možnosti jsou viditelné všechny kroky postupu. Výsledek kroku Align Photos tzv. Tie Points (= *Vázací body*) je uveden na *Obrázku č. 2: Výsledek kroku Align Photos — Tie Points*. Na něm je již patrné, jak modelovaná lokalita vypadá, co do ní spadá a kolik se vygenerovalo bodů. Agisoft Metashape zobrazí počet bodů automaticky, v tomto případě to bylo 184 227 bodů. Po tomto kroku bylo nutné zkontrolovat polohu bodů, zda-li dává smysl jejich umístění. V případě, že jsou body zobrazené mimo budoucí model, jedná se o šum a je nutné tyto body odstranit.



Obrázek č. 2: Výsledek kroku Align Photos — Tie Points.

Po této operaci, která trvala několik hodin, byl vygenerován jakýsi náhled, jak bude přibližně model vypadat a jak primárně a přibližně bude vypadat 3D husté bodové mračno. Nejprve bylo nutné budoucí model georeferencovat a tzv. zalícovat. Po fázi, kdy byly vygenerovány Tie Points, bylo ale nutné nahrát do software informace o Ground Control Points. Ty byly obdrženy v Excel souboru formátu CSV (Comma-separated values). Jednalo se o 17 souřadnic GCP. Souřadnice daného bodu vždy obsahuje 3 informace – Longitude, Latitude a Altitude. Tedy zeměpisnou délku, šířku a nadmořskou výšku. Souřadnice GCP jsou v systému S-JTSK Křovák East North, na rozdíl od snímků, které jsou v souřadnicovém systému WGS84. Samotné nahrání

formátu CSV se provádí skrze funkci Import Reference. Funkce se zapíná v levém dolním rohu, kde je možné přepínat náhled buď na tzv. Workspace, nebo je možné být v prostředí Reference. V prostředí Reference, získáme přístup k informacím o snímcích – jejich souřadnice, přesnost, chybovost, počet projekcí apod. V druhém řádku od shora se nachází již zmiňovaná ikona s názvem Import Reference, pomocí které je možné nahrát CSV souboru do software. Je nutné zvolit typ, v jakém data máme uložena. V případě této práce to byla tabulka, tedy Tab. Společně se souborem obsahujícím informace o souřadnicích byla obdržena data ve formátu .JPG, která obsahovala vizuální umístění GCP v lokalitě, dle kterých se dalo určit o jaký Ground Control Point se přímo jedná. Po nahrání CSV souboru do software Agisoft Metashape se GCP objeví jako tzv. markery, které je nutné usadit do přesné polohy GCP. Tento krok se provádí otevřením fotky, nalezením kontrolního bodu a vložením konkrétního markeru z nabídky. Je ale pravděpodobné, že software najde dle souřadnic GCP sám a označí je přibližným markerem. Poté je nutné pozici markerů jen upřesnit. Pro tento krok jsou potřebná výše zmiňovaná .JPG data, pro určení konkrétních markerů, pakliže jsou blízko sebe.

V případě modelování hradu Trosky došlo k jevu, kdy po nahrání GCP byly markery přibližně 10 m nad požadovaným povrchem, z důvodu, že letadlo pracuje s GNSS modulem, který je méně přesný než pozemní měření. Bylo tedy nutné nalézt konkrétní GCP na fotkách a markery manuálně označit. Jako nejvhodnější markery byly zvoleny markery: č. 3, č. 5, č. 9, č. 10, č. 11, č. 12, č. 13 a č. 14, jak uvádí *Obrázek č.3: Umístění vhodných markerů níže*. Červeně označené jsou vybrané vhodné markery. Pro lepší názorné zobrazení polohy markerů bylo použito jako podklad finální 3D model. V průběhu vkládání markerů si software automaticky dosazuje i ostatní markery. Čím více je nalezeno markerů na jednotlivých snímcích, tím více informací získává software o pozici modelu a tím přesněji lícuje ostatní markery do jejich pozic.

V případě modelování hradu Trosky bylo zvoleno výše zmíněných 8 markerů a chybovost v umístění se dostala na hodnoty od 0,013 m do 0,087 m. Přesnost překryvu markeru a konkrétního GCP byla 0,01 m, 0,02 m a 0,05 m. Po zalícování a zageoreferencování “modelu” se dále pokračovalo v tvorbě finálního modelu.



Obrázek č.3: Umístění vhodných markerů

5.3.3 Dense Cloud

Tie Points slouží jako základ pro vymodelování 3D hustého bodového mračna, tzv. Dense Cloud. Jeho vygenerování je časově náročnější než vygenerování během tvorby Tie Points a také závisí na výkonu počítače. V případě tvorby modelu hradu Trosky trvalo vytvořit Dense Cloud 5 hodin a 57 minut.

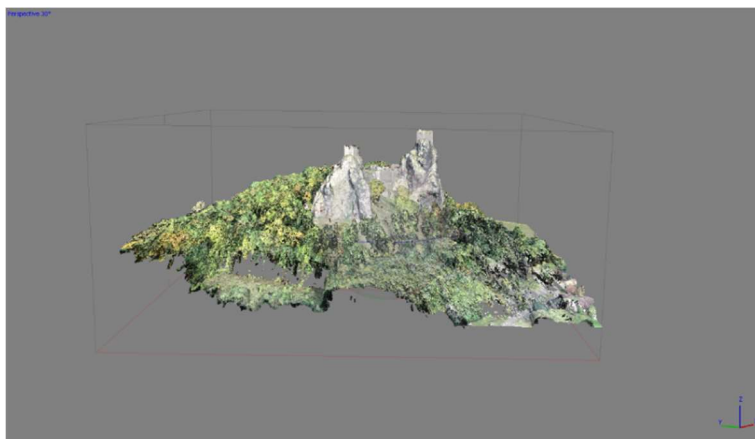
Agisoft Metashape umožňuje tvorbu hustého bodového mračna na základě výpočtu obrazu interiéru a exteriéru objektu. Generování hustého bodového mračna je založeno opět na hloubkových mapách, které jsou vypočítávány na základě tzv. stereo párování, jsou tedy vypočteny z překrývajících se dvou snímků s ohledem na jejich orientaci. Kombinované hloubkové mapy, které jsou vygenerované pro každou kameru, jsou převáděny do částečných hustých bodových mračen, které jsou sloučeny do finálního bodového mračna, kde jsou barvy přeneseny ze snímků. Husté bodové mračno lze i dále upravovat v software Agisoft Metashape a používá se jako základ pro Mesh a Tiled Model. Je případně možné Dense Cloud exportovat do jiných software pro další analýzu a úpravu. Vygenerování Dense Cloudu bylo opět zvoleno ve Workflow, dále byla zvolena možnost Build a Dense Cloud. V tomto kroku bylo nutné nastavit parametry celé operace. Je zde možnost Quality, Depth Filtering, Calculate point colors ANO/NE, Calculate point confidence ANO/NE. U možnosti Quality se výstupy liší v ostrosti, ale čím vyšší kvalita, tím vyšší nárok na techniku

a čas procesování. U kroku Depth Filtering je možné zvolit Mild, Aggressive, Moderate a Disable s tím, že Mild je doporučován použit v takových případech, kdy objekt, popř. zájmová lokalita, obsahuje malé detaily, které jsou prostorově odlišeny, jelikož by neměly být “vytříděny” jako nežádoucí hodnoty.

Pokud ale lokalita/objekt neobsahuje žádné smysluplné detaily, je vhodné zvolit možnost Aggressive, čímž se vyřeší většina odlehlých hodnot, jelikož budou vyfiltrovány. Standardně se tato možnost používá u leteckých dat. Volba Moderate je režim pro střední hloubkové filtrování a přináší výsledky, které jsou mezi Mild a Aggressive. Poslední možnost je Disabled, ovšem tato možnost se nedoporučuje, jelikož by výsledné husté bodové mračno mohlo být plné šumu. V rozšířeném nastavení parametrů lze nalézt kromě možnosti Depth Filtering ještě možnosti Calculate point colors a Calculate point confidence. První ze dvou zmiňovaných možností je zvolena v případě, že uživatel software Agisoft Metascape požaduje jako součást výstupu i barevný 3D model. Druhá možnost je zvolena tehdy, když chce uživatel znát počet hloubkových map, které byly pro dané husté bodové mračno použity a také tehdy, kdy by bylo nutné z nějakého důvodu filtrovat husté bodové mračno. Pro tvorbu Dense Cloudu bylo použito v rámci modelování hradu Trosky toto nastavení: Quality – Medium, Depth Filtering – Moderate a Calculate point colors zaškrtnuto “ANO”.

Při pohledu na Dense Cloud hradu se může zdát, že se již jedná o finální 3D model z toho důvodu, že je model “nedostatečně přiblížen” resp. oddálen, aby byl vidět celý, a budí tak dojem, že má na sobě souvislou vrstvu, popř. texturu. Po přiblížení a prozkoumání modelu je ovšem stále patrné, že model celistvý není, a že je složen z několikanásobného počtu bodů na rozdíl od “modelu” po operaci Align Photos, tedy Tie Points. Konkrétně je Dense Cloud hradu Trosky tvořen 18 156 879 body.

Jak je viditelné na *Obrázku č.4: Výsledek kroku Dense Cloud* níže, tak v hustém bodovém mračnu jsou jasně zřetelné díry, kde data chybí a žádné body se tam nezobrazují. Dense Cloud byl v této fázi stále neořezán, a tak případná chybějící data a mezery nebyly řešeny.



Obrázek č. 4: Výsledek kroku Dense Cloud

5.3.4 Mesh

Po vygenerování Dense Cloudu následovalo vygenerování 3D modelu. 3D model je základně tvořen spojením všech bodů předešlého Dense Cloud, vytvořením trojúhelníkové sítě, tzv. TIN (zkratka z *anglického Triangulated Irregular Network = Trojúhelníková Nepravidelná Síť*) a vyplněním ploch trojúhelníků. Zmíněný TIN je uveden pro znázornění v Příloze č. 3. Software dokáže rekonstruovat model polygonální sítě na základě informací o bodovém mračnu, které mohou být importovány z externího zdroje, nebo na základě tzv. hloubkových map.

Ve Workflow tedy byla zvolena možnost Mesh, která vytváří právě zmiňovanou síť trojúhelníků a následně jejich plochy vyplní. V nastavení parametrů Build Mesh jsou možnosti více konkrétního nastavení. Jedná se o Source data, Surface type, Quality, Face count, Interpolation, Point Classes (Calculate vertex colors, Use strict volumetric masking, Reuse depth maps).

Source data definují, odkud se data na generování sítě budou brát. Agisoft Metashape nabízí tři možnosti, odkud je data možné brát. Jedna z možností je použít Tie Points jako zdroj a nechat vygenerovat model, který bude čistě na základě spojení bodů. Při volbě Dense Cloud jako zdroje pro generování sítě bude generování trvat o hodně déle, ale výsledek bude velmi kvalitní. Nastavení zdroje jako Depth Maps umožňuje efektivní využití všech informací z pořízených snímků a je méně náročná na zdroje ve srovnání s metodou, která vychází z hustého bodového mračnu. Doporučuje se používat při modelování libovolného povrchu. V případě modelování hradu Trosky bylo zvolen jako Source data právě výše zmíněný Dense Cloud, aby byl model co nejkvalitnější.

Surface type má dvě možnosti volby. První je tzv. Arbitrary, kterou si uživatel zvolí, jestliže modeluje libovolný druh objektu a primárně se tato možnost volí v případě uzavřených objektů. Když si uživatel zvolí možnost Height field, tak se doporučuje modelovat rovinné povrchy jako jsou např. terén, reliéfy apod. Při modelování hradu Trosky bylo nastavení Surface type jako Arbitrary na základě doporučení uživatelského manuálu software.

Možnost Quality určuje požadovanou kvalitu modelování hloubkových map. V případě nastavení vyšší kvality jej lze použít k získání velice podrobné a přesné geometrie, ale celý proces pak bude trvat déle. Možnost Quality nicméně nebyla při modelování využita, jelikož tato možnost je dostupná jedině tehdy, když je zvoleno jako Source data Depth maps (Hloubkové mapy), což v případě této práce nebylo.

Face count určuje uživateli maximální počet polygonů ve finální 3D síti. Jedná se o maximální počet ploch, které vznikly spojením bodů v prostoru. Volba je mezi třemi možnostmi a to High, Medium a Low. V případě modelů, kde je zvolen jako Source data právě Dense Cloud se polygony vypočítávají na základě poměrů k počtu bodů. Jedná se o poměry 1/5, 1/15 a 1/45 respektive k možnostem High, Medium a Low. Je zde také možnost, aby si uživatel nastavil požadované hodnoty sám, ale zvyšuje se tím riziko nepřesného vygenerování. Při moc malém počtu polygonů může dojít k příliš "hrubé" síti a model bude nekvalitní. Při moc vysokém počtu polygonů může dojít k problému s vizualizací. V případě modelování hradu Trosky byla zvolena prostřední možnost Medium a software Agisoft Metashape uvedl počet polygonů v modelu jako 1 132 294.

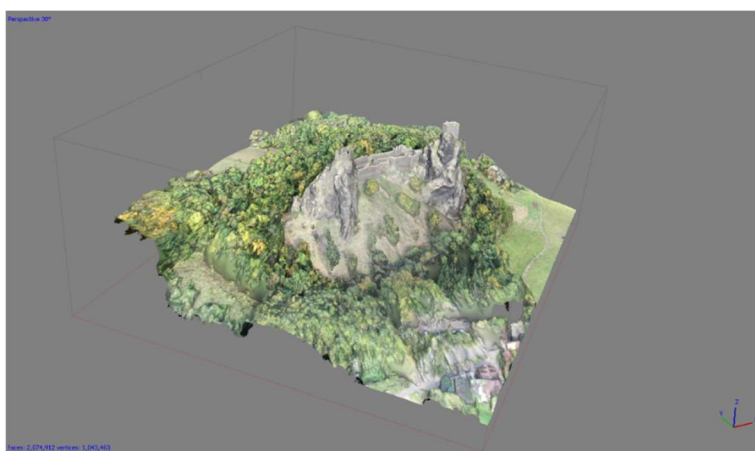
V kroku Interpolace jsou dvě možnosti: Disabled a Enabled. Disabled – možnost Interpolace je vypnutá. Jedná se o nastavení, kdy software automaticky nedopočítává prázdná místa v modelu a nezaplňuje je plochou. Model je tedy poté "děravý" a je nutné vyplnit otvory manuálně. Nativně však Agisoft Metashape používá možnost Enabled – možnost Interpolace je zapnutá, jestliže ji uživatel nevyplne. V tomto případě pak software dopočítá chybějící data a prázdná místa zaplní. Zaplňování prázdných míst probíhá tak, že software stanoví rádius kolem každého bodu hustého bodového mračka a následně vypočítaná místa zaplní. Když se ale prázdné místo nachází mimo rádius, tak zůstane prázdné, což je patrné i ve finálním 3D modelu. Pro modelování hradu Trosky byla funkce Interpolace zapnutá, za cílem vzniku co nejvíce celistvého modelu.

Další možností je volba Point Classes, kde si uživatel může zvolit jak se budou třídit konkrétní body z Dense Cloud a např. z jakých bodů bude vytvářet následný digitální model terénu/povrchu (DTM). Při modelování hradu Trosky byly jako výchozí body označeny všechny.

U možnosti Calculate vertex colors je důležité, aby data obsahovala informace o barvách. V případě povolení této množnosti jsou barvy zobrazovány i v možnosti *Shaded* (Stínované), tedy v možnosti modelu ještě bez textury. V postupu práce na modelování hradu Trosky byla zvolena možnost Vertex colors a model je tak i bez textury v barevném rozlišení.

Jako jedna z posledních možností parametrů nastavení 3D sítě je parametr Strict volume masking, což je možnost, která uživateli odfiltruje a potlačí šum, který může vzniknout v modelu v částech, které jsou blízko sebe. Software může tato místa vyhodnotit jako místa spojená, popř. že mezi místem A a B je ještě nějaký objekt, ale ve skutečnosti se jedná o objekt umístěný za místy A a B. Při modelování hradu Trosky nebylo nutné tuto možnost zvolit, neboť se jednalo o rekonstrukci budovy s přílehlým okolím, a nikoliv o drobný detail na malém objektu.

Poslední možností volby parametru při modelování 3D sítě je možnost Reuse depth maps. Tato možnost dává prostor pro znovupoužití hloubkových map pro vygenerování 3D sítě. Tento krok se používá jedině tehdy, kdy uživatel má jako Source data zvolený Depth maps. V případě hradu Trosky byl jako Source data zvolen Dense Cloud, a proto tato možnost zvolena nebyla. Výsledek vymodelování Mesh je uveden níže jako *Obrázek č. 5: Výsledek kroku Mesh*. Na němž je již patrné, že povrch je souvislý a že mezery, resp. prázdná místa bez dat, byly zaplněny.



Obrázek č. 5: Výsledek kroku Mesh

5.3.5 Textura

Textura je funkce, která umožňuje uživateli vytvářet různé typy textur a “pokládat” na model různé typy textur. Tato funkce se dá zvolit skrze panel Workflow, dále Build Texture.

Parametry této možnosti se volí obdobně, jako se volí parametry u možností předchozích. Po kliknutí na volbu Build Texture se objeví okno s rozšířenými parametry: Texture type, Source data, Mapping mode, Blending mode, Texture size, v rozšířených parametrech dále Enable hole filling, Enable ghosting filter a Transfer texture.

U možnosti Texture type si uživatel volí mezi volbou Diffuse map – základní textura, která ukládá barvy povrchu 3D modelu. Normal map – jakási mapa textury, která umožňuje vypočítat osvětlení modelu z různých světlených zdrojů a Occlusion map – textura, která obsahuje informace o osvětlení pozadí modelu. Při modelování hradu Trosky byla použita základní možnost Diffuse map, jelikož se jevila jako dostačující pro cíl práce.

Další možností při vytváření textury byla volba Source data pro texturu. Zde si uživatel má možnost zvolit mezi Images a 3D model, kde Images umožňují vytvořit barevnou texturu ze zarovnaných snímků (Aligned photos). Naopak možnost 3D model je složitější a data o textuře bere z jiného modelu. Model hradu Trosky má jako Source data zvoleno Images.

Následující volby parametrů umožňuje funkce Mapping mode, který nabízí 6 možností volby – Generic, Orthophoto, Adaptive orthophoto, Spherical, Singel camera a Keep uv. V případě volby Generic uživatel dostane co nejvíce souvislou texturu, kterou program vygeneruje. U volby Orthophoto je vytvářena textura v režimu orthophoto mapování. Adaptive orthophoto možnost rozděluje celý objekt na horizontální a vertikální části, nicméně slouží primárně pro vytváření textury u rovinných objektů. Spherical možnost je vhodná pro objekty, které mají kulovitý charakter. Při této volbě by měl být celý model v rámci tzv. Bounding box, tedy pomyslné x, y, z kvádrové hranice, která je při modelování v software stále viditelná a spodní červená část by měla být pod celým kulovitým modelem. Možnost Single camera je vhodná pro tvorbu textury “modelu”, který je tvořen jedním snímkem. Poslední možnost Keep uv umožňuje např. upravovat texturu jiným rozlišením, uchovává seznam textur a umožňuje přenos textur do jiných software. Pro modelování

hradu Trosky byla zvolena možnost Generic z důvodu nenáročnosti operace a z toho důvodu, že tato možnost byla pro cíle práce vyhodnocena jako dostačující.

Možnost Blending Mode nastavuje hodnoty pixelů různých snímků a určuje, jak se tyto hodnoty budou kombinovat do finální textury. Nabízí volby Mosaic, Average, Max Intensity, Min Intensity a Disabled. V případě volby Mosaic se jedná o postup, kde software využívá kombinaci nízkofrekvenčních a vysokofrekvenčních složek. Nízkofrekvenční složka má na starost pixely snímků a vysokofrekvenční má na starost detaily převzaté z jednoho snímku a aplikaci na ostatní.

Volba Avrage uživateli stanovuje průměrnou hodnotu všech pixelů. U volby Max Intensity software vybírá právě ten snímek, který má největší intenzitu pixelu. Opakem této volby je Min Intensity, kde software vybírá snímek, kde je intenzita pixelu nejnižší. Poslední možnost je Disabled, kde software vybírá hodnotu pixelu z mosaiky. V případě modelování hradu Trosky byla vybrána možnost Mosaic, tedy kombinace dvou složek.

Následovala volba parametru Texture size/count, kde si uživatel má možnost zvolit velikost textury a také počet souborů. Dle Uživatelského manuálu je doporučeno ukládat texturu do většího počtu souborů. Zabráni se tím selhání kvůli omezení RAM počítače. Výsledek tohoto kroku Texture size v případě modelování hradu Trosky je hodnota Max. dimensions nastavena na 4096. Možnost Enable hole filling potlačuje šum vzniklý pixely. Jedná se o efekt zvaný salt-and-pepper (Kelly a kol., 2011). Tato možnost byla v průběhu práce povolena. Poslední volbou parametru při tvorbě textury je možnost Enable ghosting filter. Tuto možnost je doporučeno zapínat tehdy, pokud byly během náletu snímků vyfotografovány i objekty, které se pohybují a vytváří tak nejasné objekty bez struktury, tzv. duchy. Při modelování hradu Trosky byla tato možnost zapnutá. Výsledek vygenerování modelu s texturou je uveden níže jako *Obrázek č. 6: Výsledek kroku Textura*. Na tomto modelu jsou již viditelné jednotlivé pixely tvořící detaily celého modelu. Tento krok je zároveň posledním krokem v tvorbě 3D modelu státního hradu Trosky.

Dále došlo k ořezání všech předešlých výstupů, aby model odpovídal zadání a neobsahoval nepožadované části (přilehlé budovy, parkoviště, jiné příjezdové komunikace a jiné nežádoucí objekty). Veškeré ořezané výstupy, tedy finální výstupy celého modelování včetně následujících výstupů, jsou součástí této práce v části *Výsledky*.

Model je v tomto stádiu také možné vyobrazit v různých variantách. Jedná se o variantu Shaded, která odpovídá modelu bez textury, tedy výstupu Mesh, poté je možné model zobrazit jako Solid, což je model bez jakékoliv barvy. Software Agisoft Metashape jej zobrazuje v modro-šedivé barvě a standardně se takto vygenerované modely používají i pro 3D tisk. Další možnost zobrazení je možnost Wireframe, která zobrazuje jednotlivé trojúhelníkovité polygony celého modelu, tedy spojnice mezi body v prostoru.



Obrázek č. 6: Výsledek kroku Textura

5.3.6 Digitální model povrchu (DEM)

Digitální model povrchu je tzv. 2,5D zobrazení lokality, jejíž buňky zobrazují konkrétní hodnoty výšky. Digitální model povrchu lze provést pouze tehdy, kdy software obsahuje i informace o rozměru modelovaného objektu. Standardně k tomu slouží souřadnicový systém a georeferencovaný model.

V okně Workflow se jako další z možností generování modelů zvolí Build DEM. Ve volbě parametrů jsou následující možnosti: Projection, Source data, Quality, Interpolation, Point classes.

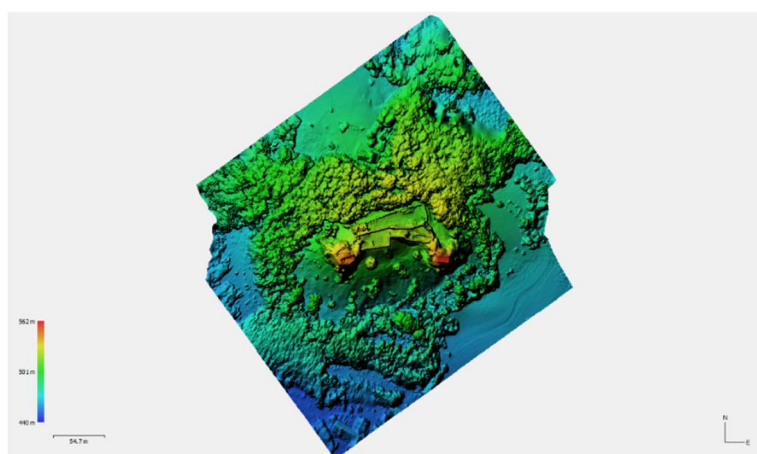
V případě možnosti Projection uživatel volí mezi třemi možnostmi. Geographic – zde je nutné zvolit souřadnicový systém. Planar – zde se DEM promítne do uživatelem zvolené roviny. Cylindrical – zde je možné DEM promítnout na kulovitý povrch. V případě generování DEM hradu Troseky a okolí byla zvolena první možnost, tedy možnost Geographic v souřadnicovém systému WGS 84.

Source data je opět jako v předešlých krocích možnost, odkud se budou na následující krok brát data. Možností je více, ale doporučeno je data poskytovat ze zdroje Dence cloud a stejný zdroj byl zvolen i v případě DEM Trosek.

Parametr Quality je umožněn zvolit tehdy, když jsou jako Source data zvoleny hloubkové mapy, proto v případě generování DEM hradu Trosky tato možnost zvolena nebyla.

Pakliže je Interpolation vypnut (Disabled), software vygeneruje DEM plně prázdných míst v případě chybějících dat. Když je tato funkce zapnuta (Enabled), tak si software automaticky prázdná místa přibližně dopočítá a data do 2,5D modelu dosadí. Proto při modelování zájmového území této práce byla možnost Interpolation povolena.

Volba Point Classes, která byla řešena výše v podkapitole Mesh, je v parametrech DEM uvedena znovu za stejných podmínek. Zde si uživatel volí třídy, do jakých mají být body rozřazeny a ze kterých tříd se DEM bude generovat. V případě vygenerování DEM hradu Trosky byly zvoleny pro generování všechny body a vygenerování DEM trvalo 28 sekund. Výsledek části DEM je uveden níže jako *Obrázek č. 7: Výsledek kroku DEM.*



Obrázek č. 7: Výsledek kroku DEM

5.3.7 Orthomosaika

Orthomosaika je 2D zobrazení vzniklé sloučením všech snímků a jejich následná transformace. Tvorba Orthomosaiky se volí v okně Workflow, Build Orthomosaic. Obdobně jako u Digitálního modelu povrchu je u Orthomosaiky možnost vybrat mezi volbami Geographic, Planar a Cylindrical. Podmínky jsou také obdobné, tedy u Geographic je zvolen souřadnicový systém, u Planar může uživatel zvolit orientaci roviny, kam Orthomosaiku vloží a Cylindrical slouží primárně

na kulovité povrchy. U vytváření Orthomosaiky hradu Trosky byl ponechán typ Geographic.

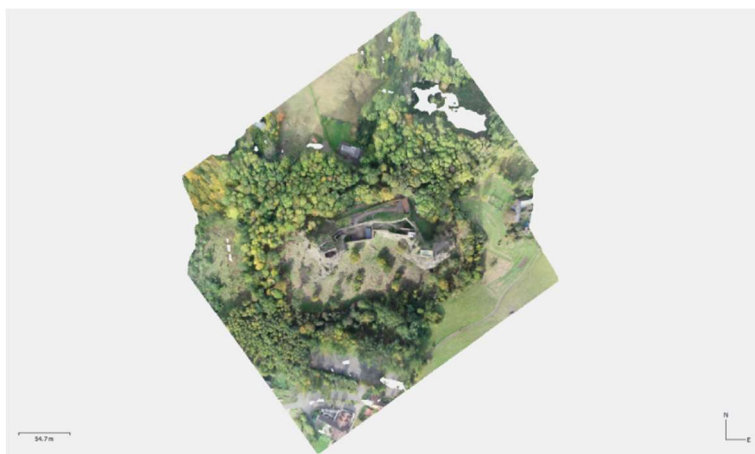
Surface je další z možností parametrů, kde uživatel volí, jaký typ povrchu bude Orthomosaika mít. Obecně je doporučován typ DEM, je ale možné zvolit i Mesh. V případě hradu Trosky byl zvolen doporučovaný typ DEM.

Další z volitelných parametrů je Blending mode. Zde si uživatel volí mezi Mosaic, Average a Disabled. Typ Mosaic je jakási kombinace dat o barevnosti modelu, která jsou na sobě nezávislá. Average je průměr mezi pixely nesoucími data o barvách modelu. V případě Disabled nejsou data o barvách brány z pixelů, ale ze snímku, který je k pozorovanému území kolmý. Během procesu Orthomosaiky hradu Trosky proto byla zvolena možnost Mosaic.

Pixel size je jedna z dalších možností v parametrech Orthomosaiky. Nastavení velikosti pixelu je možné vidět ve File -> Export -> Export Orthomosaik -> Export JPEG/TIFF/PNG. Zde je vidět, jak má uživatel nastavenou hodnotu pixelu, což by mělo být shodné s tím, co uživatel uvidí v dialogovém okně Build Orthomosaic v sekci Pixel size. Obecně je doporučeno tuto hodnotu neměnit. V případě vytváření Orthomosaiky hradu Trosky se tedy hodnoty neměnily.

Max. dimension slouží pro nastavení maximálního rozměru výstupu. Uživatel může zvolit možnost Pixel Size, anebo možnost Max. dimension.

Možnosti Enable hole filling je opět nastavení, které umožní uživateli potlačit šum vzniklý pixely. V případě tvorby Orthomosaiky Hradu Trosky byla tato možnost zapnutá. Výsledek tohoto kroku je uveden níže jako *Obrázek č.8: Výsledek kroku Orthomosaika*. Tento krok trvalo vygenerovat 35 minut a 57 sekund.



Obrázek č. 8: Výsledek kroku Orthomosaika

6. Výsledky

Práce měla za cíl vymodelovat z 2D snímků státního hradu Trosky, které byly pořízené 20. 10. 2020, kompletně georeferencovaný, zalícovaný a ořezaný 3D model. Dále bylo cílem vytvořit digitální model terénu a orthomosaika. Finální podobě výstupů předcházela úprava dílčích výstupů. Vygenerované výstupy byly ořezány tak, aby bylo splněno zadání – výstupy se týkaly jen zájmové lokality, a nikoliv přilehlého území, které bylo pomocí UAV také zdokumentováno. Vygenerované výstupy jsou výstupy Tie points, Dense cloud, Mesh, Textura (Mesh s texturou), Digitální model povrchu (DEM) a Orthomosaika. Výsledný 3D model je k nahlédnutí na platformě SharePoint skrze níže uvedený QR kód popř. skrze odkaz: <https://1url.cz/2KAqO>



6.1 Tie points

Jedná se první výstup, který uživatel dostane po akci Align Photos. Po všech úpravách a postupech, které jsou uvedeny v kapitole 5.3.2 Align Photos, kde je uveden pracovní postup, bylo vytvořeno ořezané mračno bodů: *Obrázek č. 9: Výsledné Tie points*. Detailní pohled na výstup Tie Points je uveden v Příloze č. 1.



Obrázek č. 9: Výsledné Tie points

6.2 Dense Cloud

Tento výstup je druhý výstup, který bylo nutné vytvořit k docílení výsledného 3D modelu. Jedná se o výstup Dense cloud, tedy husté bodové mračno. Na rozdíl od Tie Points, kde bylo 184 227 bodů, Dense cloud obsahuje bodů 18 156 879, což je patrné i na “kvalitě” vygenerovaného mračna, jak zobrazuje *Obrázek č. 10: Výsledný Dense Cloud*, který je uveden níže. Detailní zobrazení je dále uvedeno jako Příloha č. 2.



Obrázek č. 10: Výsledný Dense Cloud

6.3 3D Model (Mesh, Mesh s texturou)

Funkce Mesh je funkce, která pokryje model barevnými polygony a objekt tak již není tvořen pouze jednotlivými body, ale později i pixely. To plyne z postupu, který je uveden v části této práce 5.3.4 Mesh. Níže je zobrazena první fáze,

kde Mesh/3D model, není ještě pokryt texturou, viz. *Obrázek č. 11: Výsledný Shaded Mesh*. Detailní a větší pohled modelu bez textury je dále uveden jako Příloha č. 6.



Obrázek č. 11: Výsledný Shaded Mesh

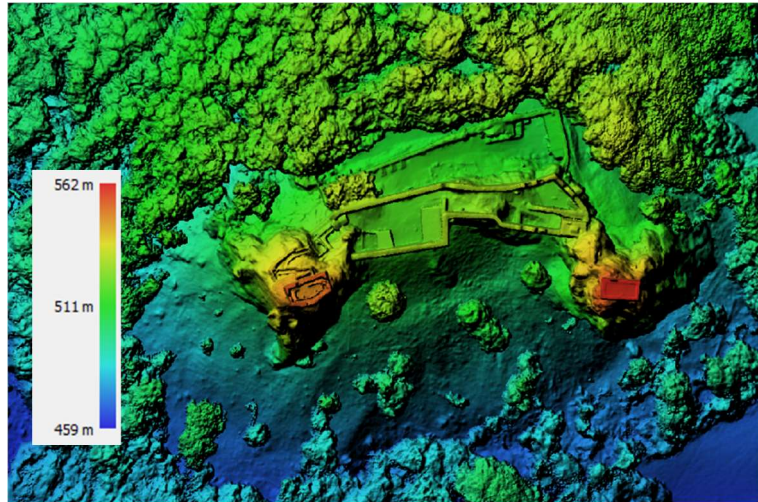
Následně byla modelu dodána textura, což ukazuje níže *Obrázek č. 12: Výsledný 3D model s texturou*. Jedná se tedy o první finální výsledek této práce – 3D model Státního hradu Trosky. Detailní a větší pohledy 3D modelu jsou uvedeny jako Příloha č. 4 a č. 5.



Obrázek č. 12: Výsledný 3D model s texturou

6.4 Digitální model povrchu (DEM)

Tento výsledek práce, který je tzv. 2,5D, byl ořezán. Není součástí 3D modelu, ale vychází ze stejných dat. Postup vygenerování DEM je uveden v části 5.3.6 Digitální model povrchu (DEM). Jedná se o druhý finální výstup této práce. Je vyobrazen níže jako *Obrázek č. 13: Výsledný Digitální model povrchu*.



Obrázek č. 13: Výsledný Digitální model povrchu

6.5 Orthomosaika

Poslední, finální výsledek této práce je Orthomosaika, která byla ořezána o nepotřebná místa. Zdroj je obdobně jako u Digitálního modelu povrchu stejný, jako u ostatních výstupů. Postup, jakým byla Orthomosaika tvořena je uveden v části 5.3.7 Orthomosaika této práce. Finální výsledek je uveden níže pod názvem *Obrázek č. 14: Výsledná Orthomosaika*.



Obrázek č. 14: Výsledná Orthomosaika

Software Agisoft Metahsape nabízí uživateli možnost si po ukončení modelování a zbylých operacích vygenerovat tzv. Procesní report, na jehož základě je možné zhodnotit výsledná data. První výstup reportu této práce, Údaje z průzkumu (Survey Data), ukazuje, že tzv. projekční chyba, tedy střední kvadratická chyba projekce zprůměrovaná přes všechny body ve všech snímcích (= Reprojection error) jsou pouhé 2.32 pixelu. Tento výsledek je hodnocen jako velice pozitivní, jelikož dodaná data měla dané parametry, které nešlo nijak změnit. Bylo by proto vhodné, kdyby se nálet snímků opakoval a data by byla následně zpracována, vyhodnocena a porovnávána nejen s tímto výsledkem. Zároveň výstup Survey data ukazuje, že v průběhu snímkování docházelo k překryvu více jak 9 snímků v rámci zájmové lokality. Na okraji zájmové lokality počet překryvů klesá. Dále tato část zobrazuje počet snímků (544), počet Tie Points (184 227), pokryté území (0.102km²), přibližnou výšku náletu (92 m), typ kamery (FC6310) a počet projekcí všech platných Tie Points (885 932).

Další z výstupů reportu je tzv. Kalibrace kamery (Camera Calibration). Kalibrace kamery na stroji před letem neproběhla, jelikož se používá u přesnějších užití. V této sekci je umístěn graf, který zobrazuje maximální odchylky od skutečnosti. Graf zobrazuje tzv. distorzi, tedy zakřivení čočky, které vytváří odchylku od dané skutečnosti. U výstupů této práce je tak možné, že v krajích snímané plochy dochází k odchylce, která ale není větší než 1 pixel. Tento graf je uveden jako Příloha č. 7. Obecně je tento výsledek považován za velmi dobrý. Ohnisková vzdálenost na kameře UAV byla dle reportu 8.8 mm, bylo by proto vhodné do budoucna vyzkoušet i jiné čočky pro porovnání, jestli bude dosaženo obdobného, nebo jiného výsledku a následně výsledek vyhodnotit. Dále tato část reportu uvádí velikost pixelu (2.41 x 2.41 μ m) rozlišení (5 471 x 3 648).

Výstup Lokace kamery (Camera Locations) zobrazuje odchylku pozice kamery od reálné pozice. Na osách X a Y je odchylka v nižších rádech metrů. V ose Z je ovšem odchylka již 92 m. Tento jev je pravděpodobně zaznamenán díky problému s GNSS modulem, který je méně přesný, než je pozemní měření. Pravděpodobně proto v průběhu modelování bylo nutné umístit markery na svá GCP manuálně. Z těchto výše zmíněných důvodů by bylo vhodné v budoucnu uvažovat o opětovném náletu se strojem, který má modul přesný. Hodnoty této části jsou zobrazeny v Tabulce č. 2: Lokace kamery.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
5.99454	4.64092	92.7235	7.58107	93.0329

Tabulka č. 2: Lokace kamery

Součástí reportu je i výstup týkající se pozemních kontrolních bodů (Ground Control Points). Tento výstup udává odchylku GCP od umístění markeru. Zobrazuje všechny použité GCP (8). Na ose X je odchylka 3,66 cm, na ose Y je odchylka 4,33 cm a na ose Z je odchylka 2,14 cm. Nejpřesněji je umístěn marker č. 10 (celková odchylka = 1,3 cm) a nejméně přesně je umístěn marker č. 9 (celková odchylka = 8,78 cm). Nejpřesněji byly markery umístěny na osu Z (celková odchylka všech markeů na ose Z = 2,14 cm). Konkrétněji jsou hodnoty popsány v Příloze č. 8.

Výstup Digitálního modelu povrchu (DEM) zobrazuje rozlišení DEM (10,3 cm/pix) a hustotu bodů v DEM (93,9 bodů/m²). Zároveň zobrazuje celkový Digitální model povrchu. Posledními výstupy reportu jsou Procesní parametry, kde jsou shrnuta veškerá nastavení, která byla zadávána během modelování. Jedná se o data časová, kvalitativní nastavení výstupů, kvantitativní nastavení výstupů a další data a nastavení, která byla vygenerována nebo nastavována během konkrétních operací.

7. Diskuse

Obecně lze konstatovat, že výsledný model hradu Trosky je nejen na základě obdržených dat z reportu kvalitní. Výsledky byly také srovnány s výsledkem studie Patricio Martínez-Carricondo, 2020, kde autor modeloval trosky bývalého statku Cortijo del Fraile ve Španělsku. Ochylky umístění markerů do skutečných GCP a tedy přesnost zalícování, které uvádí zmiňovaná studie, jsou na ose X a ose Y 13,3 cm, na ose Z je odchylka 8,6 cm. Celkem tedy činí odchylka 15,9 cm (Martínez-Carricondo, 2020). Dále bylo umístění markerů srovnáno se studií Supaporn Manajitprasert, 2019. V této studii autor modeloval dvě věžové stavby Chedi a Prang v Thajsku. V případě stavby Prang byla odchylka na ose X a Y 6,6 cm a na ose Z 5,4 cm. U stavby Chedi se jednalo o odchylku 6,9 cm na ose X a Y a 2,1 cm na ose Z (Manajitprasert, 2019). Přesnost zalícování modelu v této práci tak leží mezi výsledky obou studií. Tyto hodnoty bakalářské práce jsou uvedené v Příloze č. 8.

Jako vhodný následující krok by i tak bylo zajímavé srovnání s jiným objektem v obdobném stavu. Tedy zříceninou na skále obklopenou hustou vegetací. Jako jedna z možností se nabízí stejnou metodou vymodelovat zříceninu hradu Točnick. Zřícenina tohoto hradu se nachází ve Středočeském kraji nedaleko CHKO Křivoklátsko. Obdobně jako hrad Trosky tak i Točnick je umístěn na skále, tvoří ho dvě dominantní budovy a je obklopen hustou vegetací. Další z možností by bylo vymodelovat zříceninu hradu Bezděz, která se nachází v Libereckém kraji nedaleko CHKO Kokořínsko – Máchův kraj. Důvod je stejný jako u zříceniny hradu Točnick, jedná se o zříceninu na skále obklopenou hustou vegetací. Následně by byla tato data porovnána a byly by vyhodnoceny faktory, které modelování jednotlivých modelů limitují.

Modelování těchto krajinných prvků by mohlo proběhnout i v jiném software, např. v Pix4D. Výsledný 3D model s texturou může sloužit k plánování rekonstrukce hradu, k plánování revitalizace okolí hradu nebo např. pro další možná měření spojená s budovami hradu Trosky. Jednou z možností by byl také pravidelný monitoring vegetace. Skrze vygenerovanou orthomosaiku by se monitorovalo okolí hradu Trosky a následně dle výsledků monitoringu by se sestavoval plán managementu vegetace.

Je také možné model dále zpracovávat a upravovat. Zpracováním se myslí např. 3D tisk, který je popsán detailněji v kapitole 7.1. Pro další detailnější mapování terénu je také možné použít digitální model povrchu a orthomosaiku, jako jednu z výsledků této práce.

7.1 Možnosti 3D tisku hradu Trosky

V případě 3D tisku modelu hradu Trosky by bylo nutné data i 3D model patřičně upravit. Model jako takový se dá uložit ze software Agisoft Metashape do různých formátů: OBJ, 3DS models, VRML models, COLLADA, Stanford PLY, X3D models, STL models, Alembic, Autodesk FBX, Autodesk DXF Polyline, Autodesk DXF 3Dface, OpenSceneGraph, Binary Gitg, U3D models, Adobe PDF a Google Earth KMZ (Kaminsky a kol., 2014).

Pro 3D tisk se obecně používá výše zmíněný formát STL, což je zkratka slova stereolitografie (Kaminsky a kol., 2014) a následně je z STL formátu vygenerován „G code“ (Wei a kol., 2021). V případě potřeby by tak byl model vyexportován do formátu STL a uložen. Následně by se dal model bez textury, tedy bez barevného rozlišení, prohlížet a základně upravovat např. v programu Microsoft Windows 3D Malování. Aby se dal model vytisknout, je potřeba k tomu použít program, který by uživateli umožnil model „rozvrstvit“ tak, jak by bylo požadováno do jednotlivých pater. Programu, který tuto funkci má, se obecně říká tzv. slicer a má tři základní funkce nutné pro následující 3D tisk. Těmito funkcemi je import 3D dat, rozvrstvení modelu, export dat (Guan a kol., 2021).

V případě možného tisku 3D modelu hradu Trosky však nastal problém primárně s vegetací, kterou model obsahuje. Po importování STL souboru do programu zvrstvování se ukázalo, že vegetační pokryv je tak hustý a detailně vymodelovaný, že tvoří problematická místa, kde by tisk nemohl proběhnout.

3D tiskárna tiskne po ose Z od nulových hodnot až po ty maximální po vrstvách směrem vzhůru po ose Z. Vegetace, např. strom a primárně jeho koruna, však tvoří pro tisk ve směru osy Z následující problém. U korun totiž často chybí data, která jsou pod korunami, a tak se při detailnějším pohledu může zdát, že koruny stromů „levitují“ nad stromy, případně nejsou na kmen stromu dostatečně napojeny. Z perspektivy modelování hradu Trosky to problém není, ale 3D tiskárně v těchto místech by chyběla data a tiskla by tzv. „do vzduchu“.

Po nahrání modelu do slicer software Cura se výše uvedený předpoklad potvrdil. Software si automaticky dopočítal podpory v místech, kde data chyběla, nicméně těchto míst bylo tolik, že byl původní záměr 3D tisk modelu přehodnocen z důvodu náročného následného zpracování. Tento krok ještě potvrdil fakt, že modelu

jako takovému by musel být domodelován podstavec a vložen pod model, aby mohl tisk zájmového území a hradu Trosky proběhnout.

Možná alternativa, kdy by bylo možné model hradu vytisknout, by byla, kdyby byl hrad podél vnějšího zdiva oříznut od okolí a od veškeré vegetace. Poté by byl modelu domodelován podstavec, který by vyrovnával nerovnosti spodní části modelu. Model není totiž plný, ale jeho vlastnost se dá popsat jako skořepina.

Následně by byl tento model (hrad Trosky + podstavec) vložen jako celek do programu Cura, nebo jiného programu, který umožňuje zvrstvování modelů. Modelu by byl vygenerován tzv. G-code a tento kód by byl vložen do 3D tiskárny s požadovaným nastavením a následně vytisknut. Jako další z možností by bylo vytvořit detailní modely vegetačních pokryvů v zájmové lokalitě a zároveň detailní model hradu Trosky a z tohoto datasetu vymodelovat nový model, obnášelo by to ale několikanásobně vyšší počet snímků, čas zpracování a velikost dat. Musely by takto být zmapovány povrchy veškeré okolní vegetace a objektů s nepravidelným povrchem, aby během 3D tisku data nechyběla, což by bylo jak časově náročné, tak primárně náročné na počítačový hardware.

8. Závěr

Na základě dodaných dat byl vytvořen 3D model, který byl následně georeferencován a umístěn do prostoru. Součástí výstupu, který byl vytvářen v software Agisoft Metashape, je také digitální model povrchu (DEM) a orthomosaika. 3D model hradu Trosky je umístěn na internetovém úložišti SharePoint skrze odkaz a QR kód. Obecně lze konstatovat, že dodaná data byla dostatečně kvalitní pro vytvoření potřebných kvalitních výstupů.

Tato práce prokazuje, že fotogrammetrie včetně metody Structure from Motion je metodou přínosnou, pomocí které lze přenášet nejen terén do digitální formy skrze 2D snímkování, ale i jiné objekty a části vegetace. Při správném nastavení, správném vybavení a správném postupu je metoda přesná a model je tak umístěn do prostoru s přesností na centimetry, což prokazuje výsledný vygenerovaný Procesní report. Uživatel musí dbát zvýšené pozornosti při zpracovávání dat, kdy je možné, že všechny automatické operace nepracují tak jak mají a je nutné je manuálně opravit a vyřešit, jako tomu bylo při chybném automatickém umístění markerů v této práci.

Na základě této bakalářské práce lze zopakovat pracovní postup tak, aby autor docílil výsledků obdobných kvalit, jako přináší tato práce. Postup je možné aplikovat i na jiné objekty, což by bylo přínosné pro srovnání budoucích výstupů s výstupy této práce.

9. Seznam použité literatury

Adade R., Musa Aibinu A., Ekuham B., Asaana J., 2021: Unmanned Aerial Vehicle (UAV) applications in coastal zone management—a review. *Environ Monit Assess* 193: 154: 1–12.

Aswini N., Krishna Kumar E., Uma S. V., 2018: UAV and obstacle sensing techniques - a perspective. *International Journal of Intelligent Unmanned Systems* 6: 32–46.

Barbasiewicz A., Widorski T., Daliga K., 2018: The analysis of the accuracy of spatial models using photogrammetric software: Agisoft Photoscan and Pix4D. *E3S Web of Conferences* 26: 1–5.

Barborka P., 2016: Analýza metod pro detekci příznaků v digitalizovaném obraze. *Západočeská univerzita, fakulta aplikovaných věd, Katedra kybernetiky, Plzeň. (bakalářská práce). „nepublikováno“.* Dep. Archiv ZČU v Plzni.

Berber M., Munjy R., Lopez J., 2021: Kinematic GNSS positioning results compared against Agisoft Metashape and Pix4d mapper results produced in the San Joaquin experimental range in Fresno County, California. *Journal of Geodetic Science*: 47–59.

Böhm J., 2002: Fotogrammetrie, učební texty, Vysoká škola báňská – technická univerzita Ostrava, Hornicko – geologická fakulta, Institut geodézie a důlního měřictví, Ostrava.

Castan-Cubero M., Schneider-Zapp K., Bellomo M., Shi D., Rehak M., Strecha C., 2018: Assessment Of The Radiometric Accuracy In A Target Less Work Flow Using Pix4D Software. 2018 9th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS): 1–4.

Colomina I. et Molina P., 2014: Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92: 79–97.

Czernin M., 2021: Posouzení využití loveckých aplikací při společných lovech. *Česká zemědělská univerzita, Fakulta lesnická a dřevařská, Katedra hospodářská a správní služba v lesnictví, Praha. (bakalářská práce). „nepublikováno“.* Dep. SIC ČZU v Praze.

Di Angelo L., Di Stefano P., Guardiani E., 2021: A Photogrammetry Reconstruction of Emissario Romano in Capistrello. *Design Tools and Methods in Industrial Engineering II*: 920–929.

Drahotská Z., 2017: Český ráj – turisticky přetížené území? *Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta, Geografický ústav, Brno. (bakalářská práce). „nepublikováno“.* Dep. Archiv Masarykovy univerzity.

Fergus R., 2013: Lecture 6: Multi-View Stereo & Structure from Motion – 11_12_multiview.pdf <http://cs.nyu.edu/~fergus/teaching/vision/11_12_multiview.pdf

Ferrari R., Lachs L., Pygas R. D., Humanes A., Sommer B., Figueira F. W., Edwards J. A., Bythell C. J., Guest R., J., 2021: Photogrammetry as a tool to improve ecosystem restoration. *Trends in Ecology & Evolution* 2889: 1–9.

Furukawa Y., Hernández C., 2015: Multi-View Stereo: A Tutorial, Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision 9: 1–148.

Gross J., Gu Y., Rhudy M., 2016: Fixed-Wing UAV Attitude Estimation Using Single Antenna GPS Signal Strength Measurements. Aerospace 3, č. 14: 1–12

Guan Y., Sun X., Jin L., Guo X., Zhang Z., Shui G., Ma L., 2021: Development of 3D printing entity slicing software. Research & Development 18: 587–592.

Iglhaut J., Cabo C., Puliti S., Piermattei L., O'Connor J., Rosette J., 2019: Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: a Review. Current Forestry Reports 5: 155–168.

Inzerillo L., Di Mino G., Roberts R., 2018: Image-based 3D reconstruction using traditional and UAV datasets for analysis of road pavement distress. Automation in Construction 96: 457–469.

Jacq K., Ployon E., Rapuc W., Blanchet C., Pignol C., Coquin D., Fanget B., 2021: Structure-from-motion, multi-view stereo photogrammetry applied to line-scan sediment core images. Journal of Paleolimnology 66: 549–260.

Kaminsky W., Snyder T., Stone-Sundberg J., Moeck P., 2014: One-click preparation of 3D print files (.stl, *.wrl) from *.cif (crystallographic information framework) data using Cif2VRML. Powder Diffraction 29: 42–47.*

Kasser M., Engels Y., 2001: Digital photogrammetry. Taylor and Francis, London, 351 s.

Kelly M., Blanchard D. S., Kersten E., Koy K., 2011: Terrestrial Remotely Sensed Imagery in Support of Public Health: New Avenues of Research Using Object-Based Image Analysis. Remote Sensing 3.: 2321–2345.

Kráčmera L., 2013: Český ráj a Máchův kraj – cykloturistika v regionu a zajištění příslušných služeb. Vysoká škola regionálního rozvoje, Praha. (bakalářská práce). „nepublikováno“. Dep. Archiv Vysoká škola regionálního rozvoje.

Lastilla L., Ravanelli R., Crespi M., 2020: First test of Agisoft Metashape satellite image processing for DSM generation: A case study on Trento with Pléiades imagery. International Geoscience and Remote Sensing Symposium: 897–900.

Maharni M., Charieninna A., Nugroho H., 2020: Identification of photo number effect for 3D modeling in Agisoft software. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 500. The Fifth International Conferences of Indonesian Society for Remote Sensing.

Manajitprasert S., Tripathi N. K., Arunplod S., 2019: Three-dimensional (3D) modeling of cultural heritage site using UAV imagery: A case study of the pagodas in Wat Maha That. Applied Sciences, 9(18), 3640.

Nakano. T., Kamia I., Tobita M., Iwagashi J., Nakajima H., 2014: Landform monitoring in active volcano by UAV and SFM – MVS Technique. Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL – 8: 71–75.

Martínez-Carricondo P., Carvajal-Ramírez F., Yero-Paneque L., Agüera-Vega F., 2020: Combination of nadiral and oblique UAV photogrammetry and HBIM for the virtual reconstruction of cultural heritage. Case study of Cortijo del Fraile in Níjar, Almería. Building research & information, 48(2), 140-159.

Nařízení komise v přenesené pravomoci (EU) 2019/945 ze dne 12. března 2019 o bezpilotních systémech a o provozovateli bezpilotních systémů ze třetích zemí.

Pavelka K., 2003: Fotogrammetrie, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Plzeň, ISBN 80-7082-972-9.

Perov A. I., Charisov V. N., 2010: GLONASS, Principles, Architecture and Function. Radiotechnika, Moskva, 800 s.

Plán péče o chráněnou krajinnou oblast Český ráj na období 2014-2023, Agentura ochrany přírody a krajiny České republiky a Správa Chráněné krajinné oblasti Český ráj.

Plán péče o Přírodní památku Trosky na období 2017-2026, Občanské sdružení Bradlecké bučiny, 2016.

Purandare V., Talele T. K., 2014: Efficient heterogeneous face recognition using Scale Invariant Feature Transform, International Conference on Circuits, Systems, Communication and Information Technology Applications (CSCITA): 305–310.

Scianna A., La Guardia M., 2019: Survey and Photogrammetric Restitution of Monumental Complexes: Issues and Solutions—The Case of the Manfredonic Castle of Mussomeli. Heritage, 2(1), 774-786.

Shahmoradi J., Talebi E., Roghanchi P., Hassanalian M., 2020: A Comprehensive Review of Applications of Drone Technology in the Mining Industry. Drones 4 (3), 34: 1–25.

Shuanggen J., Cardellach E., Xie F., 2014: GNSS Remote Sensing 19. Springer Science + Business Media, Dordrecht, 276 s.

Sklenička P., Vorel I., 1999: Péče o krajinný ráz cíle a metody. Sborník přednášek a diskusních příspěvků z kolokvia konaného 17. a 18. února na Fakultě architektury v Praze. ČVUT Praha.

Šimíček M., 2014: Implementace metody Structure from Motion do UAV fotogrammetrie. Univerzita Palckého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Olomouc. 64 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep. Archiv UP v Olomouci.

Tinkham T., Swayze C. N., 2021: Influence of Agisoft Metashape Parameters on UAS Structure from Motion Individual Tree Detection from Canopy Height Models. Forests 12, 250: 1–14.

Tmušić G., 2020: Current practices in UAS-based environmental monitoring. Remote Sensing 12.6: 1001.

Uživatelský manuál Agisoft Metashape Professional, verze 1.6

Uživatelský manuál Agisoft Metashape Professional, verze 1.8

Uživatelský manuál Pix4D, 2017

Wei X., Urban P., Rizman S., 2021: Improving 3D printing methods to create versatile sleeves for the printing industry. J. Print Media Technol. Res. 10: 153–162.

Internetové zdroje:

Český ráj, Pojizeří a Podkrkonoší, [cit. 2022.02.13] < <https://www.cesky-raj.cz/>>

NPÚ: Trosky, Oficiální webová prezentace státního hradu, [cit. 2022.02.11] <<https://www.hrad-trosky.cz/cs>>

Region-tour.cz: Hrad Trosky, [cit 2022.02.10] < <https://www.hradtrosky.eu/>>

AOPK ČR: Krajinný ráz a výstavba, [cit. 2022.02.11] < <https://www.ochranaprirody.cz/obecna-ochrana-prirody-a-krajiny/krajiny-raz-a-vystavba/>>

Zákon pro lidi: Zákon o ochraně přírody a krajiny, 114/1992 Sb. §2, [cit. 2022.02.10] <<https://www.zakonyprolidi.cz/cs/1992-114>>

Seznam obrázků, tabulek a příloh

Obrázek č.1: Zobrazení principu sběru a hodnocení dat metodou SfM pomocí pohyblivého UAV	7
Tabulka č. 1: Údaje z průzkumu.	16
Obrázek č. 2: Výsledek kroku Align Photos — Tie Points.	19
Obrázek č.3: Umístění vhodných markerů	21
Obrázek č. 4: Výsledek kroku Dense Cloud	23
Obrázek č. 5: Výsledek kroku Mesh	25
Obrázek č. 6: Výsledek kroku Textura	28
Obrázek č. 7: Výsledek kroku DEM	29
Obrázek č.8: Výsledek kroku Orthomosaika	30
Obrázek č. 9: Výsledné Tie points	32
Obrázek č. 10: Výsledný Dense Cloud	32
Obrázek č. 11: Výsledný Shaded Mesh	33
Obrázek č. 12: Výsledný 3D model s texturou	33
Obrázek č. 13: Výsledný Digitální model povrchu.....	34
Obrázek č. 14: Výsledná Orthomosaika	34
Tabulka č. 2: Lokace kamery.	36
Příloha č. 1: Detailní zobrazení kroku Tie Points	46
Příloha č. 2: Detailní zobrazení kroku Dense Cloud.....	46
Příloha č. 3: Detail zobrazení kroku TIN.....	47
Příloha č. 4: Detailní zobrazení kroku Mesh s texturou č. 1	47
Příloha č. 5: Detailní zobrazení kroku Mesh s texturou č. 2	48
Příloha č. 6: Detailní zobrazení kroku Mesh s bez textury — Shaded	48
Příloha č. 7: Data z reportu, Zobrazení distorze kamery.....	49
Příloha č. 8: Data z reportu, Údaje z GCP	50

10. Přílohy

Příloha č. 1:

Následující obrázek zobrazuje další a detailnější pohled na výstup *Tie Points*.



Příloha č. 1: Detailní zobrazení kroku Tie Points

Příloha č. 2:

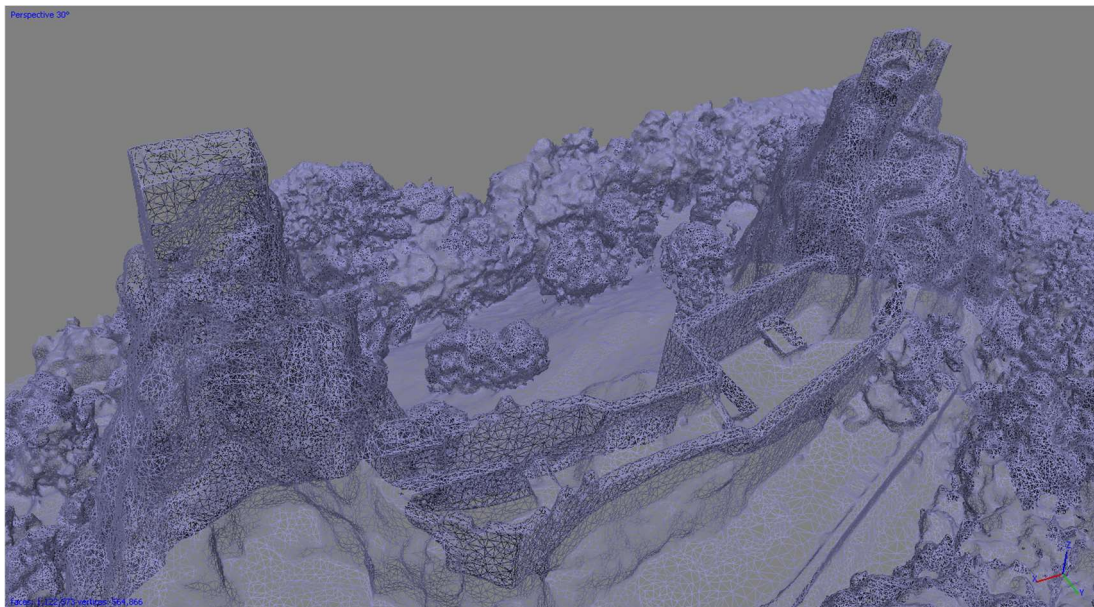
Následující obrázky zobrazují další a detailnější pohled na výstup *Dense Cloud*.



Příloha č. 2: Detailní zobrazení kroku Dense Cloud

Příloha č. 3:

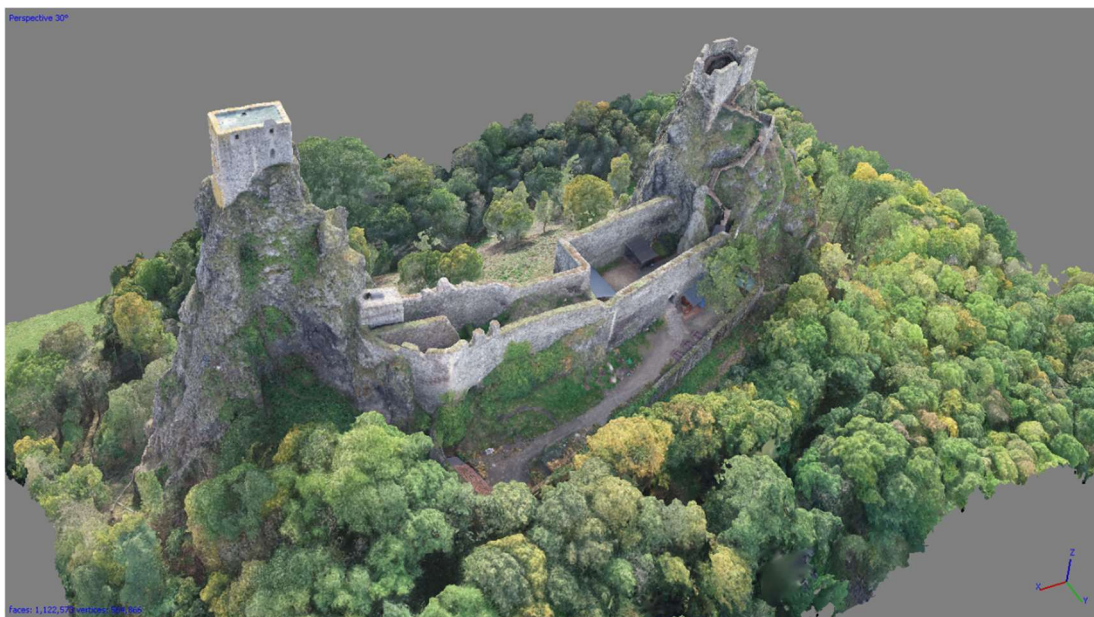
Následující obrázek zobrazuje další a detailnější pohled na výstup *TIN*, kde je patrná síť trojúhelníků spojující veškeré body.



Příloha č. 3: Detailní zobrazení kroku TIN

Příloha č. 4:

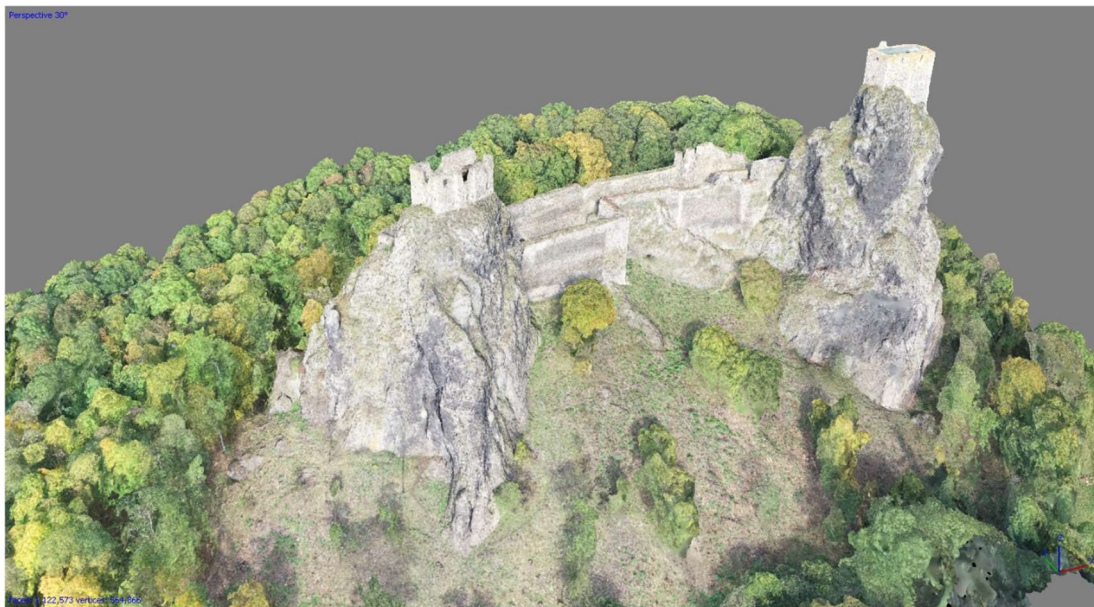
Následující obrázek zobrazuje další a detailnější pohled na výstup *Mesh* s texturou, tedy výsledný 3D model.



Příloha č. 4: Detailní zobrazení kroku Mesh s texturou č.1

Příloha č. 5:

Následující obrázek zobrazují další a detailnější pohled na výstup *Mesh* s *texturou*, tedy výsledný 3D model.



Příloha č. 5: Detailní zobrazení kroku Mesh s texturou č.2

Příloha č. 6:

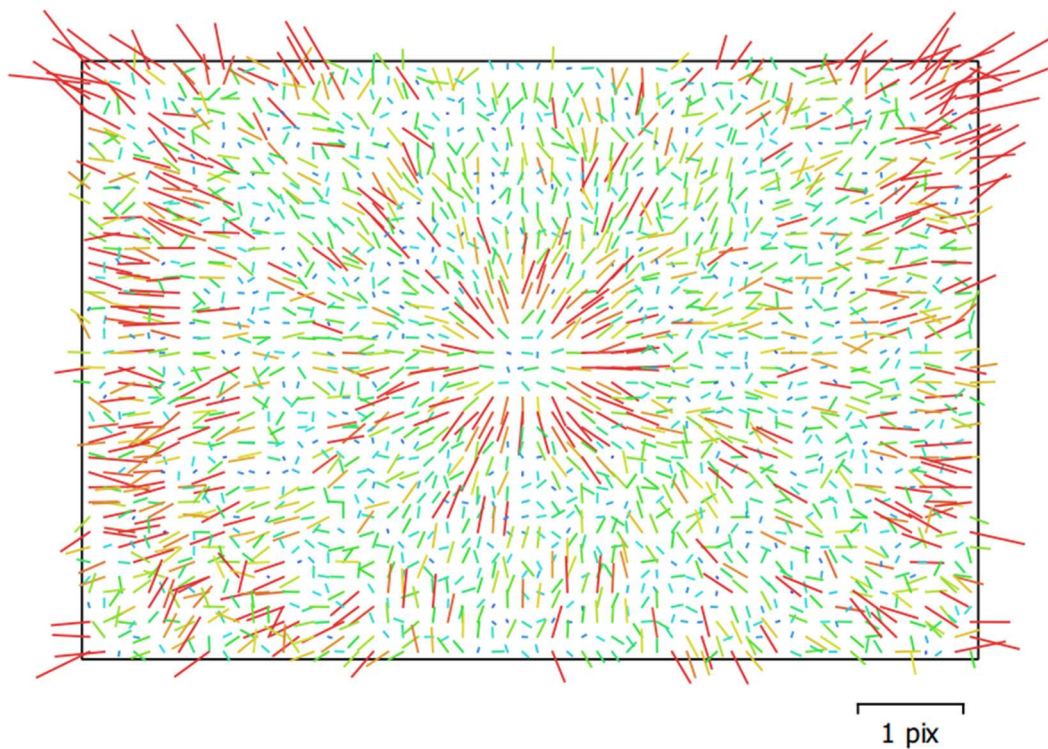
Následující obrázek zobrazuje 3D model bez textury, tedy jedná se o *Mesh* bez textury.



Příloha č. 6: Detailní zobrazení kroku Mesh bez textury — Shaded

Příloha č. 7:

Obrázek níže znázorňuje distorzi čočky dle reportu v části Kalibrace kamery. Distorze je nejvíce patrná v horních dvou rozích území (až 1 pixel).



Příloha č. 7: Data z reportu, Zobrazení distorze kamery

Příloha č. 8:

Údaje níže zobrazují hodnoty z report z části Pozemních kontrolních bodů. Zobrazované hodnoty znamenají přesnost, s jakou byly umístěny markery do skutečných GCP.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
1					
2					
3	-4.88603	6.11235	3.87132	8.73048	17.669 (3)
4					
5	-2.32433	-3.33704	2.8215	4.94966	34.576 (3)
6					
7					
8					
12	-3.6274	3.2611	0.88732	4.95784	14.202 (7)
13	-2.44054	-7.54755	-0.467181	7.94607	21.954 (6)
14	1.04515	3.32557	-2.06098	4.04962	17.399 (12)
15					
16					
17					
9	7.22635	-4.27187	-2.58816	8.78451	17.196 (8)
10	0.238538	-1.25996	0.293239	1.31545	5.868 (6)
11	-2.3512	-1.90978	1.28809	3.29159	10.623 (7)
Total	3.6621	4.33936	2.14024	6.06808	17.443

Příloha č. 8: Data z reportu, Údaje z Pozemních kontrolních bodů (GCP)