



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**FAKULTA STAVEBNÍ
KATEDRA SPECIÁLNÍ GEODÉZIE**

**Testování metody SfM se zaměřením na UAV při zaměřování
vodohospodářského modelu**

**Testing the SfM method with a focus on the UAV for measurement of
the water management model**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie a kartografie

Vedoucí práce: prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.

Praha 2018

Bc. Hana Rýglová



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Rýgllová Jméno: Hana Osobní číslo: 423997
Zadávající katedra: Speciální geodézie
Studijní program: Geodézie a kartografie
Studijní obor: Geodézie a kartografie

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Testování metody SfM se zaměřením na UAV při zaměřování vodohospodářského modelu
Název diplomové práce anglicky: Testing the SFM method with a focus on the UAV for measurement of the water management model
Pokyny pro vypracování:
Proveďte zaměření vodohospodářského modelu fotogrammetricky metodou SfM pomocí dronu DJI Spark a mobilním telefonem, a dále nejméně jednou nezávislou kontrolní metodou. Měření zpracujte a porovnejte. Zhodnoťte vliv množství použitých vličovacích bodů a konkrétní nastavení zpracovatelského softwaru na přesnost výsledku.
Seznam doporučené literatury:
[1] Hampacher, M. - Štroner, M.: Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. 2. vyd. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2015. 336 s. ISBN 978-80-01-05843-5.
Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce: 23.2.2018 Termín odevzdání diplomové práce: 21. 5. 2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

23.2.2018 _____
Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci s názvem „Testování metody SfM se zaměřením na UAV při zaměřování vodohospodářského modelu“ vypracovala samostatně, pouze za odborného vedení vedoucího diplomové práce prof. Ing. Martina Štronera, Ph.D. Veškeré podklady, z kterých jsem čerpala, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěla poděkovat především vedoucímu mé diplomové práce prof. Ing. Martinovi Štronerovi, Ph.D. za odborné vedení a pomoc při zpracování této práce.

Dále bych chtěla poděkovat Bc. Janu Švejdovi za pomoc při měření.

Na závěr bych ráda poděkovala své rodině za podporu při studiu.

ABSTRAKT

V této diplomové práci je testována metoda Structure from Motion se zaměřením na UAV (Unmanned Aerial Vehicle – bezpilotní letecký prostředek) při zaměřování vodohospodářského modelu. Snímky získané pomocí UAV DJI Spark byly zpracovány metodou Structure from Motion v softwaru Agisoft PhotoScan, jehož výsledkem bylo husté mračno bodů.

Dále byl model zaměřen kontrolními metodami pro porovnání, a to pomocí totální stanice (prostorová polární metoda) a laserovým skenerem.

Cílem práce je zhodnocení vlivu rozvržení vlícovacích bodů, konfigurace snímků a konkrétního uživatelského nastavení zpracovatelského softwaru Agisoft PhotoScan na přesnost výsledku. Výsledky byly stanoveny na základě porovnaných mračen bodů v softwaru CloudCompare.

KLÍČOVÁ SLOVA

Fotogrammetrie, Structure from Motion, UAV, mračno bodů, porovnání

ABSTRACT

This diploma thesis focuses on the Structure from Motion method. This method is tested with a focus on the UAV (Unmanned Aerial Vehicle) in the water management model. The images taken by the UAV DJ Spark were processed using the Structure from Motion method in Agisoft PhotoScan, resulting in a dense cloud of points.

Furthermore, the model was measured on control methods for comparison, using a total station (spatial polar method) and a laser scanner.

The aim of the thesis is to evaluate the influence of the layout of the control points, the configuration of the images and the specific user setting of the Agisoft PhotoScan processing software on the accuracy of the results. The results were determined based on clouds compared in CloudCompare software.

KEYWORDS

Photogrammetry, Structure from Motion, UAV, dense cloud, comparison



Obsah

Úvod	9
1 Teoretické základy – vysvětlení	10
1.1 Fotogrammetrie	10
1.1.1 Dělení fotogrammetrie	10
1.1.2 Princip fotogrammetrie	13
1.1.2.1 Fotogrammetrické zobrazení	13
1.1.2.2 Prvky vnitřní orientace	14
1.1.2.3 Prvky vnější orientace	14
1.1.2.4 Projektivní (kolineární) prostorová transformace	15
1.1.2.5 Epipolární geometrie ve fotogrammetrii	15
1.2 Structure from Motion	17
1.2.1 Princip metody SfM	17
1.2.2 Structure from Motion software	19
1.3 UAV	20
1.4 Laserové skenování	21
2 Přístrojové vybavení	22
2.1 DJI Spark	22
2.2 Canon EOS 5D Mark II	23
2.3 Samsung Galaxy S6	24
2.4 Totální stanice Trimble S8	25
2.5 Skener Leica ScanStation P40	25
2.6 Skener Leica BLK 360	26
3 Popis experimentu testování metody SfM	27
4 Měření a zpracování	28
4.1 Zaměření modelu fotogrammetrickou metodou	28
4.1.1 Rozmístění vlíčovacích bodů	28
4.1.2 Snímkování území	29
4.2 Kontrolní zaměření	30



4.3 Zpracování snímků.....	30
4.3.1 Agisoft PhotoScan.....	30
4.3.2 Zpracování v Agisoft PhotoScan.....	31
4.4 Porovnání mračen bodů	37
4.4.1 CloudCompare.....	37
4.4.1 Postup porovnání v CloudCompare	37
5 Výsledky testování metody SfM.....	40
5.1 Porovnání metod pro získání 3D mračen bodů	43
5.2 Porovnání 3D mračen získaných jinými fotoaparáty	54
5.3 Zhodnocení vlivu uživatelského nastavení SW na přesnost výsledku – filtrace	59
5.4 Zhodnocení vlivu uživatelského nastavení SW na přesnost výsledku – kvalita.....	68
5.5 Zhodnocení vlivu počtu vlíčovacích bodů na přesnost výsledku	76
5.6 Zhodnocení vlivu konfigurace a počtu snímků na přesnost.....	82
Závěr	91
Použitá literatura	94
Seznam tabulek	97
Seznam obrázků.....	98
Seznam příloh.....	102



Seznam použitých zkratek

GCP – Ground Control Point (Pozemní kontrolní bod)

GNSS – Global Navigation Satellite System (Globální navigační satelitní systém)

IMU – Inertial Measurement Unit (Inerciální měřická jednotka)

INS – Inertial Navigation System (Inerciální navigační systém)

PMVS – Patch-based Multi-view Stereo (Algoritmus pro výpočet 3D souřadnic hustého mračna bodů)

RPAS - Remotely Piloted Aircraft System (Dálkově řízený letecký systém)

SfM - Structure from Motion (Struktura z Pohybu)

SIFT - Scale Invariant Feature Transform (Automatické nalezení korespondencí mezi dvojicí obrázků)

UAS – Unmanned aerial system (Bezpilotní letecký systém)

UAV – Unmanned Aerial Vehicle (Bezpilotní letecký prostředek)

Úvod

V posledních letech zaznamenala velký rozmach technologie bezpilotních prostředků. Ty lze v kombinaci s neměřickými kamerami využít k pořizování leteckých snímků. Výhodou této metody je především dostupnost a možnost detailnějšího zachycení reality než například pomocí klasické letecké fotogrammetrie. Bepilotní prostředky jsou vhodné především pro mapování menších oblastí z menších výšek. Při pořizování snímků z bezpilotních prostředků se hůře dodržují zásady pořizování měřických snímků a získáme tedy soubor neuspořádaně se překrývajících snímků. Zpracování takových snímků je pomocí klasických fotogrammetrických metod obtížné a je výhodné použít metodu jako je Structure from Motion (SfM). Tato metoda je dnes využívána díky dostupnosti výkonných počítačů, nenáročnosti na obsluhu a získání poměrně přesných výsledků.

V této práci je metoda SfM testována a je zaměřena na vyhodnocení snímků získaných z UAV (bepilotní letecký prostředek). Pro testování byl jako předmět měření zvolen model Císařského ostrova. Tento model byl zaměřen fotogrammetricky pomocí UAV s vestavěnou kamerou a pro porovnání byl model nasnímán digitální zrcadlovkou a mobilním telefonem, kdy snímky byly pořízeny z ohozů nacházejících se podél modelu. Snímky z různých kamer byly dále zpracovány v softwaru Agisoft PhotoScan, kde výsledkem bylo husté mračno bodů. Takovýto model byl porovnán s mračnem bodů získaným z kontrolního zaměření totální stanicí, mračnem získaným z laserového skenování skenerem Leica ScanStation P40 a mračnem získaným opět laserovým skenováním ovšem s levnějším a méně přesným skenerem Leica BLK360. Porovnání proběhlo v softwaru CloudCompare.

Cílem je porovnání technologií tvorby 3D mračna bodů a v oblasti fotogrammetrického zaměření a vyhodnocení metodou SfM zjistit, jaký má vliv počet použitých vlíčovacích bodů, počet použitých snímků a dopad konkrétního nastavení v zpracovatelském softwaru na přesnost výsledku.

1 Teoretické základy – vysvětlení

1.1 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je obor, který se zabývá získáváním informací o předmětech na základě přesného měření bezkontaktním způsobem. Informace lze získat z obrazových záznamů, nejčastěji z fotografických snímků, na kterých je předmět zobrazen. V dnešní době, je využíván záznam získaný digitální formou pomocí digitálních kamer. Pro získání snímků lze použít dva typy kamer, a to kamery měřické, u kterých známe kalibrační prvky (prvky vnitřní orientace) nebo kamery neměřické – obvykle digitální fotoaparáty, kde neznáme prvky vnitřní orientace (lze získat kalibrací fotoaparátu). Pořízený snímek zachytí realitu a lze z polohy bodů na měřickém snímku (snímkových souřadnic) odvodit tvar, velikost a umístění objektu v prostoru, určit vzájemnou prostorovou polohu jednotlivých bodů, vyhodnotit polohopis, výškopis a určit další vlastnosti. V této kapitole bylo čerpáno z [1].

1.1.1 Dělení fotogrammetrie

Fotogrammetrii jako takovou lze dělit podle:

- Polohy stanoviště
- Počtu a konfigurace vyhodnocovaných snímků
- Technologického postupu zpracování

Podle polohy stanoviště, ze kterého byl snímek pořízen, můžeme fotogrammetrii dělit na:

- *Pozemní (terestrická, blízká) fotogrammetrie*

Při metodě pozemní fotogrammetrie je stanoviště zpravidla nepohyblivé na zemi. Historicky bylo možné přesně geodeticky určit polohu stanoviště i prostorovou orientaci snímku při fotografování a zpracování takových snímků bylo jednodušší. Nevýhoda pozemní fotogrammetrie je, že jednotlivé předměty měření jsou vzájemně zakrývány a snímek často obsahuje část nevhoditelných oblastí. Další nevýhodou je přesnost v prostorové složce,

kteřá ubývá se čtvercem vzdálenosti, a proto se pozemní fotogrammetrie hodí pro objekty, které jsou přibližně ve stejné vzdálenosti jako jsou například fasády domů, stěny lomů, skály apod. V případě použití průsekové fotogrammetrie, či přímo SfM lze tuto nepříznivou vlastnost značně potlačit. Rozvoj v oblasti dokumentace objektů je dán zejména cenově přístupnými digitálními kamerami a zpracovatelskými programy.

– *Letecká fotogrammetrie*

Při metodě letecké fotogrammetrie je snímací přístroj umístěn na letadle anebo v jiném vzduchem se pohybujícím dopravním prostředku. Na snímku je v závislosti na výšce letu zobrazena větší plocha než u pozemní fotogrammetrie. Nevýhodou metody je obtížné určení prvků vnější orientace v okamžiku pořízení snímku, ale existují matematické postupy, které umožňují vypočítat polohu a orientaci snímků při snímkování. Dnes je možné použít metody pro přímé georeferencování snímku za letu, kdy prvky vnější orientace se zjistí pomocí zařízení GNSS (Global Network Navigator Service) a IMU (Inertial Measurement Unit), přesto je poletové početní zpřesnění stále využíváno. Při snímkování se pořizují především přibližně kolmé snímky, vzdálenost objektů od místa fotografování je přibližně stejná a tím je zajištěna přibližně stejná přesnost vyhodnocení.

– *Družicová fotogrammetrie*

Družicová fotogrammetrie vzniká na základě snímků pořízených z družic. Snímky mají vysokou kvalitu, vysoké rozlišení a používají se především pro tvorbu geografických, tematických map středního a malého měřítko. Družice mohou poskytnout data v několika spektrech a také rádiové informace. Rozlišení dnešních komerčních družic je cca 50 cm.

Podle počtu vyhodnocovaných snímků se fotogrammetrie dělí na:

– *Jednosnímková fotogrammetrie*

Využívá se samostatných měřických snímků, na kterých lze měřit pouze rovinné snímkové souřadnice a určit tak geodetické rovinné souřadnice předmětu

měření. Tuto metodu lze využít, pokud je předmět měření rovinný nebo blízký rovině. V pozemní fotogrammetrii se tato metoda využívá pro tvorbu fotoplánů rovinných objektů, například fasád budov. V letecké fotogrammetrii lze získat polohopisnou složku mapy rovinnatého území ze snímků se svislou nebo i šikmou osou záběru.

– *Vícesnímková fotogrammetrie*

Vícesnímková fotogrammetrie se využívá pro 3D zpracování objektů a území. K vyhodnocení je potřeba minimálně dvou vzájemně se překrývajících snímků, na kterých musí být předmět měření zobrazen. Z jednotlivých snímků se získají snímkové souřadnice téhož objektu, ze kterých se vypočítá prostorová poloha a určí se tak jeho souřadnice X, Y a Z.

K vícesnímkové fotogrammetrii řadíme stereofotogrammetrii, která využívá k vyhodnocení prostorových souřadnic stereoskopický vjem. Dále do této skupiny patří průseková fotogrammetrie, jejíž princip spočívá v protínání os záběru snímků pod konvergentním úhlem. Dále do této skupiny lze řadit metodu SfM (Structure from Motion), kterou lze zjednodušeně charakterizovat jako kombinaci průsekové fotogrammetrie a stereofotogrammetrie.

Podle technologického postupu zpracování snímků (tj. převod snímkových souřadnic na prostorové souřadnice) dělíme fotogrammetrii, resp. metody zpracování na:

– *Analogová*

Vytváří opticky nebo mechanicky analogický stav jako při vlastním snímání. Využívá se přesných, složitých jednoúčelových analogových vyhodnocovacích strojů, které již dnes nejsou používány.

– *Analytická*

Využívá převod snímkových souřadnic do geodetického systému prostorovou transformací, která se řeší na počítači. Snímkové souřadnice se měří na strojích typu komparátor.

– *Digitální*

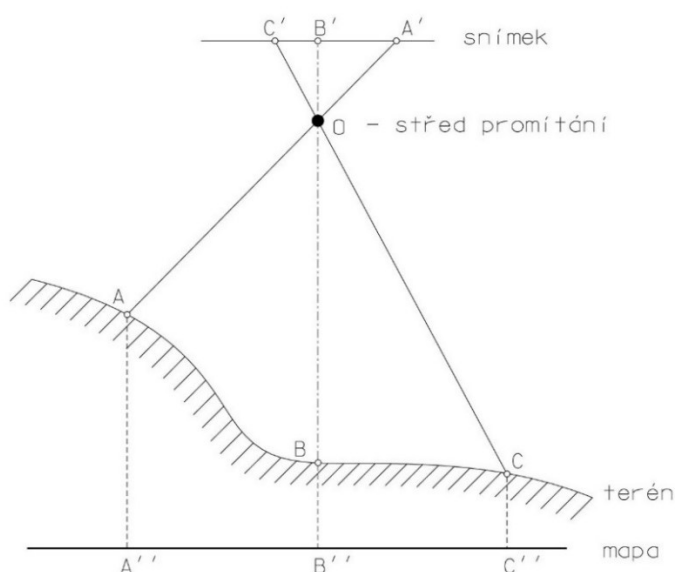
Využívá stejně jako metoda analytická převod snímkových souřadnic do geodetického systému prostorovou transformací, která se řeší na počítači. Snímkové souřadnice se získají z digitálního obrazu.

V této kapitole bylo čerpáno z [1], [2].

1.1.2 Princip fotogrammetrie

1.1.2.1 Fotogrammetrické zobrazení

Základním principem fotogrammetrie je středový průmět objektu (centrální projekce), kdy středem promítání je v ideálním případě střed objektivu. Objektivy fotoaparátů jsou složeny z několika optických členů a je těžké určit přesný střed promítání. Zjednodušené schéma principu středového promítání je znázorněno na obrázku 1. Každému bodu fotografovaného předmětu odpovídá bod ve snímkové rovině, kterou je snímací čip (např. CCD, CMOS) nebo citlivá vrstva filmu. Paprsky, vedené mezi odpovídajícími si body (bod a jeho obraz), se protínají ve středu promítání. Souhrn těchto paprsků označujeme jako fotogrammetrický svazek paprsků a je důležité znát jeho tvar a polohu abychom mohli převést centrální projekci na projekci ortogonální (mapa).



Obr. 1: Středové promítání

1.1.2.2 Prvky vnitřní orientace

Prvky vnitřní orientace definují geometrii paprsků uvnitř komory. Jsou tedy definovány pro jednotlivé kamery a jsou známé od výrobce anebo je lze získat laboratorním měřením.

Mezi prvky vnitřní orientace patří:

- Konstanta komory f
- Poloha hlavního snímkového bodu H' (x'_0, y'_0)
- Průběh distorze objektivu

1.1.2.3 Prvky vnější orientace

Prvky vnější orientace určují polohu komory, směr os záběru a pootočení snímku. Jsou definovány pro každý snímek.

Mezi prvky vnější orientace patří:

- Souřadnice středu vstupní pupily X_0, Y_0 a Z_0
- Úhly rotace kolem třech souřadnicových os ω, φ, κ

U pozemní fotogrammetrie lze souřadnice středu vstupní pupily zaměřit geodetickou metodou a sklony lze určit pomocí záměrného zařízení a libel u přístrojů zvaných fototeodolity.

U letecké fotogrammetrie je kamera umístěna na leteckém nosiči, který je v pohybu a není přesně definováno místo pořízení záběru a prvky vnější orientace jsou považovány za neznámé. Systémy GNSS a IMU umožňují získat přibližné hodnoty prvků vnější orientace přímo při letu.

Výpočetní systémy umožňují provádět vnější orientaci v jednom kroku pomocí přímého vztahu mezi snímkovými souřadnicemi a geodetickými souřadnicemi metodou svazkového vyrovnání. Při nadbytečném počtu bodů je možno vyrovnat i prvky vnitřní orientace.

1.1.2.4 Projektivní (kolineární) prostorová transformace

Přímý vztah mezi snímkovými souřadnicemi a prostorovými geodetickými souřadnicemi je základem celé současné fotogrammetrie. Při této transformaci musí být dodržena podmínka kolinearity, která stanovuje že projekční centrum, bod v terénu a jeho obraz na snímku leží v jedné přímce. Čerpáno z [1], [2].

Rovnice kolinearity:

$$x' = x'_0 - f \frac{r_{11}(X-X_0)+r_{21}(Y-Y_0)+r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} \quad (1)$$

$$y' = y'_0 - f \frac{r_{12}(X-X_0)+r_{22}(Y-Y_0)+r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0)+r_{23}(Y-Y_0)+r_{33}(Z-Z_0)} \quad (2)$$

Kde:

x', y' jsou snímkové souřadnice bodu,

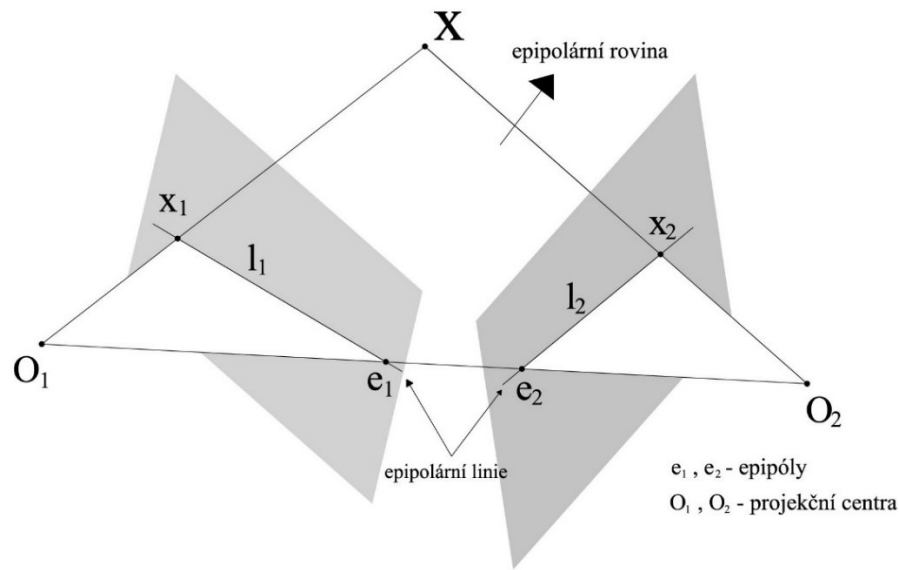
x'_0, y'_0 a f jsou prvky vnější orientace,

X_0, Y_0, Z_0 a r_{ij} jsou prvky vnější orientace

X, Y, Z jsou geodetické souřadnice bodu.

1.1.2.5 Epipolární geometrie ve fotogrammetrii

Princip epipolární geometrie se využívá při rekonstrukci 3D scény ze dvou a více rovinných průmětů (snímků). Epipolární geometrie není závislá na struktuře scény, závisí pouze na vnitřních parametrech kamer a jejich relativní pozici. Je to geometrický vztah nejméně dvou snímků, který vychází z podmínky komplanarity. Tato podmínka obecně říká, že průvodiče bodu na snímané scéně jsou v jedné rovině s fotogrammetrickou základnou (Obr. 2).



Obr. 2: Podmínka komplanarity [26]

Vzájemný vztah dvou snímků bez jakékoliv znalosti kamer či jejich orientace lze obecně popsat pomocí projekce bodů z jednoho snímku na snímek druhý. Hledá se tedy vztah snímkových souřadnic stejných bodů, které lze nalézt na obou snímcích. Tento vztah je možné vyjádřit pomocí projekční matice, která bude zobrazovat plochu jednoho snímku na snímek druhý a dále bude obsahovat údaje o různě stočených plochách snímků či snímačů v reálném prostoru. Tato matice se nazývá fundamentální matice. Fundamentální matice umožňuje identifikaci bodu v jednom snímku určit odpovídající epipolární linii v druhém snímku.

Výpočet fundamentální matice ze dvou snímků stejné scény je základní operací v epipolární geometrii. Základní rovnicí epipolární geometrie je:

$$\mathbf{x}'^T \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{x}'' = 0, \quad (3)$$

kde:

\mathbf{x}' je vyjádření bodu na prvním snímku v homogenních souřadnicích $\mathbf{x}' = (x', y', 1)^T$,

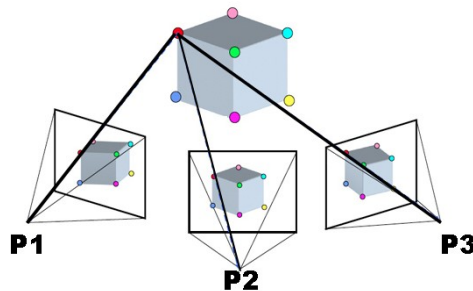
\mathbf{x}'' je vyjádření bodu na druhém snímku v homogenních souřadnicích $\mathbf{x}'' = (x'', y'', 1)^T$,

\mathbf{F} je fundamentální matice o rozměru 3x3.

Čerpáno z [23].

1.2 Structure from Motion

Structure from Motion je fotogrammetrická zobrazovací technika. Podstata této metody je získání 3D prostorových souřadnic z dvourozměrných překrývajících se snímků pořízených z pohybujícího se nosiče. Snímky pořízené pro tuto metodu mohou být pořízeny s rovnoběžnými i konvergentními osami záběru a nemusí se dodržovat přesných zásad pro pořizování snímků. Metoda kombinuje výhody metody průsekové fotogrammetrie a stereofotogrammetrie. Podmínkou pro pořízené snímky je co největší překryv a dostatečná kvalita. Prvky vnitřní orientace kamery nemusí být známé a jsou automaticky vypočítány při orientaci snímků.



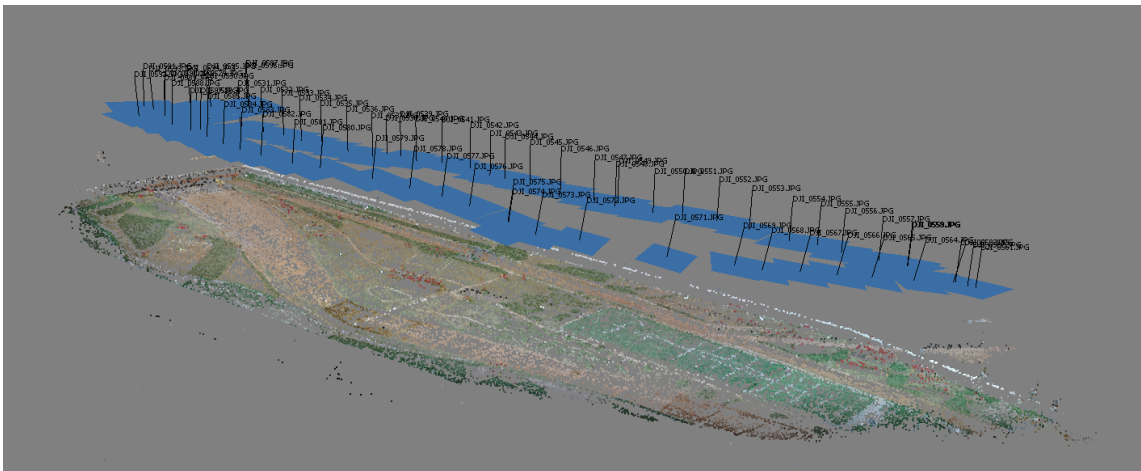
Obr. 3 Zjednodušený princip metody SfM [3]

1.2.1 Princip metody SfM

Princip metody SfM je popsán v následujících krocích. V první fázi dochází k rozpoznání specifických bodů díky metodě SIFT (The Scale Invariant Feature Transform). Tato metoda nalezne charakteristické body, které jsou viditelné na více snímcích i při změně měřítka, osvětlení, šumu a posunu v obraze. Charakteristické body se nacházejí nejčastěji v oblasti snímku s vysokým kontrastem, jako jsou například hrany objektu. Algoritmus SIFT nalezne významné body na základě lokálních extrémů obrazové funkce, ze kterých jsou poté vyloučeny nestabilní body. Mezi takové patří body, které nejsou dostatečně kontrastní ke svému okolí. Dále jsou z důvodu vyšší stability odstraněny body na hranách, jejichž určení na hranách není jednoznačné. Bodům, které nebyly odstraněny je přiřazena orientace a následně jsou vypočteny deskriptory. Deskriptory specificky charakterizují jednotlivé body ve snímku a na základě

jejich charakteristik jsou vyhledány odpovídající si body na různých snímcích. Počet klíčových bodů závisí na rozlišení čipu kamery, struktuře daného objektu, ostrosti snímku a vzdálenosti mezi kamerou a sledovaným objektem. Každý bod musí být nalezen alespoň na třech snímcích, pokud není nalezen je tento bod vyřazen a dále není do výpočtu zahrnut. Po identifikaci klíčových bodů, které se nacházejí zároveň na několika snímcích, získáme projekční centra kamer a orientace snímků v prostoru.

Získáním informací o epipolární geometrii mezi všemi po sobě jdoucími snímky je umožněna následná rekonstrukce struktury (structure) v obraze a pohybu (motion) kamery pro všechny snímky najednou. Pro vytvoření této rekonstrukce se používá sekvenční přístup, kdy se nejprve vypočítá structure a motion jen mezi dvěma snímky a poté se postupně rozšíří na celou sekvenci snímků. Výsledkem algoritmu obnovující structure a motion jsou informace o pozici všech kamer a 3D rekonstrukci významných bodů objektu - řídké mračno.

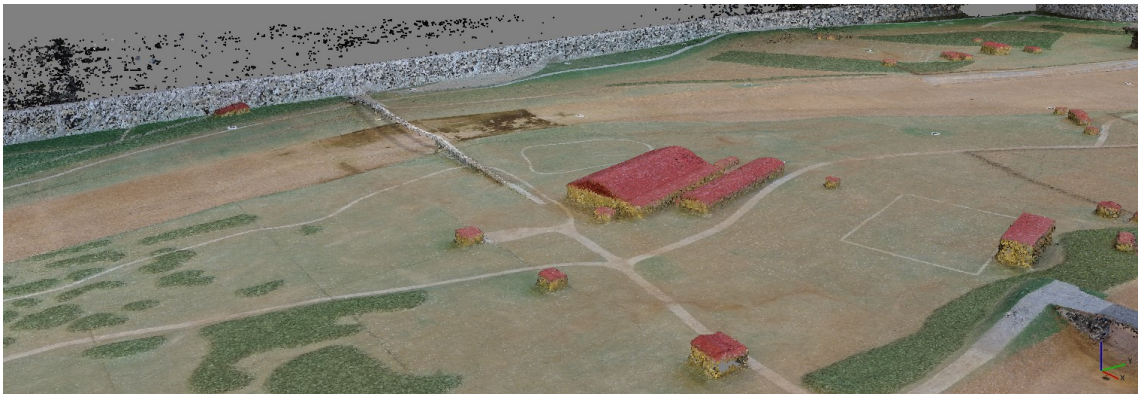


Obr. 4: Zobrazení řídkého mračna a pozic kamer

Dalším krokem je svazkové vyrovnání, ve kterém dojde k současnému vyrovnání všech parametrů, kterými se myslí souřadnice bodů, pozice a rotace kamer. Jelikož je nadbytečný počet klíčových bodů, je možné vyrovnat i prvky vnitřní orientace. Svazkové vyrovnání používá přímé vyjádření mezi snímkovými a modelovými souřadnicemi klíčových bodů a jeho inverzní vztah. Po tomto kroku, již lze vytvořit husté mračno bodů metodou využívající obrazovou korelaci.

Výpočet 3D souřadnic hustého mračna bodů je proveden pomocí algoritmu PMVS neboli Patch-based Multi-view Stereo, kde každý bod je reprezentován jako malý

orientovaný patch neboli obdélníková ploška. Tyto plošky jsou získány na základě korelace v původním obraze z pixelů a těsně pokrývají pozorovaný objekt s výjimkou malých oblastí bez textury. Algoritmus je schopen detekovat a vyřadit odlehle či pohyblivé body a překážky a neprovádí žádná vyhlazení výsledného modelu. PMVS používá jako vstupní data řídké mračno bodů, které bylo vygenerováno metodou SfM. S těmito vstupními daty dále pracuje pomocí výpočtu, který se dá rozložit na dva kroky. Prvním krokem je expanze. Při tomto kroku se iterativně tvoří noví sousedé neboli nové plošky, k již existujícím patch, dokud nepokrývají viditelný povrch scény (objektu). V této části dochází k výraznému zhuštění patch ve 3D. V druhém kroku dojde k filtraci, která slouží ke zvýšení konzistence viditelnosti a k odstranění chybných bodů v řídkém bodovém mračnu. Filtrace se skládá ze dvou kroků, v prvním kroku jsou odstraněny všechny patch, které leží mimo skutečný povrch daného 3D modelu. Druhý filtr odstraňuje všechny patch, které se nacházejí uvnitř aktuálního modelu. V závěru dochází k mírné regulaci celkového počtu patch.



Obr. 5: Ukázka vygenerovaného hustého mračna bodů ze SW Agisoft PhotoScan

1.2.2 Structure from Motion software

Softwarů, které využívají metodu SfM a dokáží tak vygenerovat 3D model je několik. Mezi open source systémy patří například Bundler, SFMToolkit. Mezi komerční programy využívajících metodu SfM pak patří Agisoft Photoscan, RealityCapture, Pix4D, VisualSFM, 3DF Zephyr.

Dále jsou využívány i webové služby, kde jsou na server společnosti nahrány snímky a uživatel obdrží vygenerovaný 3D model nebo ortofotosnímky.

Pro tuto diplomovou práci byl pro tvorbu 3D mračna bodů použit software Agisoft PhotoScan v.1.2.6.

V kapitole SfM bylo čerpáno z [3], [4], [5], [6], [7] a [8].

1.3 UAV

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) je bezpilotní letecký prostředek, který může být také označen pod zkratkou UAS (Unmanned Aerial System), RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) anebo pod názvem dron. Jedná se o prostředky, které jsou pilotovány dálkově, bez přítomnosti pilota na palubě. Ovládány jsou pomocí dálkových ovládaní nebo jsou schopny létat pomocí před programovaných leteckých plánů nebo pomocí složitějších dynamických autonomních systémů.

UAV mohou být s motorovým pohonem nebo se jedná o nemotorový model. Legislativa definuje volně létající prostředky a upevněné létající prostředky. Pokud mluvíme o upevněných leteckých prostředcích většinou se jedná o balóny, vzducholodě či draky.

Volně létající prostředky se technicky dělí na:

- vzducholodě,
- vrtulníky,
- multikoptéry,
- letecké prostředky s křídly klasické konstrukce.

Ve fotogrametrii UAV slouží jako nosič snímacích zařízení. Snímacími zařízení mohou být digitální kompaktní fotoaparát, digitální zrcadlovka, termální nebo infrakamera a videokamera. Dále může být UAV nosič složitějších systémů jako je např. snímač LIDAR (laserový 3D skener pro letecké skenování).

UAV fotogrammetrie kombinuje výhodu vertikálního pohledu letecké fotogrammetrie s blízkou vzdáleností a tím lze dosáhnout vysokého detailu snímku. V dnešních UAV je z důvodů rozměru, váhy a ceny použito nepřesných nebo častěji žádných INS jednotek a při výpočtu je nutné použít výpočet bez prvků vnější orientace. Prvky vnější orientace dostaneme například pomocí vlíčovacích bodů se známými

prostorovými souřadnicemi, které je nutné zaměřit geodetickými přístroji nebo GNSS. Prvky vnitřní orientace lze určit ve speciálních laboratořích nebo svépomocí. Neměřické komory užívané v UAV aplikacích nemají kalibrační protokoly známy a je potřeba tyto přístroje zkalibrovat. Pro zpracování snímků z UAV je výhodné použití programů využívajících metodu SfM. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, pomocí metody SfM lze při tvorbě 3D modelu určit jak prvky vnitřní orientace, tak i prvky vnější orientace.

Ve fotogrammetrii se využívá UAV především pro tvorbu 3D modelů a určování kubatur, ortofoto snímků a tvorbu fotoplánů.

Tato kapitola byla čerpána z [9] a [10].

1.4 Laserové skenování

Laserové skenování je bezkontaktní neselektivní metoda sběru dat. Výsledkem skenování je tzv. mračno bodů neboli soubor bodů, u kterého známe prostorové souřadnice X, Y a Z. U skenerů s integrovanou kamerou lze získat obarvené mračno bodů, kde každému bodu v prostoru je přidělena reálná obrazová informace z digitálního snímku.

Laserové polární skenery využívají pro měření prostorové vzdálenosti k bodu dálkoměr na principu měření tranzitního času nebo fázového rozdílu, podobně jako totální stanice. Paprsek je rozmítán pomocí zrcadla nebo hranolu na body rastru v řádcích a sloupcích. Souřadnice každého bodu jsou vypočteny prostorovou polární metodou, tedy pomocí vodorovného úhlu, svislého úhlu a šikmé vzdálenosti. Výhoda této metody je rychlost sběru dat, přesnost a komplexnost měření.

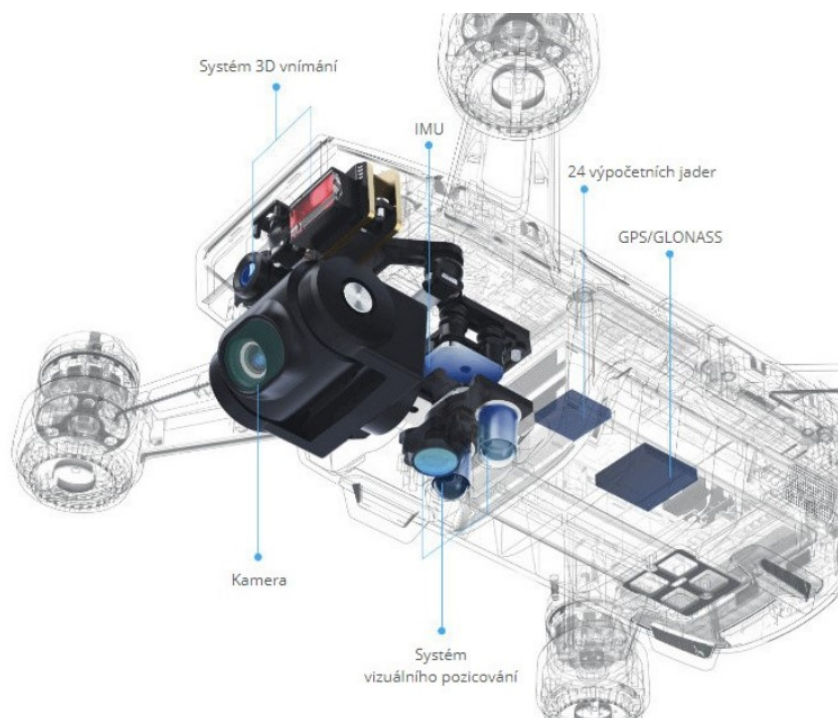
Čerpáno z [11].

2 Přístrojové vybavení

Pro zaměření vodohospodářského modelu fotogrammetricky s následným vyhodnocením metodou SfM byl použit dron DJI Spark. Dále byl model nasnímán z ochozů pomocí digitální zrcadlovky Canon EOS 5D Mark II s objektivem Canon EF 40 mm f/2,8 STM a také mobilním telefonem Samsung Galaxy S6. Dále byl model zaměřen nezávisle totální stanicí Trimble S8 a polárními skenery Leica ScanStation P40 a Leica BLK 360. Tyto stroje jsou dále stručně popsány.

2.1 DJI Spark

Dron Spark (Obr. 7) od značky DJI je kvadrokoptéra s rozměry 143 x 143 x 55 mm a hmotností 300 g. Ovládá se pomocí vysílače a pomocí aplikace na mobilním telefonu. Maximální letový čas je 16 minut. Mini dron využívá pro svůj let dvou pozičních systémů GPS a GLONASS, dále má vestavěnou IMU jednotku a senzory systému detekce překážek (Obr. 6).



Obr. 6: Popis dronu DJI Spark [13]

Dron má integrovanou kameru schopnou pořizovat video s FullHD rozlišením a mechanickou stabilizací. Kamera je vybavena 1/2,3“ CMOS snímačem s rozlišením

12 megapixelů. Maximální rozlišení snímku je 3968 x 2976 pixelů a velikost čtvercového pixelu je 1,6 μm . Snímky lze uložit pouze ve formátu JPEG. Rozsah ISO je 100-1600, dále je možné nastavení doby expozice od 1/8000 až do 2 sekund. Kamera je osazena širokouhlým objektivem se světelností f/2.6 s ekvivalentní ohniskovou vzdáleností 25 mm se zorným úhlem 81,9°. Stabilizace obrazu pomocí 2-osého gimbálu, který je možné naklánět v úhlu od 0° do 85°. Čerpáno z [12], [13].



Obr. 7: DJI Spark [13]

2.2 Canon EOS 5D Mark II

Canon EOS 5D Mark II (Obr. 8) je digitální zrcadlovka, kompatibilní s objektivy EF a vybavena snímacím čipem formátu full frame s rozměry 36 x 24 mm a technologií CMOS s rozlišením 21,1 megapixelů, maximální rozlišení snímku je tedy 5616 x 3744 pixelů. Velikost čtvercového pixelu je 6,4 μm . Fotoaparát nemá vestavěný blesk.

Snímky lze uložit ve formátu JPEG a RAW. Rozsah manuálního ISO 100–25600. Ostření lze provádět manuálně nebo pomocí autofokusu. Nastavení doby expozice je možné od 1/8000 až do 30 sekund. Rozměry fotoaparátu jsou 152 x 114 x 75 mm a hmotnost je 810 g. Čerpáno z [14].

Použitý byl objektiv **Canon EF 40 mm f/2,8 STM** (Obr. 9).



Obr. 8: Canon EOS 5D Mark II [14]



Obr. 9: Objektiv Canon EF 40 mm f/2,8 STM [15]

2.3 Samsung Galaxy S6

Jedná se o mobilní telefon s fotoaparátem (Obr. 10), který je vybaven 1/2.6“ CMOS snímacím čipem s rozlišením 16 megapixelů. Maximální rozlišení snímku je 5312x2988 pixelů. Velikost čtvercového pixelu je 1,1 μm . Snímky lze uložit ve formátu JPEG. Kamera je osazena objektivem se světelností f/1.9 s ohniskovou vzdáleností 4,3 mm a ekvivalentní ohniskovou vzdáleností 28 mm. Čerpáno z [16].



Obr. 10: Mobilní telefon Samsung Galaxy S6 [17]

2.4 Totální stanice Trimble S8

Totální stanice Trimble S8 (Obr. 10) je robotizovaná totální stanice ovládána pomocí Trimble CU Controller. Přesnost měření úhlů (směrodatná odchylka dle DIN 18723) je 1" (0,3 mgon). Přesnost měření délek na hranol je 1 mm + 1 ppm. Čerpáno z [18].



Obr. 11: Totální stanice Trimble S8 [18]

2.5 Skener Leica ScanStation P40

Prvním použitým skenerem byl skener ScanStation P40 (Obr. 12) od firmy Leica. Jde o pozemní skener, který měří pomocí prostorové polární metody. Minimální dosah dálkoměru je 0,6 m a maximální dosah 270 m. Skener má geodetický dvouosý kompenzátor, délkovou přesnost 1,2 mm + 10 ppm. Úhlová přesnost je 8". Prostorovou přesnost uvádí výrobce jako 3 mm/50 m, 6 mm/100 m. Přístroj dosahuje rychlosti skenování až 1 milion bodů za vteřinu, zorné pole je 360° horizontálně a 270° vertikálně. Skener má integrovanou kameru, pomocí které lze pořizovat digitální snímky a např. obarvovat mračna bodů. Čerpáno z [19], [20].



Obr. 12: Laserový skener Leica ScanStation P40 [20]

2.6 Skener Leica BLK 360

Druhým skenerem pro získání mračna bodů modelu je BLK360 (Obr. 13) od firmy Leica. Jedná se o pozemní panoramatický skener, který měří pomocí prostorové polární metody. Rozsah měření dálkoměru je od 0,6 m do 60 m. Skener má zabudovanou inerciální měřicí jednotku IMU. Přístroj má délkovou přesnost 4 mm/10 m a 7 mm/20 m. 3D přesnost uvádí výrobce jako 6 mm/10 m, 8 mm/20 m. Přístroj dosahuje rychlosti skenování až 360 000 bodů za vteřinu. Zorné pole přístroje je 360° horizontálně a 300° vertikálně. Skener má zabudovaný tříkamerový systém, pomocí kterého lze získat panoramatickou fotografii a obarvit mračna bodů. Přístroj lze ovládat pomocí aplikace na iPadu, popřípadě provádět skenování pouze s využitím jediného spínače. Čerpáno z [21] a [22].



Obr. 13: Laserový skener Leica BLK360 [21]

3 Popis experimentu testování metody SfM

V této kapitole je popsán experiment, kterým byla testována metoda SfM. Předmětem měření této diplomové práce je vodohospodářský model, který se nachází ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, v. v. i. v Praze 6. Model představuje Císařský ostrov v Trojské kotlině v měřítku 1:70 a jeho velikost je přibližně 30 x 10 m.

Na modelu byly rozmístěny vlíčovací body, které byly zaměřeny a určeny jejich prostorové souřadnice. Model byl nasnímán fotogrammetricky pomocí UAV, digitálního telefonu a digitální zrcadlovky. Pořízené snímky byly vyhodnoceny v softwaru Agisoft PhotoScan, ve kterém nejprve byly snímky orientovány a následně bylo vypočteno husté mračno bodů. Výpočtů proběhlo několik v závislosti na konkrétním nastavení různých parametrů při výpočtu, do výpočtu také vstupoval různý počet vlíčovacích bodů či počet snímků. Výsledkem bylo několik hustých mračen, která byla exportována do textového souboru.

V dalším kroku byl model zaměřen v pravidelném rastru pomocí totální stanice, jako další metoda kontrolního měření bylo zvoleno laserové skenování, kdy výsledkem je mračno bodů připojené do stejné souřadnicové soustavy jako mračna bodů získaných metodou SfM. Měření a základní zpracování 3D skenování modelu provedl pro potřeby své diplomové práce Bc. Jan Švejda.

Posledním krokem bylo porovnání mračen bodů v softwaru CloudCompare. Nejprve proběhlo porovnání hustého mračna bodů získaného metodou SfM ze snímků z UAV s mračny bodů získaných nezávislou kontrolní metodou, čímž byly porovnány různé metody pro získání 3D souřadnic. Dále byla porovnána mračna bodů získaných metodou SfM, ale každé mračno bylo vyhodnoceno ze snímků získaných jiným druhem fotoaparátu, a tedy rozdílným snímačem, čímž byla porovnána mračna získaná různými prostředky. A jako poslední byla porovnána mračna bodů získaných pomocí UAV, která se budou lišit v konkrétním nastavení, počtu vlíčovacích bodů použitých pro výpočet a v poslední řadě počtem snímků použitých pro výpočet.

Výsledkem porovnání jsou vzdálenosti dvou mračen, průměrná vzdálenost mezi mračny a směrovaná odchylka.

4 Měření a zpracování

V této kapitole bude podrobněji popsán postup zaměření vodohospodářského modelu (Obr. 14), zpracování dat a následný postup porovnání mračen bodů.



Obr. 14: Vodohospodářský model

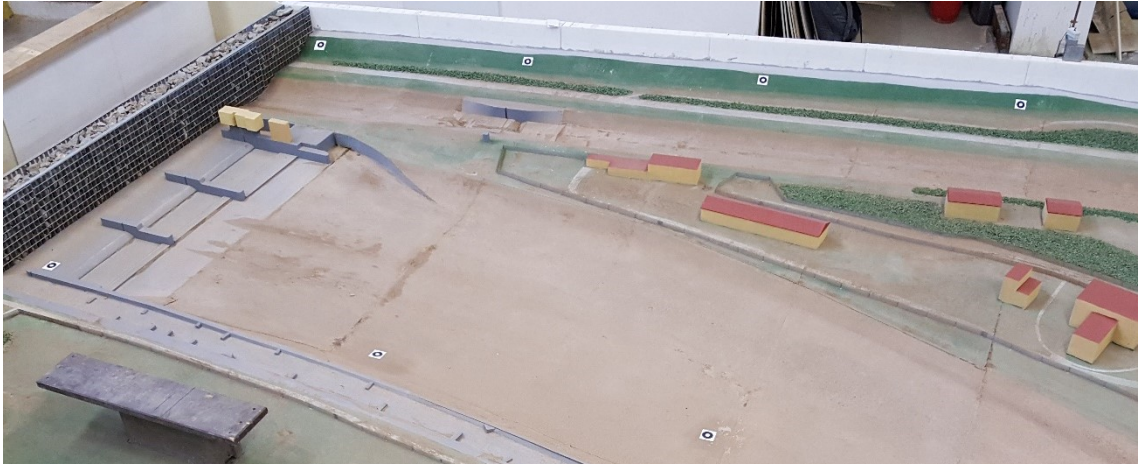
4.1 Zaměření modelu fotogrammetrickou metodou

Aby bylo možné porovnávat jednotlivé modely, je nutné je mít připojené v stejném souřadnicovém systému. Proto byl v okolí modelu vybudován místní souřadnicový systém, který byl realizován pomocí čtyř odrazných štítků a jejich souřadnice byly určeny pomocí totální stanice Trimble S8.

4.1.1 Rozmístění vlíčovacích bodů

Před samotným snímkováním byly rozmístěny vlíčovací body, které slouží k určení orientace, k transformaci do souřadnicového systému a k určení měřítka. Body byly rozmístěny po modelu tak, aby byly dobře identifikovatelné na snímcích, a proto byly umístěny po okrajích, jedna řada uprostřed modelu a jedna necelá řada v rozšířené části modelu. Celkem bylo rozmístěno 47 bodů. Jako vlíčovací body, byly zvoleny bílé čtvercové terče rozměru 6,5 x 6,5 cm, na kterých je černá kruhová značka o průměru 5 cm s bílým středem. Na vlíčovacích bodech byl znázorněn střed pro jednoznačné

definování polohy (Obr. 16). Vlíčovací body byly zaměřeny totální stanicí Trimble S8. Prostorové souřadnice bodů byly určeny v místním souřadnicovém systému.



Obr. 15: Ukázka rozmístění vličovacích bodů



Obr. 16: Detail vličovacího bodu

4.1.2 Snímkování území

Snímkování modelu proběhlo pomocí UAV DJI Spark, který byl ovládán manuálně, let provedl vedoucí diplomové práce. Snímky byly pořízeny vždy po zastavení dronu a pozice pro snímkování byly voleny tak, aby bylo dosaženo alespoň 85 % překrytu snímků. Nastavení fotoaparátu bylo nastaveno na automatický režim a pro snímky bylo voleno nejvyššího rozlišení. Celkově bylo snímkováno ve dvou řadách, kdy ve výšce 2,5 m byly voleny skloněné osy záběru a ve výšce přibližně 3,5 m a 5 m byly pořízeny

snímky s téměř svislou osou záběru. U námi použitého dronu lze kameru sklonit jen v rozmezí $0^\circ - 85^\circ$. Celkem bylo pořízeno 255 snímků ve formátu JPEG.

Dále byl model nasnímán z ohozů pomocí mobilního telefonu Samsung Galaxy S6, bylo dbáno na to, aby došlo k co největšímu překrytu snímků a byl nasnímán celý model. Fotoaparát byl nastaven na automatický režim a bylo zvoleno nejvyšší rozlišení. Pořízené snímky jsou ve formátu JPEG a celkem jich bylo nasnímáno 51.

Jako poslední byl model nasnímán digitální zrcadlovkou Canon EOS 5D Mark II s výměnným objektivem Canon EF 40 mm f/2,8 STM. Opět byl model nasnímán s co největším překrytem snímků. Celkem bylo pořízeno 485 snímků, s nejvyšším možným rozlišením a uložených ve formátu JPEG.

4.2 Kontrolní zaměření

Vodohospodářský model byl dále nezávisle zaměřen totální stanicí Trimble S8. Zaměřeno bylo 87 kontrolních bodů. Body byly voleny přibližně v rovnoměrném rastru, kdy se dbalo na to, aby se body nenacházely na hranách a rozích objektů nacházejících se na modelu. Souřadnice bodů byly vypočteny prostorovou polární metodou v místním souřadnicovém systému.

V dalších etapách byl model zaměřen pomocí laserového skenování přístroji Leica ScanStation P40 a Leica BLK360. Měření a následné zpracování provedl Bc. Jan Švejda pro účely své diplomové práce. Při měření přístroji pro laserové skenování bylo naměřeno několik skenů, které bylo nutné spojit do jednoho mračna. V programu Cyclone byla provedena registrace mračen a transformace výsledného mračna do místní souřadnicového systému, ve kterém jsou všechny porovnávána mračna bodů. Pro účely této diplomové práce byla převzata již transformovaná data.

4.3 Zpracování snímků

4.3.1 Agisoft PhotoScan

Pro zpracování snímků metodou SfM byl zvolen software Agisoft PhotoScan Professional v.1.2.6. Tento program umožňuje tvorbu 3D texturovaných modelů,

georeferencovaných ortofotosnímků s vysokým rozlišením a detailní digitální model terénu. Připojení výsledku do souřadnicového systému je pomocí souřadnic odpovídajících místu pořízeného jednotlivého snímku anebo souřadnic vlíčovacích bodů (GCP – Ground Control Point). Program umožňuje zpracovávat několik tisíc leteckých snímků.

Při zkoumání vlastností nastavení softwaru na přesnost výsledku byl porovnán jeden z výstupů programu PhotoScan a to husté mračno bodů. V následující kapitole je popsán postup zpracování.

V kapitole **Zpracování snímků** bylo čerpáno z [24].

4.3.2 Zpracování v Agisoft PhotoScan

Prvním krokem bylo nahrání snímků mapované části do softwaru. Snímky ve formátu JPEG byly importovány do příslušného adresáře – *chunk*. Dále byl importován textový soubor se souřadnicemi vlíčovacích bodů, označovaných v programu jako *Markers*. V dialogovém okně při importu je nastaven souřadnicový systém, který byl nastaven jako lokální (*Local Coordinates*). Dále byla v nastavení *Reference Setting* navolena přesnost vlíčovacích bodů, jelikož v našem případě považujeme námi zaměřené body jako přesné, byla po domluvě s vedoucím nastavena přesnost 0,1 mm.

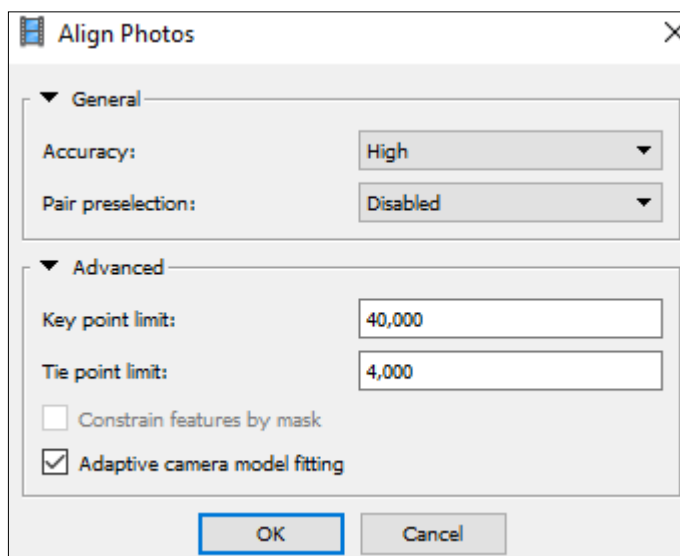
Výpočet jednotlivých modelů byl proveden v následujícím pořadí:

1. Označení vlíčovacích bodů

Na snímcích byly přesně označeny vlíčovací body, které byly předem importovány. Označeny byly dobře identifikovatelné body na snímcích. Celkem bylo označeno 47 bodů.

2. Vyhledání klíčových bodů a vytvoření řídkého mračna bodů

Spuštěním funkce *Align Photos* dojde k vyhledání klíčových bodů na snímcích a jim odpovídajících bodů na ostatních snímcích, korelací vznikne řídké mračno (*sparse cloud*) a je svazkovým vyrovnáním určena poloha jednotlivých snímků v prostoru. Výsledkem jsou tedy prvky vnitřní a vnější orientace a řídké mračno. V této funkci je možné měnit parametry výpočtu (Obr. 17).

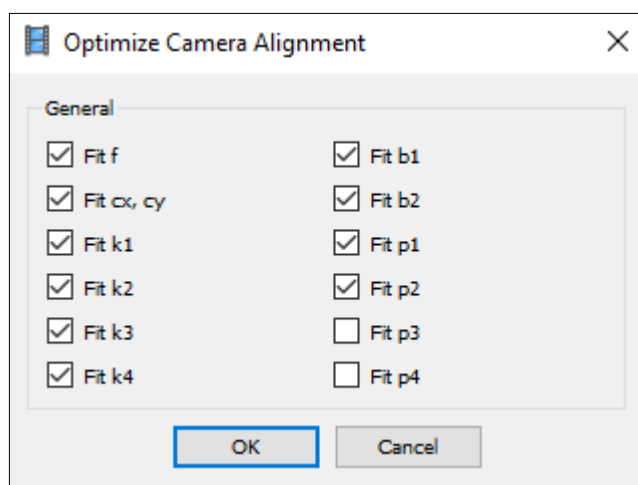
Obr. 17: Dialogové okno *Align Photos*

Prvním možným parametrem je přesnost (*Accuracy*) s jakou mají být odhadnuty prvky vnější orientace. Na výběr je mezi *Highest*, *High*, *Medium*, *Low* a *Lowest*. Volba *highest* se doporučuje u velmi ostrých snímků (snímek je softwarově rozšířen na čtyřnásobné rozlišení) a výpočet je časově velmi náročný, proto tato volba nebyla použita. Pro výpočty procesu *Align Photos* byly použity zbývající přesnosti. Při nastavení *High* software pracuje s plným rozlišením snímku. Následující volby pracují s nižšími rozlišeními snímku (1/4, 1/16, 1/64).

Dále je možné nastavit předvolbu párů (*Pair preselection*), což určuje, zda mají být vypočteny podmnožiny snímků, ve kterých jsou spojovací body. Na výběr je volba *Disabled* (vypnuto, zkouší spojovat všechny snímky se všemi), *Generic* (určí překrývající se snímky pomocí kopií snímků s nižším rozlišením) a *Reference* (výběr pomocí známých pozic kamery). Pro výpočet všech modelů nebyla povolena automatická předvolba párů (*Disabled*). V pokročilém nastavení je možné nastavit maximální množství klíčových bodů snímku (*Key point limit*) a maximální počet spojovacích bodů (*Tie point limit*) na snímek. Zde byly ponechány přednastavené hodnoty, a tedy *Key points limit* byl nastaven na 40 000 a *Tie point limit* byl 4 000. Jako poslední byla vybrána možnost *Adaptive camera model fitting*, kdy tato volba automaticky vybírá parametry kamery, které budou zahrnuty do procesu. Pokud nebude zaškrtnuta tato volba upraví se pouze fixní parametry: ohnisková vzdálenost, poloha hlavního snímkového bodu, tři koeficienty radiálního zkreslení a dva koeficienty tangenciálního zkreslení.

3. Svazkové vyrovnání

Svazkovým vyrovnáním snímků byl optimalizován model pomocí funkce *Optimize Camera Alignment*. Zde byly zvoleny prvky vnitřní orientace, které mají být vyrovnány (Obr. 18). Mezi optimalizované prvky vnitřní orientace patří ohnisková vzdálenost (f), poloha hlavního snímkového bodu (c_x, c_y), koeficienty radiální distorze (k_1 - k_4), koeficienty tangenciální distorze (p_1 - p_4), afinita a nekolmost os souřadnicových systémů (b_1, b_2).



Obr. 18: Nastavení *Optimize Camera Alignment*

4. Kontrola dosažených přesností, oprava či vyloučení vřícovacích bodů

Po výpočtu předchozích procesů byly vypočteny souřadnicové rozdíly vřícovacích bodů (X_{err} , Y_{err} , Z_{err}), jako rozdíl vypočtených souřadnic z modelu a souřadnic referenčních. Dále je u každého bodu uvedena prostorová souřadnicová chyba, která je označena jako $Error$ (4). Pro každý soubor souřadnic X , Y a Z byla vypočtena směrodatná odchylka v souřadnici (5) - $TotalErrorX$, $TotalErrorY$ a $TotalErrorZ$. Poslední vypočtená odchylka je celková prostorová směrodatná odchylka ($TotalError$) z jednotlivých chyb bodů - $Errorů$ (6).

Prostorová souřadnicová chyba:

$$Error = \sqrt{X_{err}^2 + Y_{err}^2 + Z_{err}^2}, \quad (4)$$

Směrodatná odchylka v souřadnici (obdobně v souřadnici Y a Z):

$$\text{TotalErrorX} = \sqrt{\frac{Xerr_1^2 + Xerr_2^2 + \dots + Xerr_n^2}{n}}, \quad (5)$$

Prostorová směrodatná odchylka:

$$\text{TotalError} = \sqrt{\frac{Error_1^2 + Error_2^2 + \dots + Error_n^2}{n}}, \quad (6)$$

kde n je celkový počet použitých bodů.

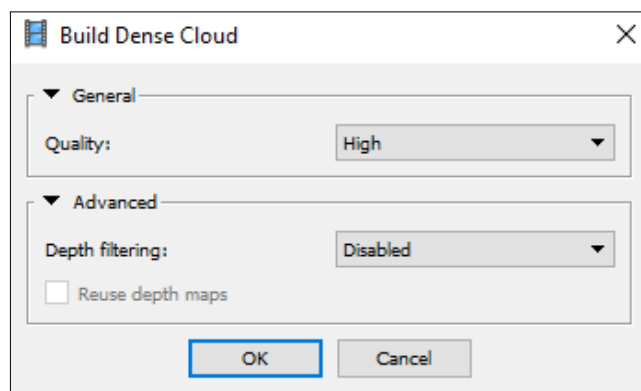
Pokud byla u vlíčovacích bodů nalezena vyšší odchylka, byl určitý bod zkontrolován, na jakých snímcích je Error nejvyšší. Poloha bodu byla opravena nebo nebyl bod použit. Po každé úpravě bylo provedeno svazkové vyrovnání. Výsledné odchylky vlíčovacích bodů jednotlivých výpočtů modelů jsou uvedeny v reportech, které jsou součástí digitální přílohy.

Markers	X err (m)	Y err (m)	Z err (m)	Accuracy (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
<input checked="" type="checkbox"/> 210	0.003071	-0.000170	-0.000010	0.000100	0.003075	49	0.581
<input checked="" type="checkbox"/> 412	-0.002299	-0.001275	-0.001636	0.000100	0.003096	4	0.270
<input checked="" type="checkbox"/> 405	-0.002592	-0.001850	-0.000188	0.000100	0.003190	24	0.522
<input checked="" type="checkbox"/> 410	0.003439	-0.000314	-0.000448	0.000100	0.003483	21	0.476
<input checked="" type="checkbox"/> 207	0.002726	0.002831	-0.000480	0.000100	0.003960	73	0.530
<input checked="" type="checkbox"/> 303	-0.003833	-0.001973	-0.000031	0.000100	0.004311	57	0.496
<input checked="" type="checkbox"/> 401	-0.002826	0.005298	-0.001694	0.000100	0.006239	3	0.346
Total Error							
Control...	0.001872	0.001456	0.000540		0.002432		0.515
Check ...							

Obr. 19: Ukázka odchylek vlíčovacích bodů

5. Výpočet hustého mračna bodů (*Dense Cloud*)

Vytvoření hustého mračna bodů bylo provedeno pomocí funkce *Build Dense Cloud*. V tomto kroku je generováno husté mračno bodů, kdy jsou programem vypočítány informace o hloubce obrazu všech snímků, které mají být sloučeny do jednoho mračna bodů. Tato část umožňuje nastavit dva parametry (Obr. 20).



Obr. 20: Dialogové okno Build Dense Cloud

První možností je volba kvality hloubkových map (*Quality*). Na výběr je z možností *Ultra high*, *High*, *Medium*, *Low* a *Lowes*. *Ultra high* pracuje s plným rozlišením snímku, každý nižší zvolený parametr znamená o jednu úroveň nižší rozlišení snímku pro zpracování. Volba *Ultra high* je velmi náročné na výpočetní výkon, a proto toto nastavení nebylo použito. Dalším parametrem je *Depth filtering*, jde o možnost volby mezi metodami filtrace mračna a odlehlých bodů. Lze nastavit *Aggressive*, *Moderate*, *Mild* nebo *Disabled*. *Agressive* je používán pro modelování scén bez drobných detailů. V případě modelování komplexní scény s velkou četností malých detailů nebo netexturovaných povrchů, jako jsou střechy, je doporučeno zvolit metodu *Mild*. *Moderate* je kompromisem předchozími metodami. Filtraci lze i zakázat *Disable*.

Výše uvedeným postupem vzniklo husté mračno bodů. Jednotlivé varianty nastavení výpočtů byly poté testovány z již vypočtených dat tak, že byly znovu opakovány ty kroky výpočtu, u kterých byla měněna nastavení. Celkový seznam vypočtených dat s konkrétním nastavením je uveden v tabulce 1.

Vypočtená výsledná hustá mračna bodů byla ořezána tak, aby obsahovala model a byla exportována do textového souboru. Dále byla generována zpráva (*Generate Report*) shrnující informace o vytvořeném modelu ve formátu PDF. Zpráva obsahuje informace jako je počet použitých snímků, průměrná výška pořízených snímků, rozloha modelované oblasti a počet vřícovacích bodů včetně jejich odchylek. V neposlední řadě obsahuje informace o použité kameře a kalibrační údaje, ve kterých je uvedena ohnisková vzdálenost v pixelech (f), souřadnice hlavního snímkového bodu v pixelech (c_x, c_y), koeficienty radiální distorze (K_1-K_4), koeficienty tangenciální distorze (P_1-P_4), afinita

a nekolmost os souřadnicových systémů (B_1 , B_2). Reporty vypočtených modelů jsou součástí příloženého disku DVD.

Tabulka 1: Seznam vypočtených hustých mračen bodů včetně jejich vlastností

Získání snímků	Počet vlíc. bodů	Počet snímků	Align Photos	Build Dense Cloud	
			Accuracy	Quality	Depth filtering
Digitální zrcadlovka Canon	47	396	high	high	mild
Mobilní telefon Samsung S6	44	51	high	high	mild
UAV DJI Spark	45	255	high	high	disabled
	45	255	high	high	mild
	45	255	high	high	moderate
	45	255	high	high	aggressive
	45	255	medium	medium	disabled
	45	255	low	low	disabled
	45	255	lowest	lowest	disabled
	21	255	high	high	disabled
	11	255	high	high	disabled
	6	255	high	high	disabled
	4	162	high	high	disabled
	4	108	high	high	disabled
	4	68	high	high	disabled
	4	93	high	high	disabled

4.4 Porovnání mračen bodů

4.4.1 CloudCompare

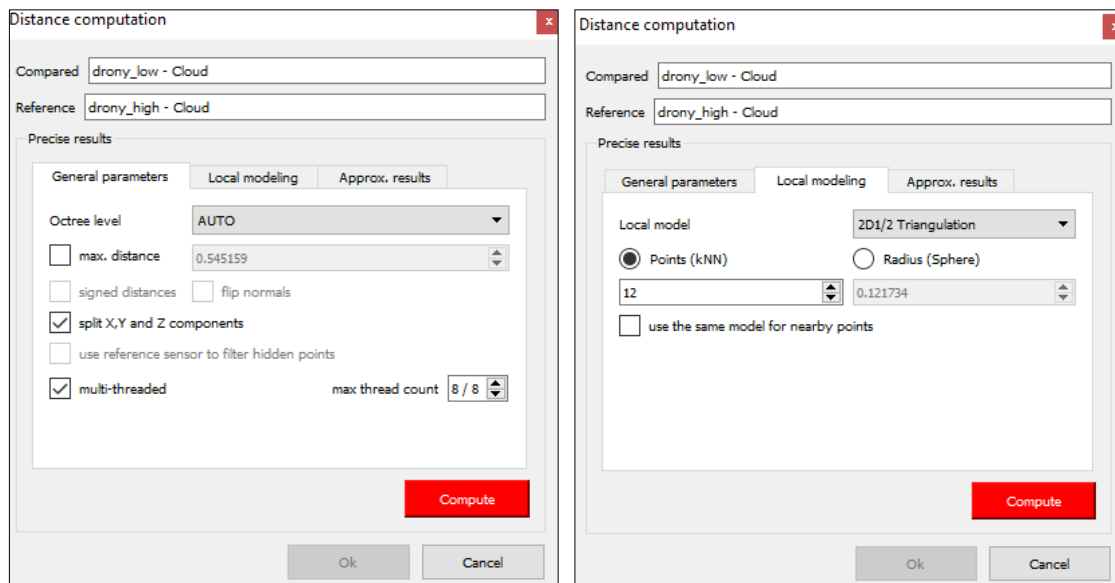
Pro porovnání mračen bodů byl zvolen software CloudCompare v. 2.9.1. Jedná se o volně šiřitelný software, pro editaci a zpracování bodových mračen (a trojúhelníkových sítí). Software umožňuje porovnání hustých mračen bodů, porovnání mračen bodů s trojúhelníkovou sítí, dále umožňuje pro práci s 3D daty operace jako jsou registrace, statistické výpočty, tvorba trojúhelníkové sítě, převzorkování atd. Pro efektivní práci, co se týče porovnávání dat, používá software metodu dělení prostoru, známou jako oktanový strom – octree.

V kapitole **4.4 Porovnání mračen bodů** bylo čerpáno z [25].

4.4.1 Postup porovnání v CloudCompare

Do softwaru byla importována mračna bodů, která byla následně ořezána tak, aby byla porovnávaná mračna stejně velká, a dále byla očištěna od odlehlých bodů. Jelikož jsou všechna porovnávaná mračna ve stejné souřadnicové soustavě, nebylo potřeba provádět transformaci do stejného souřadnicového systému.

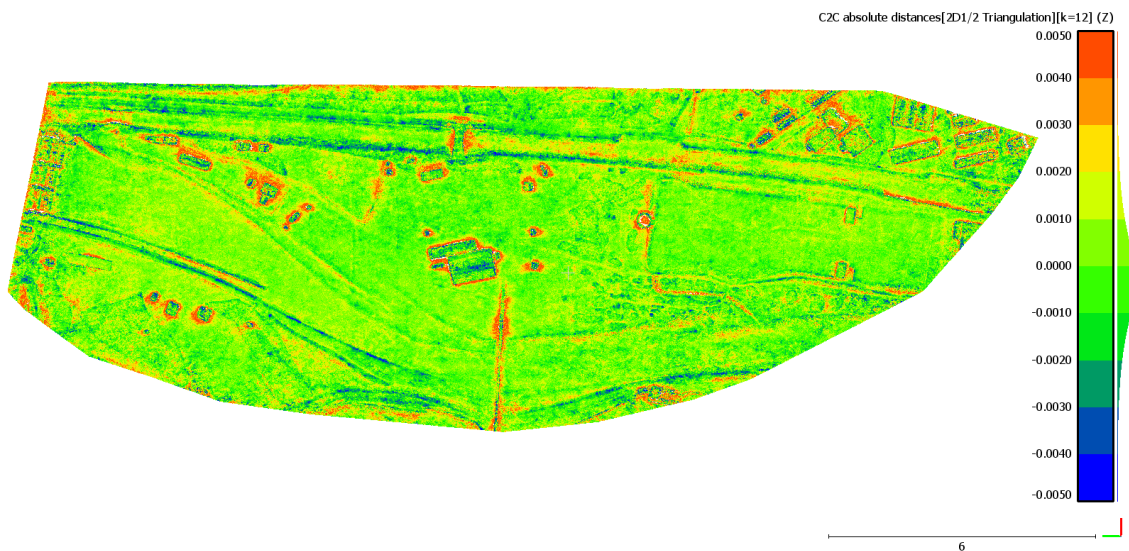
Po úpravách byla vybrána ta dvě mračna bodů, která se budou porovnávat pomocí funkce *Cloud-cloud distance computation* (Obr. 21).



Obr. 21: Cloud-cloud distance computation

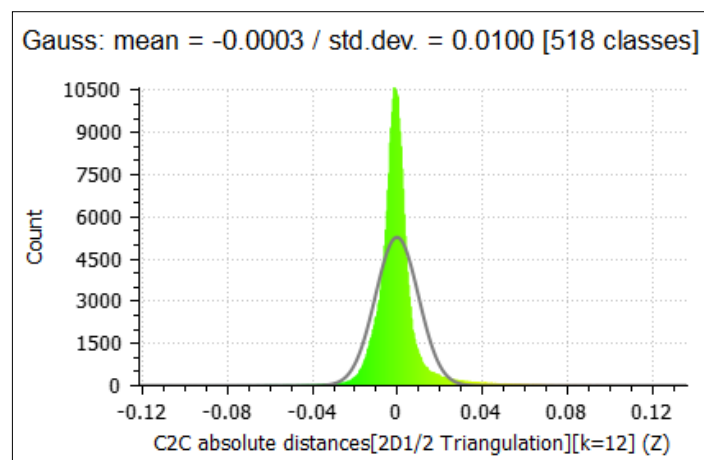
Nejprve bylo zvoleno, jaké mračno je referenční a které je porovnáváno. Jako referenční mračno bylo zvoleno vždy to s větší hustotou bodů. Dále byly nastaveny parametry porovnání. Octree level byl nastaven na Auto, program si hodnotu při výpočtu přizpůsobí sám. Výpočet byl dále rozdělen pro určení odchylky v ose X, Y a Z. Pro získání statisticky přesnějších výsledných vzdáleností mezi mračny je vzdálenost dopočtena pomocí lokálního matematického modelu. Vzdálenost každého bodu porovnávaného mračna k nejbližšímu bodu referenčního mračna je nahrazena vzdáleností od tohoto modelu. Tento model referenční plochy byl vypočten 2D^{1/2} Delaunayovou triangulací, kdy bylo zvoleno 12 sousedních bodů, k tzv. nejbližšímu sousedovi (tedy počet vytvořených trojúhelníků).

Po vypočtení vzdáleností mezi mračny byla výsledná porovnání zhodnocena na základě vzdálenosti v souřadnici Z. Byla nastavena modro-zeleno-žluto-červená barevná hypsometrie s 10 kroky, vyjadřující odchylky (Obr. 22). Nastaven byl rozsah zobrazovaných vzdáleností.



Obr. 22: Ukázka výsledného mračna porovnání

Dále byly vypočteny statistické parametry normálního rozdělení pro vzdálenosti v ose Z, kterými jsou průměrná vzdálenost a směrodatná odchylka (Obr. 23). Je možné vygenerovat graf četnosti chyb (histogram).



Obr. 23: Statistické parametry normálního rozdělení pro vzdálenosti v ose Z

Soubor s porovnanými mračky byl uložen ve formátu *.bin a byl proveden export snímku porovnávaných mračen a statistických parametrů.

5 Výsledky testování metody SfM

Po dokončení zpracování dat v programu Agisoft PhotoScan a získání potřebných modelů (Tabulka 1) proběhlo porovnání v softwaru CloudCompare. Jedná se především o porovnání mračen získaných metodou SfM ze snímků z UAV.

Schéma porovnání dat:

1. porovnání metod získání 3D mračna bodů,
2. porovnání vlivu kvality snímků na získání mračna bodů,
3. vliv nastavení zpracovatelského softwaru na přesnost výsledku – filtrace,
4. vliv nastavení zpracovatelského softwaru na přesnost výsledku – kvalita,
5. vliv počtu vřícovacích bodů na přesnost výsledku,
6. vliv konfigurace snímků na přesnost výsledku.

Zhodnocení výsledků proběhlo na základě vždy dvou porovnaných mračen, kde byla vypočtena vzdálenost v ose Z. Povrchové odchylky (vzdálenosti) byly znázorněny pomocí modro-zeleno-žluto-červeně barevné hypsometrie s 10 intervaly. Dále je zobrazena barevná stupnice s minimální a maximální vzdáleností, které budou znázorněny a byly voleny tak, aby byl znázorněn celý povrch modelu a nevznikaly „díry“ v důsledku odlehlých bodů. Přes veškerou snahu nešly nastavit stupnice stejné ve všech porovnáních, protože by při volbě malých odchylek ve výsledném mračnu chyběly body. Rozsah odchylek v jednotlivých porovnáních byl tedy rozdílný a přizpůsoben konkrétnímu případu. Čtenář se musí vždy podívat jaká stupnice byla zvolena. Pokud by byly voleny velké odchylky, nebyla by vizualizace odchylek názorná. Na pravé straně stupnice je umístěn histogram který znázorňuje četnosti jednotlivých odchylek.

Pro každé porovnání byla vypočtena průměrná vzdálenost (odchylka) mezi porovnávanými mračny. Z rozdílů délek od průměrné vzdálenosti byla vypočtena základní směrodatná odchylka neboli rozptyl měření.



Průměrná odchylka:

$$\bar{x} = \frac{[x_i]}{n}, \quad (7)$$

kde x_i je vypočtená vzdálenost v ose Z,

n je počet bodů.

Směrodatná odchylka:

$$s = \sqrt{\frac{[v_i v_i]}{n}}, \quad (8)$$

kde v_i je rozdíl $\bar{x} - x_i$,

n je počet bodů.

Dále bylo na základě vizualizovaných odchylek provedeno ústní hodnocení. Na obrázku 24 je uveden horní pohled na model pro lepší orientaci při hodnocení porovnaných mračen.



Obr. 24: Pohled na vodohospodářský model

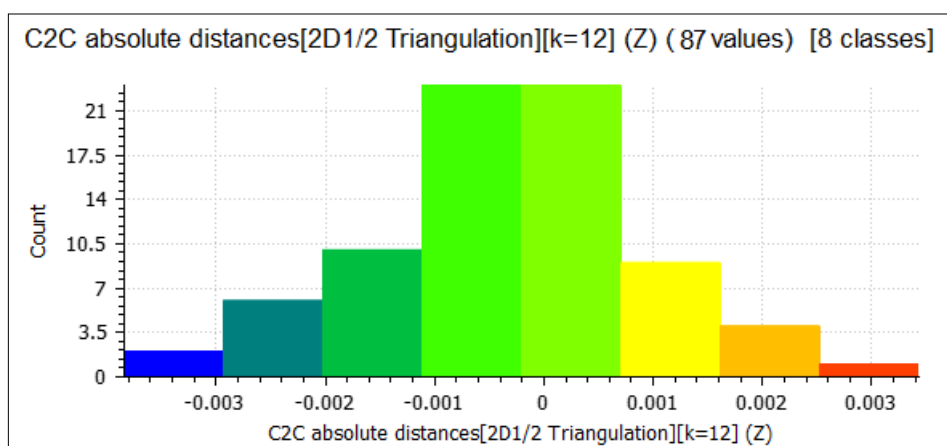
5.1 Porovnání metod pro získání 3D mračka bodů

V této kapitole bylo porovnáno mračno bodů získané metodou SfM ze snímků z UAV pro námi zvolenou nejlepší konfiguraci nastavení. Do výpočtu vstupovaly všechny pořízené snímky (255 snímků) a bylo použito 45 vlíčovacích bodů. Aby bylo docíleno co nejvíce podrobného hustého mračka bodů, byl výpočet nastaven na kvalitu *High* a filtrace bodů byla zakázána (*Disabled*). Takto vypočtené mračno bodů bylo porovnáno s kontrolními nezávislými metodami.

Porovnání UAV (metoda SfM) s totální stanicí

První kontrolní metodou bylo zvoleno zaměření bodů totální stanicí. Body byly voleny v pravidelném rastru tak, aby se vyskytovaly v ploše, a ne na hranách objektů modelu. Celkem obsahuje soubor 87 bodů. Soubor bodů zaměřený totální stanicí považujeme díky přesnosti přístroje za nejpřesnější ze zvolených kontrolních metod. Při porovnání se vzdálenosti pohybují v intervalu od -3,8 mm do +3,4 mm, četnost odchylek je uvedena v histogramu (Obr. 25). Průměrná vzdálenost je -0,3 mm a směrodatná odchylka je 1,3 mm.

Můžeme říci, že výškové zachycení modelu získaného UAV je přesné.

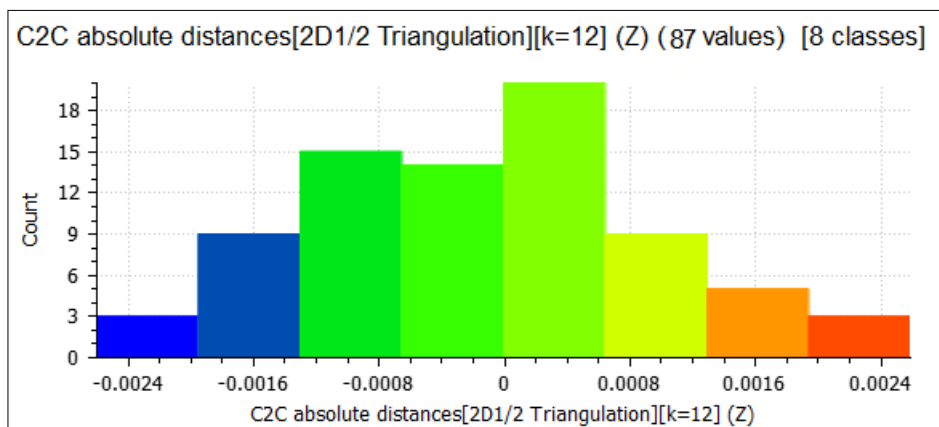


Obr. 25: Četnost jednotlivých vzdáleností při porovnání UAV – totální stanice

Porovnání laserového skeneru Leica ScanStation P40 s totální stanicí

Dále bylo mračno získané metodou SfM porovnáno s mračnem získaným laserovým skenerem Leica ScanStation P40. Dálkoměr tohoto přístroje má přesnost

1,2 mm + 10 ppm, získaná data by měla být přesná s minimální mírou šumu. Ještě předtím, než došlo k porovnání s daty z UAV, bylo mračno bodů porovnáno s totální stanicí, aby byla ověřena jeho přesnost. Vzdálenosti mezi těmito soubory dat je v intervalu od -2,6 mm do 2,6 mm (Obr. 26), průměrná vzdálenost v ose Z je -0,1 mm a směrodatná odchylka je 1,1 mm. Můžeme tedy říct, že přesnost tohoto mračna je více než dostačující pro komplexní porovnání modelu a zjištění závěrů ohledně přesnosti vyhodnoceného modelu pomocí metody SfM.



Obr. 26: Četnost jednotlivých vzdáleností při porovnání P40 – totální stanice

Porovnání UAV (metoda SfM) s laserovým skenerem Leica ScanStation P40

Při porovnání UAV a skeneru P40 byla vypočtena globální charakteristika, a tedy průměrná vzdálenost a směrodatná odchylka. Průměrná vzdálenost neboli systematický posun je -0,5 mm. Přesnost je dána směrodatnou odchylkou 2,2 mm. Při pozorování histogramu na stupnici je vidět, že nejvíce odchylek se vyskytuje v intervalu -3 mm až 3 mm. Tato přesnost je velmi příznivá při faktu, že mračno získané metodou SfM vzniklo ze snímků vestavěného fotoaparátu UAV a nedá se říci, že kvalita fotoaparátu je příliš vysoká. Dále je provedeno slovní ohodnocení těchto dvou modelů na základě vizualizace odchylek při porovnávání modelů (Obr. 49).

Stupnice odchylek je v intervalu od -5 mm do 5 mm. Jako první si můžeme všimnout na obrázku oblasti, na kterých je nalepena umělá tráva. V těchto oblastech jsou chyby, které nejsou systematické, vyskytují se zde body jak s kladnými, tak zápornými odchylkami. U laserového skeneru dopadají paprsky na model především z boku a u této umělé trávy nelze přesně určit kde se odrazí, kdežto v této oblasti u metody SfM dochází ke korelaci bodů na povrchu.

Dále je vidět červené ohraničení v místech výskytu plechového plotu, který je viditelný na snímku - Obr. 27. Chyby jsou zde způsobeny špatným zaměřením jak laserovým skenerem, tak fotogrammetricky. Plechový plot není celistvý, ale je děrovaný, dochází ke špatnému odrazu skeneru a je v těchto místech viditelný šum (Obr. 28). Pro fotogrammetrické zaměření je tento plot velký detail a jelikož byl snímek pořízen z velké výšky, není program schopen tento detail vyhodnotit. Při výpočtu dochází k filtraci bodů a při vytvoření modelu jsou použity okolní body, tím vznikne jakási vyvýšenina, u které lze říct, že je patrná, ale není zde ostře vymodelovaný plot (Obr. 29). Vzájemné porovnání těchto dvou technologií lze pozorovat na obrázku 31.

Podobný případ můžeme pozorovat na oválném objektu (Obr. 32). Laserovým skenováním je tento objekt zaměřen do detailu, rysy jsou ostré (Obr. 32). U fotogrammetrické metody je možné pozorovat, že tento ovál je jakoby pobouraný a není ostrý (Obr. 32). To je opět způsobené tím že se jedná o velký detail, při výpočtu dochází k filtraci, kde se body různě odfiltrují a následně hloubková mapa snímku už detail nevystihne. Tento jev je názorný i na obrázcích 35 a 36.

Další místo, na kterém se nachází velké odchylky je oblast kolem budov. U metody SfM jsou poměrně dobře vymodelované střechy. Šikmých snímků je méně než se svislou osou záběru, a proto je po bocích objektů menší množství bodů (Obr. 39). Při bočním pohledu na budovu (Obr. 42) je vidět, že boční stěny nejsou zcela rovné. Velké odchylky jsou především v hranách, spojnicích budov s terénem. Body hustého mračka vznikají pomocí řídkého mračka tak, že se k stávajícím bodům vytvářejí takzvaní noví sousedé, a tedy pokud je bod na hraně, nelze vytvořit ostrý přechod jako je tomu u laserového skenování (Obr. 41). U mračka laserového skenování si můžeme všimnout menšího šumu, který vznikl nejspíš vícenásobným odrazem paprsku. Vzájemné srovnání budovy získané metodou SfM s laserovým skenováním lze vidět na obrázku 44.

Dalším problematickým místem s velkými odchylkami je lávka (Obr. 45). Jedná se opět o malý objekt, který zakrývá spodní konstrukci a je zde vidět velký šum při zpracování metodou SfM (Obr. 47).

Pokud se podíváme na vzájemné srovnání metody SfM s laserovým skenováním může říci, že v místech volných ploch jsou odchylky na úrovni milimetru. Na problematických místech, jako například zmíněný plůtek či lávka, jsou odchylky větší

přesahující i námi zvolenou stupnici. Tyto detaily by musely být nasnímány v menší výšce s více snímky.

Porovnání UAV (metoda SfM) s laserovým skenerem Leica BLK360

V této části bylo porovnáno mračno získané metodou SfM z UAV s mračnem získaným levnějším a menším laserovým skenerem, než byl předchozí případ. Přesnost dálkoměru je 4 mm/10 m a 7 mm/20 m. Jedná se tak v podstatě o srovnání dvou cenově nižších variant získání mračna bodů.

Při porovnání je uvedena průměrná odchylka -0,3 mm, směrodatná odchylka je 2,8 mm, tedy je o 0,6 mm vyšší než při porovnání s předchozím skenerem. Při shlednutí vzájemného porovnání, které je uvedeno na obrázku 50 je opět stupnice odchylek v intervalu -5 mm až 5 mm.

Na vizuálním znázornění odchylek jsou viditelné červené oblasti kolem kruhů, uprostřed kterých byly umístěny stanoviska skeneru. Tato chyba je způsobena především přesností dálkoměru skeneru. Pokud dálkoměr měří šikmo dolů, projeví se celá chyba dálkoměru na vzdálenost v ose Z, pokud je vzdálenější délka neprojeví se chyba tolik ve výšce. Dále jsou na porovnání UAV-BLK360 vidět nesystematické odchylky dosahujících maximální hodnoty jak kladné, tak záporné po celém modelu oproti srovnání se skenerem Leica ScanStation P40, kde v ploše byly odchylky především kolem -2 mm až 2 mm, to je opět způsobené chybou dálkoměru přístroje BLK360.

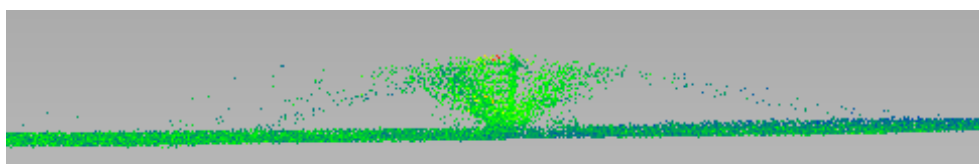
Na znázornění vzdáleností mezi mračny lze vidět velké odchylky, které jsou stejně jako v předchozím srovnání v oblasti kovového plotu. To je opět zapříčiněno špatným zaměřením necelistvého plotu (Obr. 30) a špatným vyhodnocením plotu metodou SfM. Dalším místem je oválný objekt (Obr. 34), kde laserové skenování zaznamená ostré hrany lépe, než je tomu u metody SfM.

Na obrázku 43 lze pozorovat zaměření budovy laserovým skenerem BLK360. V oblasti střechy je viditelný větší šum. Hrany zde nejsou zaoblenější jako tomu je u metody SfM.

Posledním objektem, který působí větší odchylky při porovnání, je lávka (Obr. 48). Při zaměření skenerem BLK360 vzniká šum špatným odrazem paprsku při zaměření.



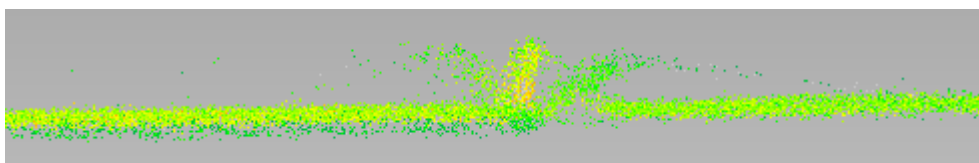
Obr. 27: Detail plotu na snímku



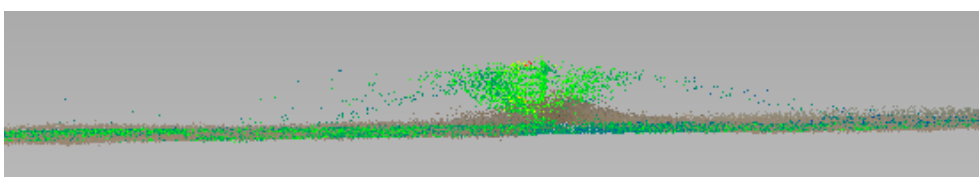
Obr. 28: Detail plotu na mračnu bodů získaným laserovým skenerem Leica ScanStation P40



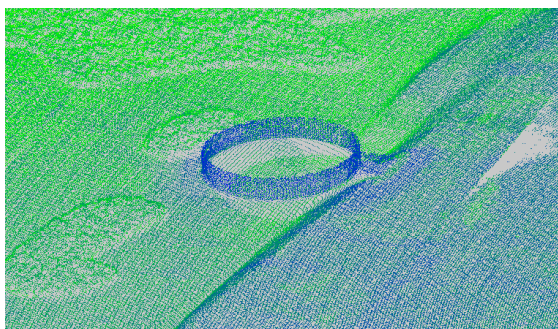
Obr. 29: Detail plotu na hustém mračnu získaného metodou SfM



Obr. 30: Detail plotu na mračnu bodů získaným laserovým skenerem Leica BLK360



Obr. 31: Vzájemné srovnání oblasti plůtku – SfM a laserové skenování



Obr. 32: Oválný objekt (Leica ScanStation P40)



Obr. 33: Oválný objekt UAV



Obr. 34: Oválný objekt Leica BLK360



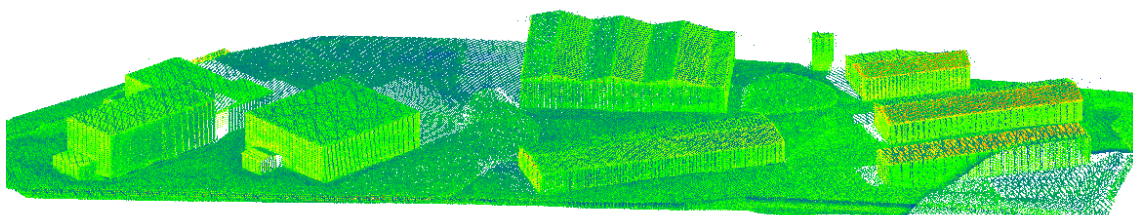
Obr. 35: Průřez oválným objektem - P40



Obr. 36: Průřez oválným objektem - UAV



Obr. 37: Průřez oválným objektem – BLK



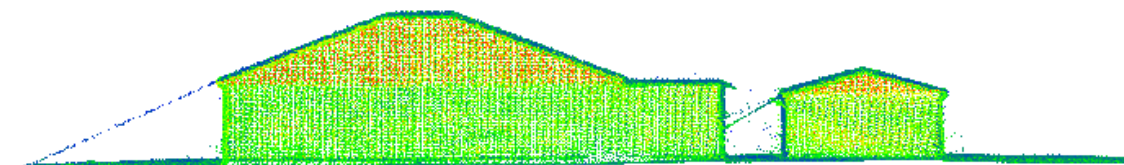
Obr. 38: Zaměřené budovy – Leica ScanStation P40



Obr. 39: Zaměřené budovy – UAV



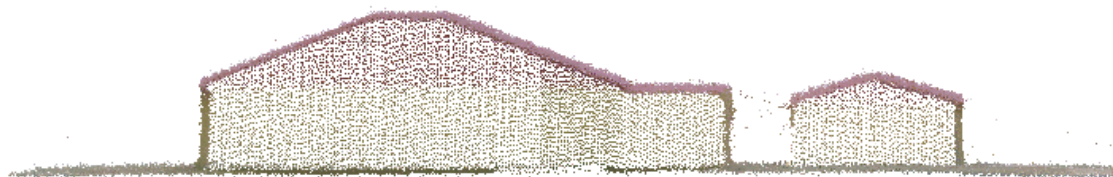
Obr. 40: Zaměřené budovy: Leica BLK360



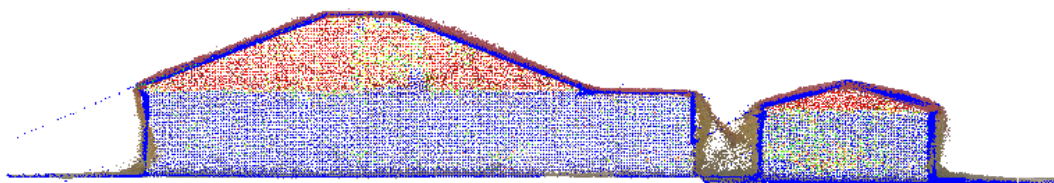
Obr. 41: Objekt zaměřeného skenerem Leica ScanStation P40



Obr. 42: Vyhodnocený objekt a zakryté místo mezi objekty UAV



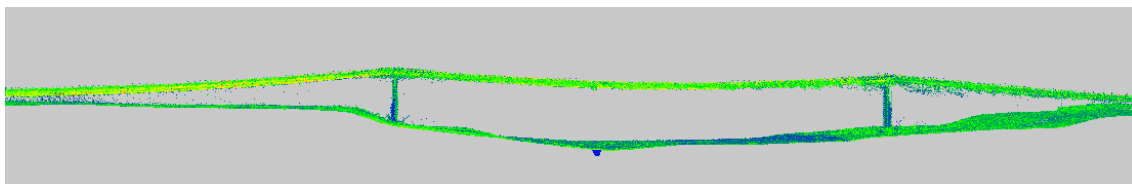
Obr. 43: Objekt zaměřený skenerem Leica BLK360



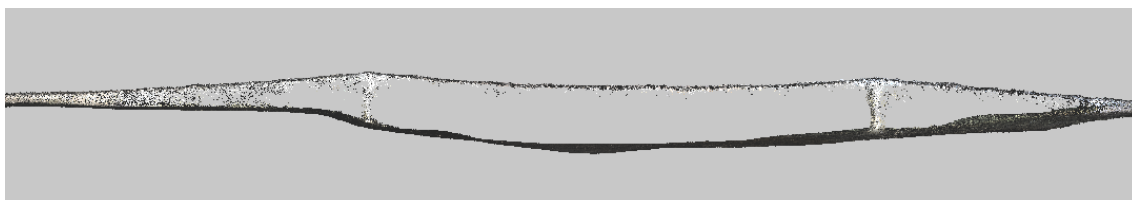
Obr. 44: Porovnání budovy vyhodnocené metodou SfM s laserovým skenováním



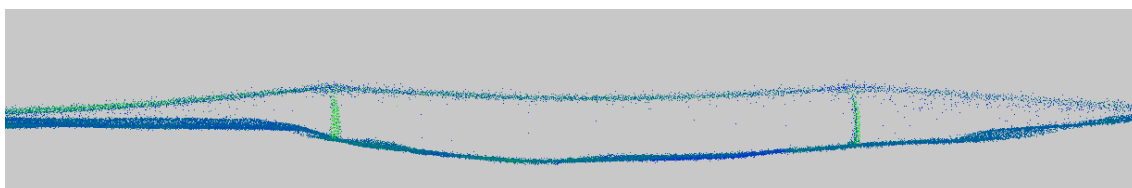
Obr. 45: Snímek lávky



Obr. 46: Zaměření lávky - Leica ScanStation P40



Obr. 47: Zaměření lávky – UAV



Obr. 48: Zaměření lávky - Leica BLK360

Závěr

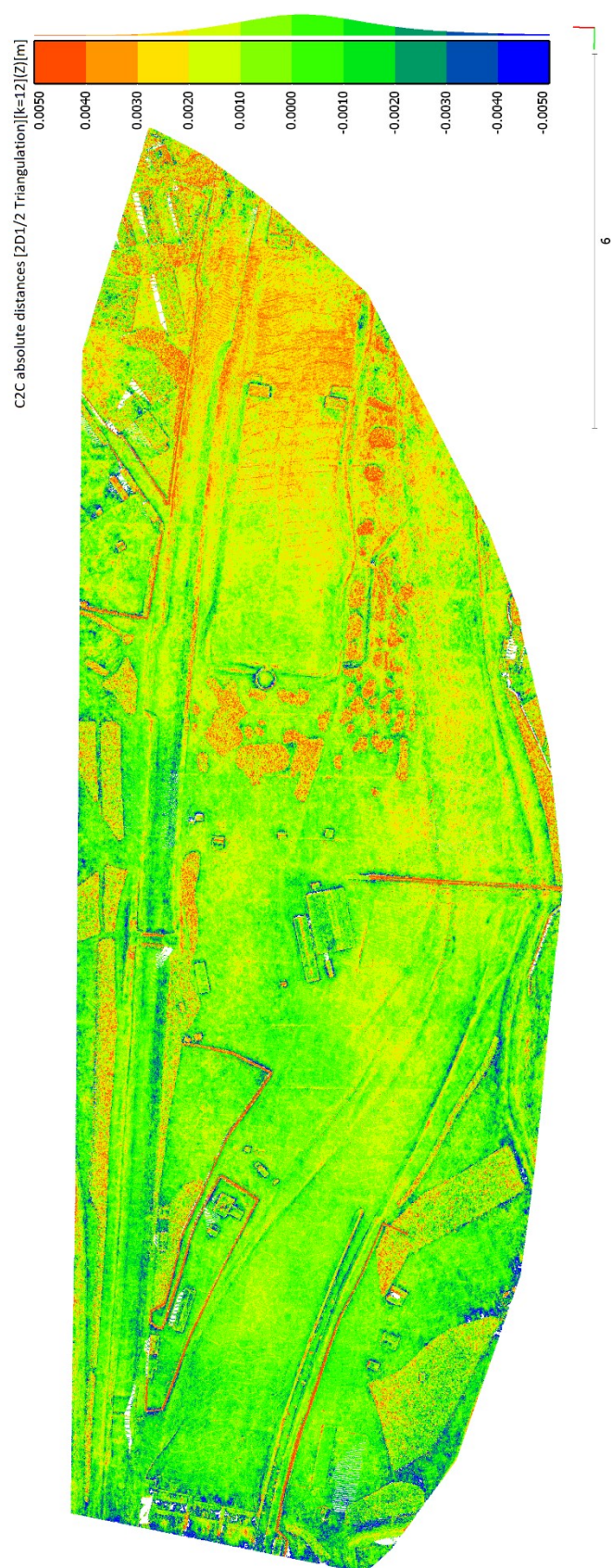
V tabulce 2 je přehled výsledných statistických parametrů při porovnání metod získání 3D mračna bodů. Můžeme pozorovat celkem vysokou přesnost mračna získaného metodou SfM ze snímků z UAV s vestavěným fotoaparátem.

Tabulka 2: Statistické parametry při porovnání metod získání 3D mračna bodů

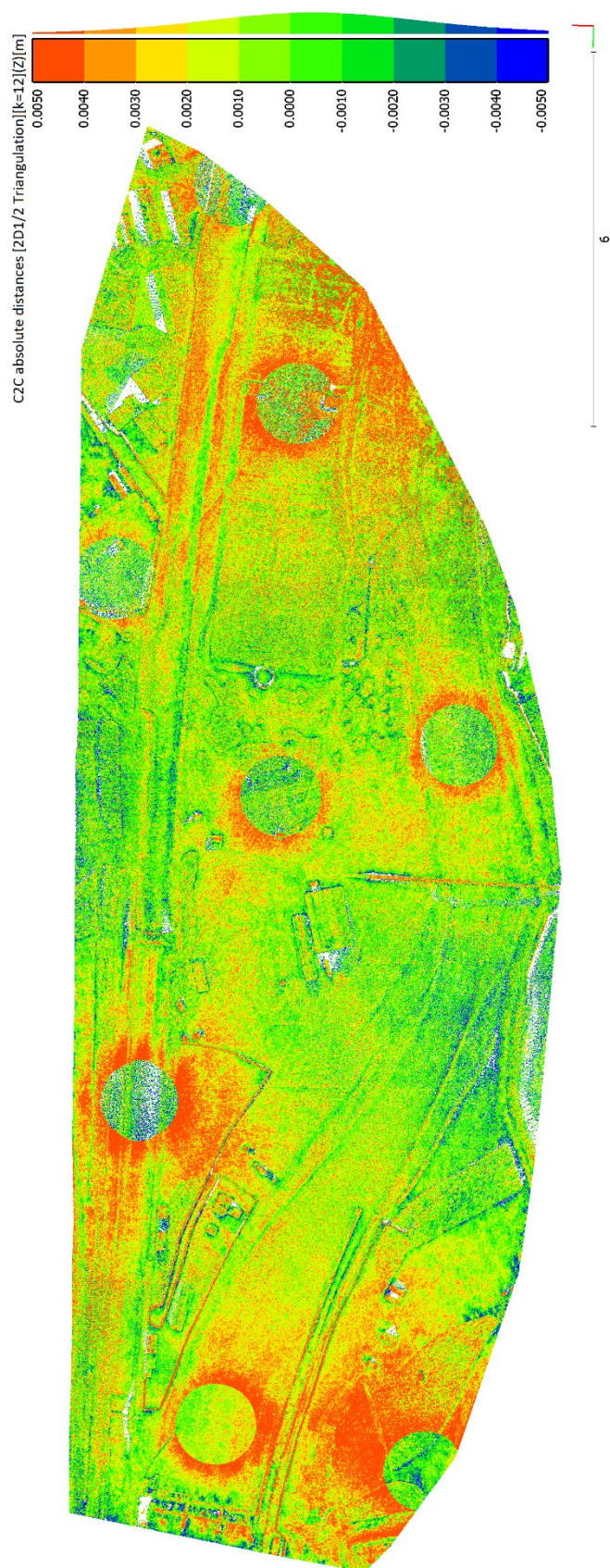
Porovnaná mračna	Průměrná vzdálenost v ose Z \bar{x}	Směrodatná odchylka s
UAV - totální stanice	-0,3 mm	1,3 mm
P40 - totální stanice	-0,1 mm	1,1 mm
UAV - P40	-0,5 mm	2,2 mm
UAV - BLK360	-0,3 mm	2,8 mm

Laserové skenování má výhodu věrnějšího zachycení tvaru objektů. Ostré hrany jsou u metody SfM největším problémem. Ovšem při komplexním srovnání dat získaných metodou SfM s ostatními kontrolními metodami bylo zjištěno velmi příznivých výsledků. Směrodatná odchylka 2,2 mm při porovnání mračna bodů získaným laserovým skenerem Leica ScanStation P40 s UAV můžeme považovat za více než dostačující. Kromě oblastí s většími odchylkami je ve volném prostoru dosaženo vzdálenosti kolem 1 milimetru.

Mračno zaměřené laserovým skenerem Leica BLK360 je tvarově věrnější než mračno získané metodou SfM, opět se jedná především o místa ostrých hran. Jsou zde, ale patrné chyby vzniklé přesností dálkoměru přístroje. Oproti Leice ScanStation P40 je viditelný i větší šum.



Obr. 49: Porovnání UAV high (disabled) – Leica ScanStation P40
Průměrná vzdálenost = -0,5 mm; směrodatná odchylka = 2,2 mm



Obr. 50: Porovnání UAV high (disabled) – Leica BLK360
Průměrná vzdálenost = **-0,3 mm**; směrodatná odchylka = **2,8 mm**

5.2 Porovnání 3D mračen získaných jinými fotoaparáty

Dále byla porovnána mračna bodů získaná metodou SfM, ale každé mračno bylo vyhodnoceno ze snímků získaných jiným druhem fotoaparátu. Jako první byla pro porovnání zvolena digitální zrcadlovka Canon EOS 5D Mark II. Dále byl zvolen pokus, jaký model lze získat pomocí snímků z digitálního fotoaparátu, který má dnes téměř každý k dispozici, tedy fotoaparátem na mobilním telefonu. Model byl nasnímán z ochozů tak, aby se snímky, pokud možno co nejvíce překrývaly a byl nasnímán celý model.

Pro vypočtená mračna tohoto porovnání je v tabulce 3 uveden počet použitých vlícovacích bodů a snímků. Mračna byla vypočtena na kvalitu *High* a filtrace byla zvolena *Mild*.

Tabulka 3: Přehled porovnávaných mračen a jejich vlastnosti

Získání snímků	Počet vlíc. bodů	Počet snímků
Digitální zrcadlovka Canon	47	396
Mobilní telefon Samsung S6	44	51
UAV DJI Spark	45	255

Porovnání UAV a digitální zrcadlovka Canon EOS 5D Mark II

Při porovnání je průměrná vzdálenost v ose *Z* -0,2 mm, tedy systematický posun zde není znatelný. Směrodatná odchylka je 1,9 mm a při pohledu na vizualizované odchylky, které jsou na obrázku 57 je vidět, že se většina vzdáleností v ose *Z* pohybuje v rozmezí -2 mm až 2 mm. Větší vzdálenosti jsou v horním pravém úseku kde se nachází několik budov, a tedy i zakrytých míst. Pravděpodobně zde chyba vznikla tím, že při snímání digitální zrcadlovkou bylo použito více snímků a tedy je zde dosaženo detailnějšího vyhodnocení zakrytých míst při obrazové korelaci. Jelikož nebyly pořízeny žádné snímky shora nejsou místa uprostřed vypočtena s detailem jako tomu je u UAV. Například oválný objekt uprostřed modelu (Obr. 51) vzniklý ze snímků Canon není celistvý. Dále na obrázku 54 a 55 můžeme porovnat mračna bodů, která zachytila budovy na modelu. Mezi těmito dvěma mračny není velký rozdíl, můžeme jen pozorovat větší míru šumu, který mohl vzniknout pravděpodobně nějakým rozmazaným snímkem.

Porovnání UAV (metoda SfM) a mobilní telefon Samsung S6

Při porovnání byla zjištěna průměrná vzdálenost v ose Z -1,9 mm a je zde patrný systematický posun. Směrodatná odchylka je 25,2 mm, a tedy není zde dosaženo tak dobrých výsledků jako je tomu v porovnání s digitální zrcadlovkou. Na vizualizovaných odchylkách na obrázku 58 je stupnice odchylek v intervalu od -25 mm do 25 mm. Rozdílnost mračen vytvořených pomocí snímků z mobilního telefonu a UAV je způsobená především počtem snímků. Celkem bylo pro mobilní telefon získáno 51 snímků, tedy 5x méně, než tomu bylo u UAV. Snímky jsou také pořízeny z ohozů, které se nacházejí kolem modelu, a tedy prostor uprostřed již není zachycen s takovým detailem. Při pohled na mračno jsou zde místa, která nebyla z důvodu nízkého počtu snímků vyhodnocena a jsou zde prázdná místa. Celkově je patrný velký šum. Nejvyšší odchylky jsou v místech, ve kterých byl malý překryt snímků. Pro lepší vyhodnocení mračna by bylo potřeba více snímků.



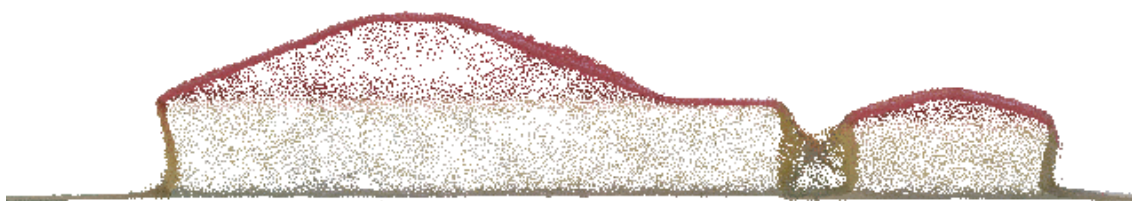
Obr. 51: Oválný objekt – UAV



Obr. 52: Oválný objekt - Canon



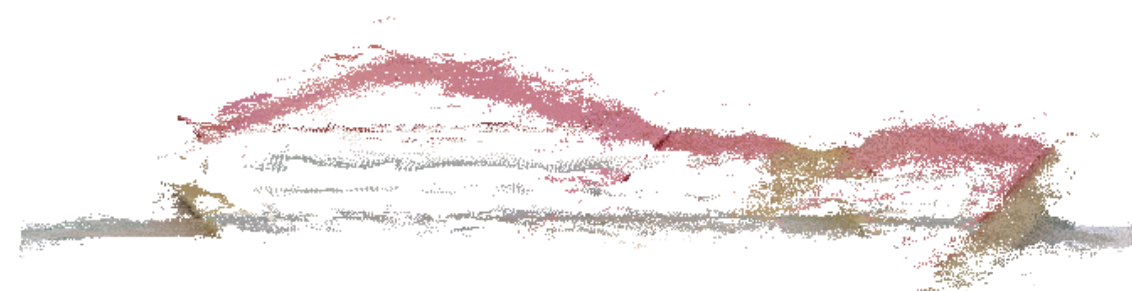
Obr. 53: Oválný objekt – mobilní telefon



Obr. 54: Budova uprostřed vodohospodářského modelu - UAV



Obr. 55: Budova uprostřed vodohospodářského modelu - Canon



Obr. 56: Budova uprostřed vodohospodářského modelu - mobil

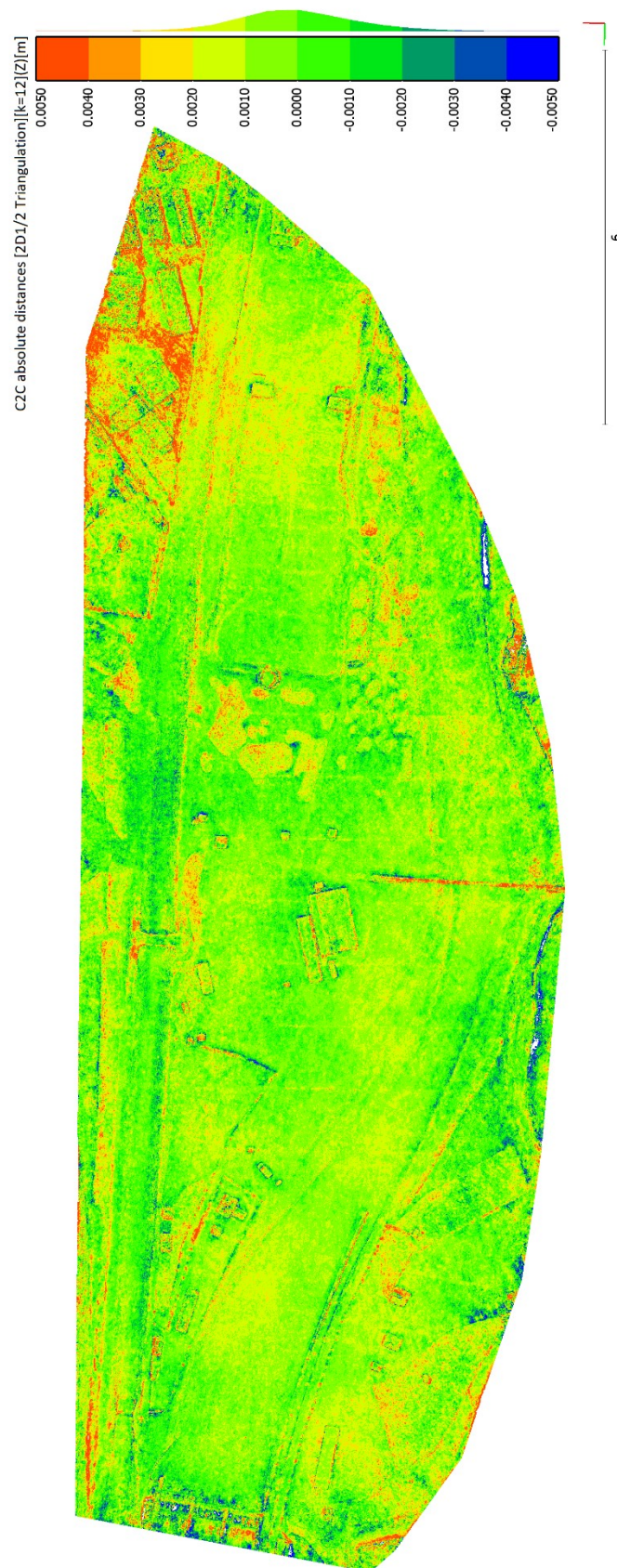
Závěr:

Při tomto testování bylo zjištěno, jaké rozdíly vznikají při zachycení modelu jiným fotoaparát. Porovnání bylo vůči modelu vzniklým ze snímků z UAV. V tabulce 4 jsou uvedeny průměrné vzdálenosti a směrodatné odchylky zjištěné při porovnání.

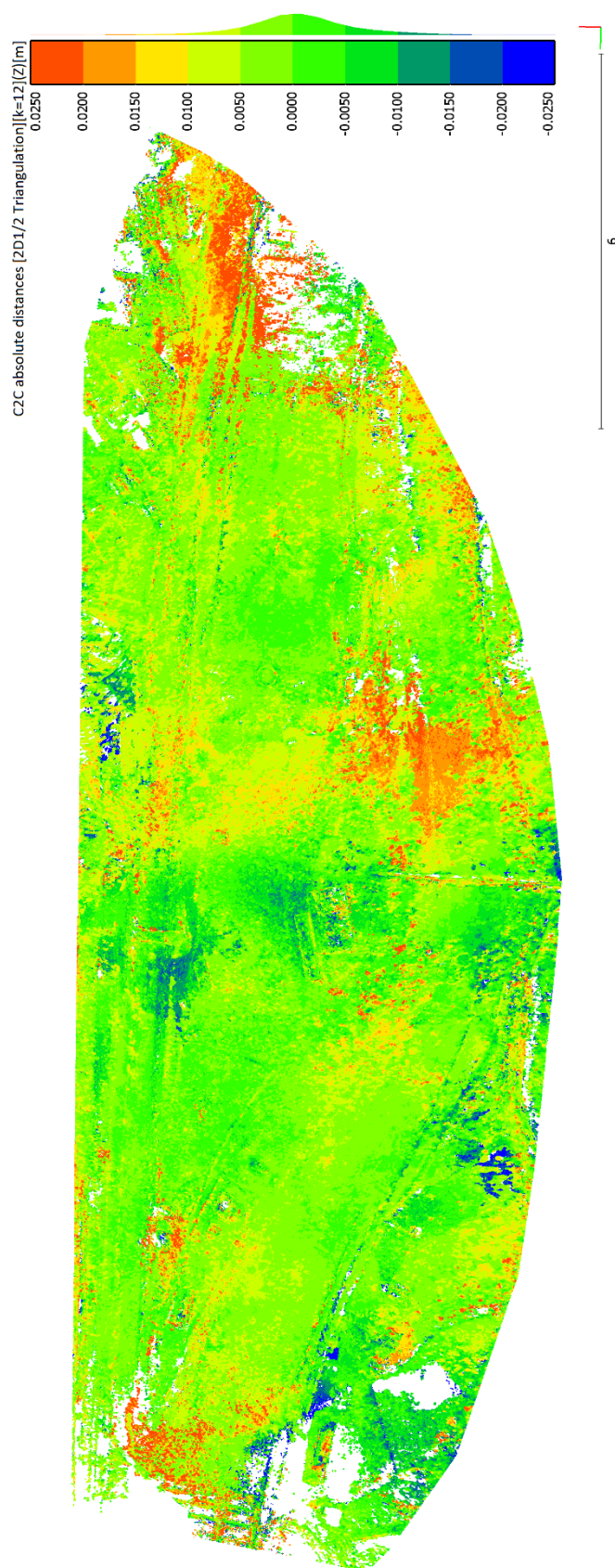
Tabulka 4: Statistické parametry při porovnání mračen získanými jinými fotoaparáty

Porovnaná mračna	Průměrná vzdálenost v ose Z \bar{x}	Směrodatná odchylka s
Dron - Canon	-0,2 mm	1,9 mm
Dron - mobil	-1,9 mm	25,2 mm

Spíše, než kvalita fotoaparátu má na přesnost výsledku vliv počet snímků, který byl v rámci této diplomové práce také testován.



Obr. 57: Porovnání UAV high (mild) – Canon high (mild)
Průměrná vzdálenost = **-0,2 mm**; směrodatná odchylka = **1,9 mm**



Obr. 58: Porovnání UAV high (mild) – Mobil high (mild)
Průměrná vzdálenost = **-1,9 mm**; směrodatná odchylka = **25,2 mm**

5.3 Zhodnocení vlivu uživatelského nastavení SW na přesnost výsledku – filtrace

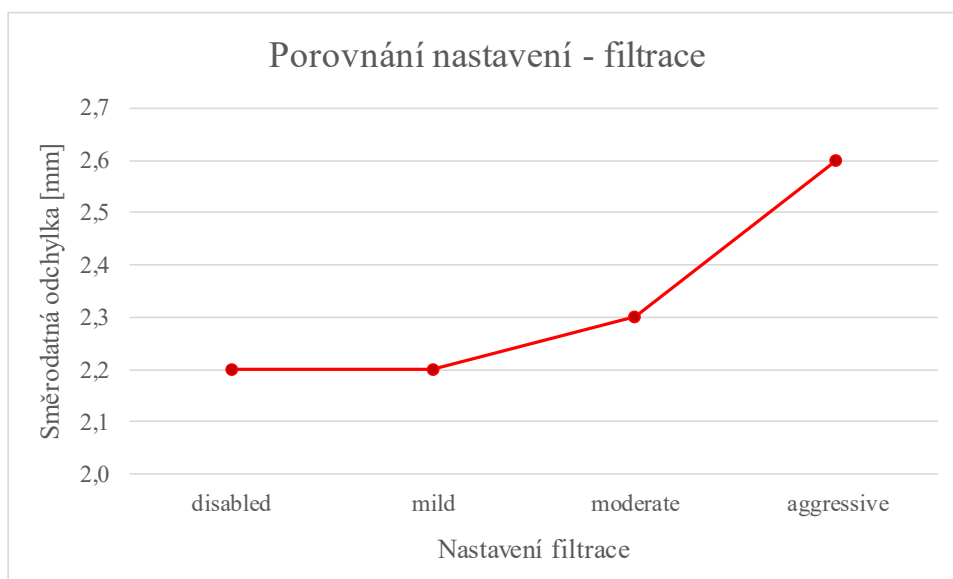
Jako první testování konkrétního nastavení zpracovatelského SW na přesnost výsledku je testován filtrační proces. Filtrační proces ovlivňuje tvorbu výsledného hustého mračna. Zde se chceme podívat, jestli se při procesu filtrace odlehlých bodů neodfiltrují body, které by mohly mít větší vliv na výsledek. Jak již bylo zmíněno v kapitole 4.3.2 **Zpracování v Agisoft PhotoScan**, lze nastavit možnosti *Aggressive*, *Moderate*, *Mild* a *Disabled*. Pro každou zmíněnou možnost bylo vypočteno mračno bodů. Výpočet byl proveden se všemi snímky (255) na kvalitu *high* a počet vlíčovacích bodů byl 45.

Pro tento případ byla porovnána vypočtená mračna, s mračnem získaným pomocí laserového skeneru Leica ScanStation P40, jelikož nelze říci, které z vypočtených mračen metodou SfM je nejlepší a ke kterému by se měla porovnání vztahovat.

V tabulce 5 jsou uvedeny průměrné vzdálenosti a směrodatné odchylky získané při porovnání. Výsledky se liší pouze v desetínách milimetru. Na grafu můžeme vidět, že s vyšší filtrací bodů se snižuje systematický posun, ale naopak se zvyšuje směrodatná odchylka (Obr. 59). Při pohledu na vizualizované vzdálenosti mezi mračny jednotlivých porovnání nejsou vidět větší rozdíly mezi sebou (Obr. 72, Obr. 73, Obr. 74 a Obr. 75). Stupnice odchylek jsou pro všechny varianty zvoleny od -5 mm do 5 mm. Porovnání mezi laserovým skenerem a UAV je již popsán v předchozí kapitole, v následujících odstavcích se budeme soustředit na rozdíl vypočtených mračen mezi sebou.

Tabulka 5: Statistické parametry při porovnání nastavení – filtrace

Porovnaná mračna	Průměrná vzdálenost v ose Z \bar{x}	Směrodatná odchylka s
P40 - disabled	-0,5 mm	2,2 mm
P40 - mild	-0,5 mm	2,2 mm
P40 - moderate	-0,3 mm	2,3 mm
P40 - aggressive	-0,2 mm	2,6 mm



Obr. 59: Graf vývoje směrodatné odchylky v závislosti na změně filtrace

Při pohledu na mračno získané při vypnuté filtraci *Disable* nejsou filtrované body a výsledné mračno je s větší mírou šumu v oblastech, ve kterých objekty zakrývají okolní místo, jako například oblast mezi domky nebo jejich okolí. *Mild* odfiltruje malé množství bodů, například odlehlé body, které se nacházejí mimo model, ale u přesnosti oproti *Disable* není žádný rozdíl. V dalších variantách už je očividná filtrace více bodů a na obrázcích jsou uvedeny příklady, ve kterých můžeme pozorovat změny.

Prvním příkladem je oválný objekt, který je na obrázek 60 - 62. Zde je vidět že ve variantách *Disabled* a *Mild* není větších změn. Oválný objekt není sice celistvý, ale je patrný vrchní okraj a mírný šum. U *Moderate* a *Aggressive* je vidět, že body jsou odfiltrovány ve větší úrovni. U *Aggressive* je zřetelný objekt, ale vrchní okraj už zjevný není.



Obr. 60: Disabled



Obr. 61: Mild

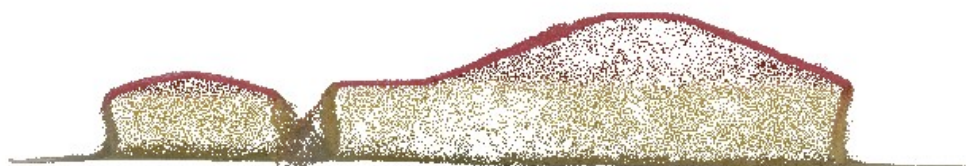


Obr. 62: Moderate

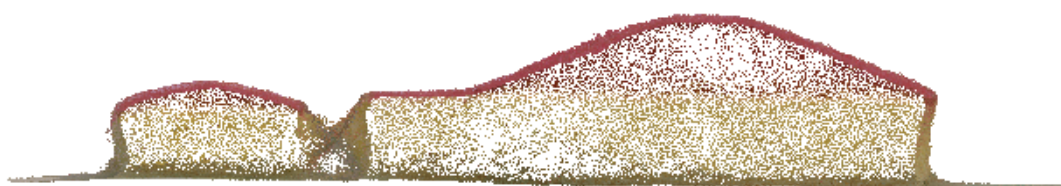


Obr. 63: Aggressive

Dalším případem je oblast mezi objekty. Jak je popsáno v kapitole **1.2.1 Princip metody SfM**, při modelování hustého mračna se iterativně tvoří noví sousedé neboli plošky k již existujícím patch, dokud nepokrývají viditelný povrch. V této části dochází k výraznému zhuštění patch a následně jsou odfiltrovány body, které leží mimo skutečný povrch a všechny body, které jsou uvnitř aktuálního 3D modelu. Na obrázku 64, kde byla filtrace vypnuta, je viditelných pár bodů pod budovou, ty už na ostatních obrázcích patrně nejsou. Naopak prostor mezi budovami je nejlépe vymodelovaný právě pomocí *Disabled*, ostatní možnosti jakoby zvedají povrch a snaží se ho vymodelovat tak, že spojuje budovy. U možnosti *Aggressive* (Obr. 67) je plocha terénu vymodelována jako spojení střech budov.



Obr. 64: Průřez budovami - Disabled



Obr. 65: Průřez budovami - Mild



Obr. 66: Průřez budovami - Moderate



Obr. 67: Průřez budovami - Aggressive

Na obrázcích 68-71 máme možnost vidět jak proces filtrování na objektu lávky, který je velkým detailem a také dochází k zakrytí místa pod lávkou. Při modelování tak v oblasti zábradlí nebo zakrytých místech vzniká šum. Při postupné filtraci je viditelné

jakoby zúžení šířky lávky, vzniklé právě odfiltrováním bodů po okrajích. U možnosti *Aggressive* dokonce dojde k takové míře filtrace, že chybí části lávky.



Obr. 68: Lávka - disabled



Obr. 69: Lávka - mild



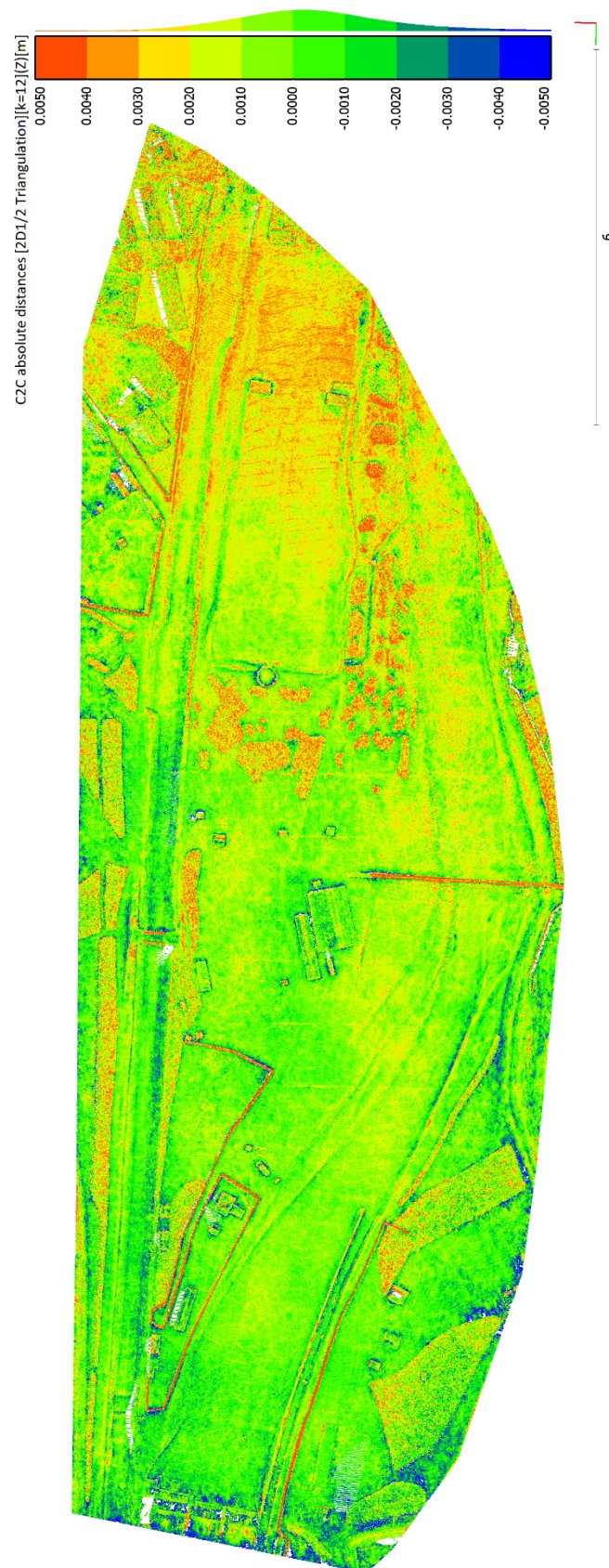
Obr. 70: Lávka - moderate



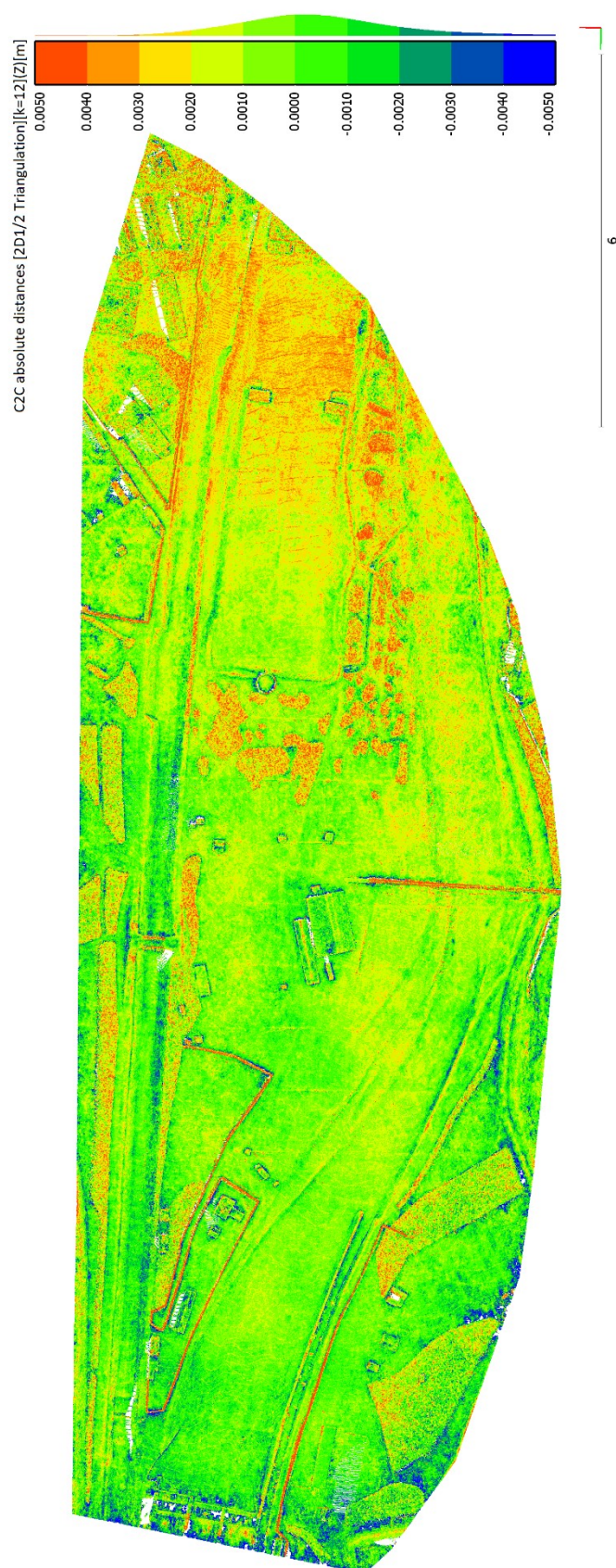
Obr. 71: Lávka - aggressive

Závěr:

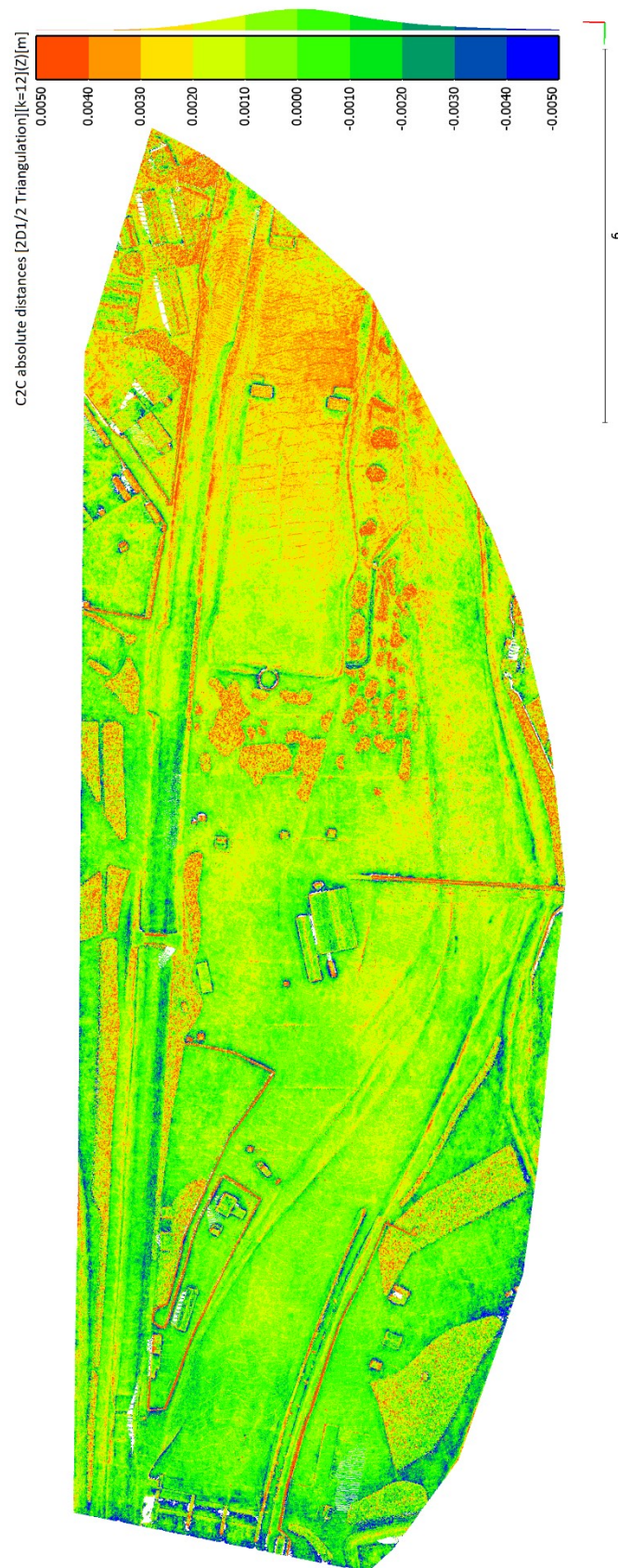
Z testování nastavení možností filtrace na tomto modelu lze říci, že nastavení filtrace má vliv na přesnost výsledku. Z globálního hlediska, tedy výpočtu statistických parametrů, je tento vliv v řádu desetin milimetru. Při porovnání jednotlivých částí je ale vidět, že u filtrace *Moderate* a *Aggressive* dochází k odfiltrování některých bodů, které mají vliv na výsledné mračno bodů. Nejlepšími variantami jsou tedy *Disabled* a *Mild* i přes některá problémová místa jsou takto získaná mračna nejpodrobnější.



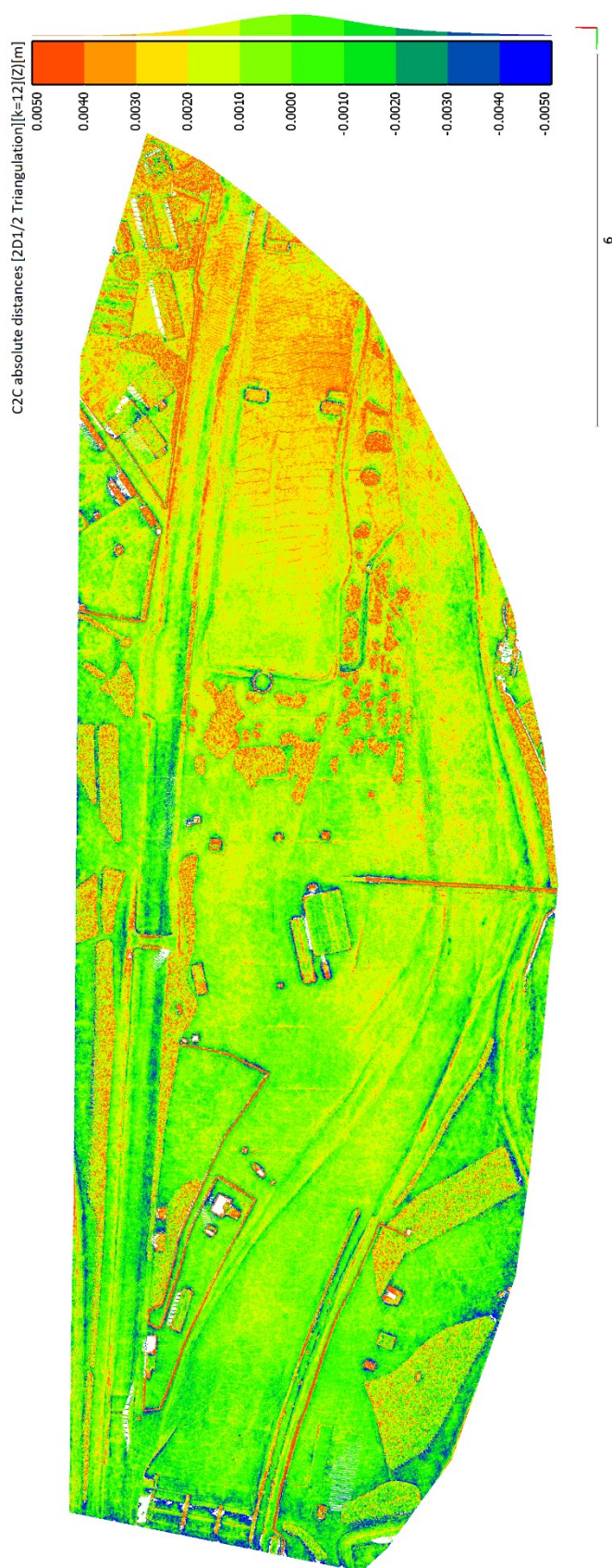
Obr. 72: Porovnání UAV high (disabled) – Leica ScanStation P40
Průměrná vzdálenost = **-0,5 mm**; směrodatná odchylka = **2,2 mm**



Obr. 73: Porovnání UAV high (mild) - Leica ScanStation P40
Průměrná vzdálenost = **-0,5 mm**; směrodatná odchylka = **2,2 mm**



Obr. 74: Porovnání UAV high (moderate) - Leica ScanStation P40
Průměrná vzdálenost = **-0,3 mm**; směrodatná odchylka = **2,3 mm**



Obr. 75: Porovnání UAV high (aggressive) - Leica ScanStation P40
Průměrná vzdálenost = **-0,2 mm**; směrodatná odchylka = **2,6 mm**

5.4 Zhodnocení vlivu uživatelského nastavení SW na přesnost výsledku – kvalita

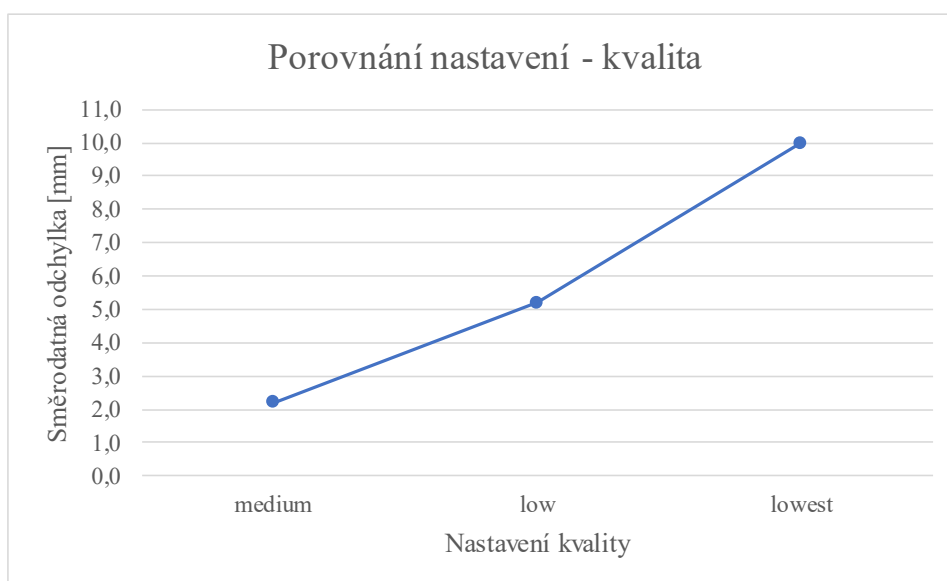
Další testování konkrétního nastavení zpracovatelského SW na přesnost výsledku je testováno nastavení kvality. Husté mračno je vytvořeno korelací ze snímků a kvalita ovlivňuje, s jakým rozlišením snímků bude proces tvorby uskutečněn. Lze nastavit možnosti *Ultra high*, *High*, *Medium*, *Low* a *Lowest*. Pro zmíněné možnosti, kromě možnosti *Ultra high*, která je velmi náročná na výpočetní výkon počítače, byly vypočteny mračna bodů. Výpočet byl proveden se všemi snímky (255), počet vlíčovacích bodů byl 45 a pro získání co nejpodrobnějších dat byla vypnuta filtrace.

Pro tento případ byla porovnána vypočtená mračna s mračnem získaným na kvalitu *high*, jelikož chceme zjistit jaký rozdíl nastane při vypočtení mračen s nižší kvalitou vůči mračnu vypočteného na námi zvolenou nejlepší kvalitu.

V tabulce 6 jsou uvedeny průměrné vzdálenosti a směrodatné odchylky dosažené při porovnání. Výsledky se zde liší ve větší míře, než tomu bylo v předchozím porovnání. Vliv na průměrnou vzdálenost v ose Z zde není znatelný a průměrná vzdálenost se pohybuje kolem -0,2 mm. Směrodatná odchylka se zvyšuje se snižující se kvalitou nastavení (Obr. 76). Na obrázcích 93, 94 a 95 jsou vizualizované odchylky jednotlivých porovnání. Stupnice odchylek je pro každou variantu uzpůsobena tak, aby bylo zahrnuto co nejvíce bodů a nevznikala prázdná místa.

Tabulka 6: Statistické parametry při porovnání nastavení – kvalita

Porovnaná mračna	Průměrná vzdálenost v ose Z \bar{x}	Směrodatná odchylka s
High – medium	-0,2 mm	2,2 mm
High – low	-0,1 mm	5,2 mm
High – lowest	-0,3 mm	10,0 mm



Obr. 76: Graf vývoje směrodatné odchylky v závislosti na změně kvality

Na porovnáních je možné vidět, že kritická místa s vyššími odchylkami jsou stejná, avšak rozdílné jsou intervaly vzdáleností, zatímco u porovnání s *medium* je stupnice od -5 mm do 5 mm, u *low* je to od -20 mm do 20 mm a u *lowest* od -25 mm do 25 mm. Mezi místa s velkými odchylkami patří prostor kolem budov. Je to způsobené tím, že se snižující se kvalitou je odlišné modelování budov. Nejlépe vymodelovaná budova je pomocí kvality *high* (Obr. 77), při kvalitě *medium* (Obr. 77) je objekt vymodelován přibližně stejně jako tomu je u *high*, ale již se začíná zaoblovat. U kvality *low* (Obr. 79) je objekt zjednodušený natolik, že má velmi plynulý přechod budovy s terénem. U nejhůrší kvality *lowest* (Obr. 79) je budova vymodelovaná jako jakási vyvýšenina. S tímto zjednodušením je také viditelný rozdíl ve výšce budovy, který můžeme vidět na vizualizovaných odchylkách. Na vrcholcích střech je modrá barva, a tedy záporné hodnoty – výška objektu při kvalitě *high* je vyšší, než je tomu u ostatních kvalit. Zjednodušení v modelování lze vidět i na obrázcích 81-84. Za těmito budovami se nachází malá budova a při výpočtu zjednodušených modelů dojde k tomu, že se budovy spojí.

Terén je se zhoršující se kvalitou více vyhlazený, proto můžeme vidět například v oblasti vodního koryta maximální vzdálenosti jak kladné, tak záporné. Hrany a dno vodního koryta jsou vymodelovány nejlépe u kvality *high* a kopírují lépe skutečný tvar (Obr. 85). Se snižující se kvalitou je model více vyhlazený a není takový rozdíl mezi výškou hrany a dnem (Obr. 86-88), proto se v horních hranách nachází záporné hodnoty a ve středu koryta jsou naopak hodnoty kladné.



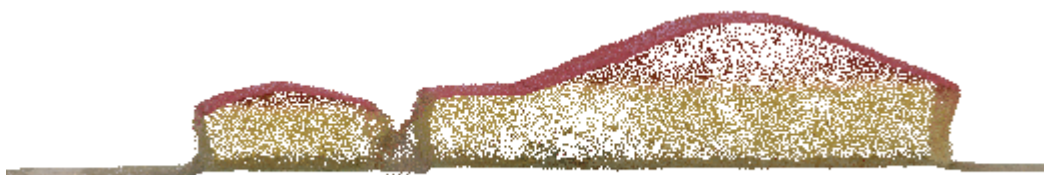
Obr. 77: Pohled na boční stranu budovy – high

Obr. 78: Pohled na boční stranu budovy - medium

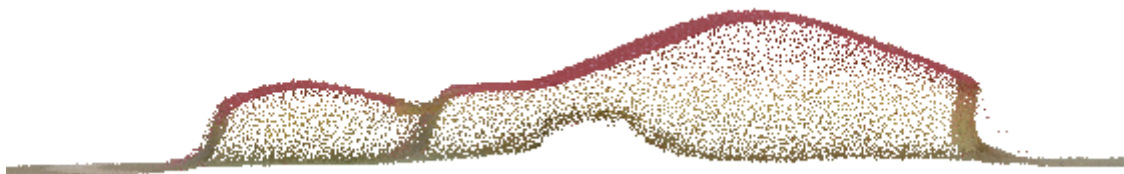


Obr. 79: Pohled na boční stranu budovy – low

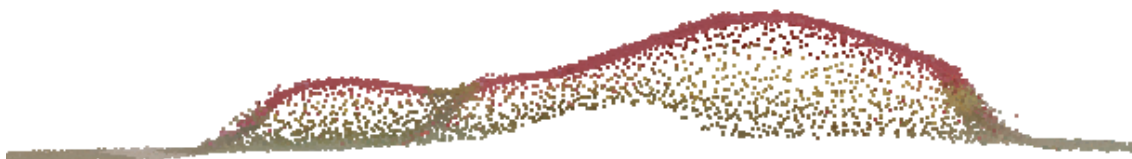
Obr. 80: Pohled na boční stranu budovy - lowest



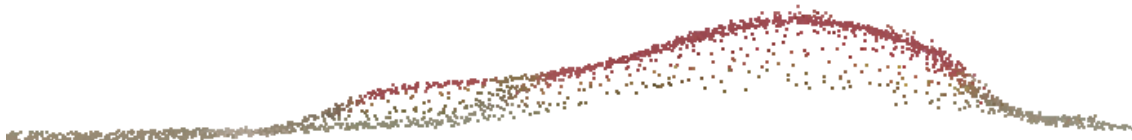
Obr. 81: Průřez budov - high



Obr. 82: Průřez budov - medium



Obr. 83: Průřez budov - low



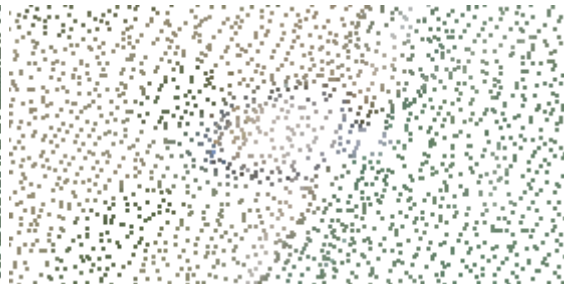
Obr. 84: Průřez budov – lowest

*Obr. 85: Průřez vodním korytem – high**Obr. 86: Průřez vodním korytem - medium**Obr. 87: Průřez vodním korytem - low**Obr. 88: Průřez vodním korytem - lowest*

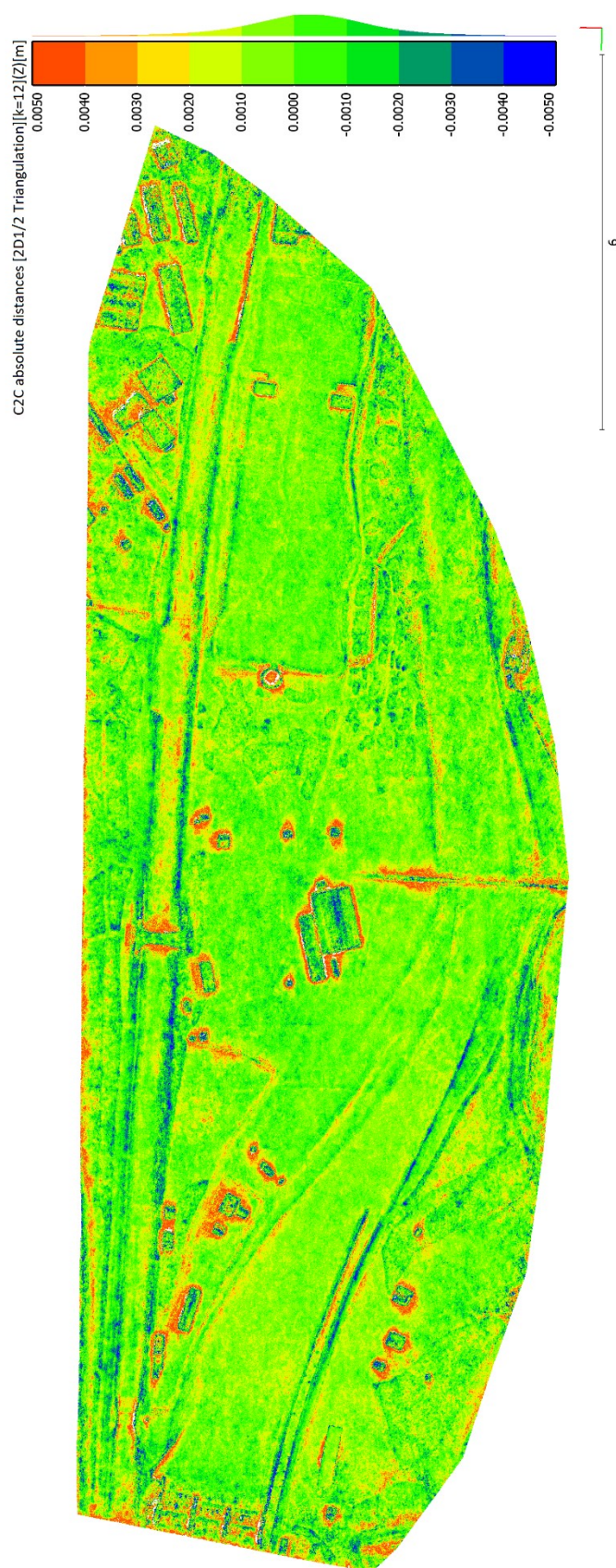
U mračen lze pozorovat rozdíl i v počtu bodů tvořících husté mračno. Přesné hodnoty u jednotlivých možností kvality jsou rozepsány v tabulce 7. Tato vlastnost má za následek horší vykreslení objektů. Na obrázcích 89-91 lze sledovat vykreslení oválného objektu. Jednotlivé výstřižky objektu jsou získány za stejného přiblížení pod stejným úhlem. Zatímco u kvality *high* poměrně dobře kopíruje tvar, ostatní možnosti jsou už zjednodušené s menším počtem bodů, který nevystihuje objekt.

Tabulka 7: Počet bodů v hustém mračnu

Mračno	Počet bodů
High	24 012 653
Medium	5 418 083
Low	1 119 522
Lowest	267 624

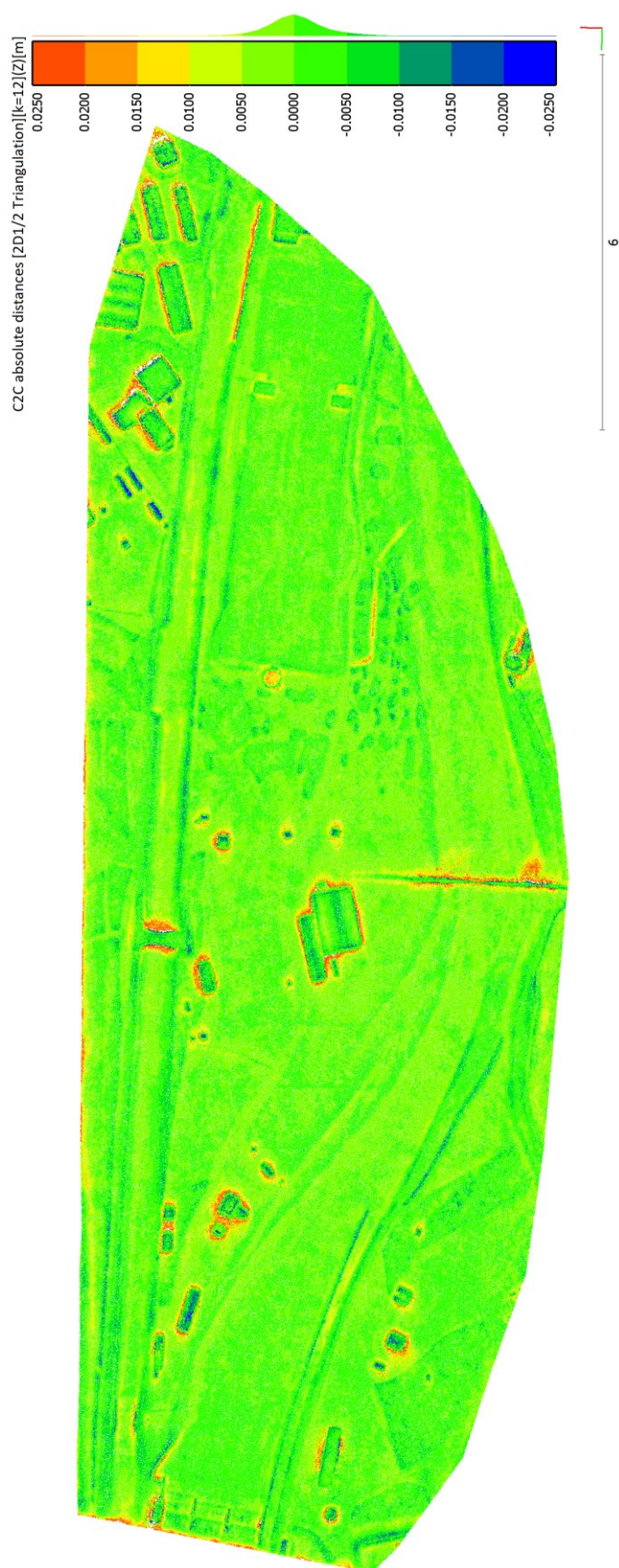
Obr. 89: *Oválný objekt – high*Obr. 90: *Oválný objekt - medium*Obr. 91: *Oválný objekt – low*Obr. 92: *Oválný objekt – lowest***Závěr:**

Na základě tohoto testování lze říci, že možnosti nastavení kvality mají zásadní vliv na přesnost výsledku. Nastavení kvality *High* je nejvíce podobný skutečné realitě. Nevýhodou je, že se jedná o mračno s velkým počtem bodů. Kompromisem může být nastavení *Medium*, odchylky se zde vyskytovaly v rozmezí od -5 mm do 5 mm a míra zjednodušení není tak zásadní. Ostatní možnosti jsou považovány jako nevhodné pro tento model, vhodné by byly například pro rovinná území, kde není potřeba taková hustota bodů a zachycení detailu.



Obr. 93: Porovnání UAV high– UAV medium

Průměrná vzdálenost = -0,2 mm; směrodatná odchylka = 2,2 mm



Obr. 94: Porovnání UAV high – UAV low

Průměrná vzdálenost = -0,1 mm; směrodatná odchylka = 5,2 mm



Obr. 95: Porovnání UAV high – UAV lowest

Průměrná vzdálenost = -0,3 mm; směrodatná odchylka = 10,0 mm

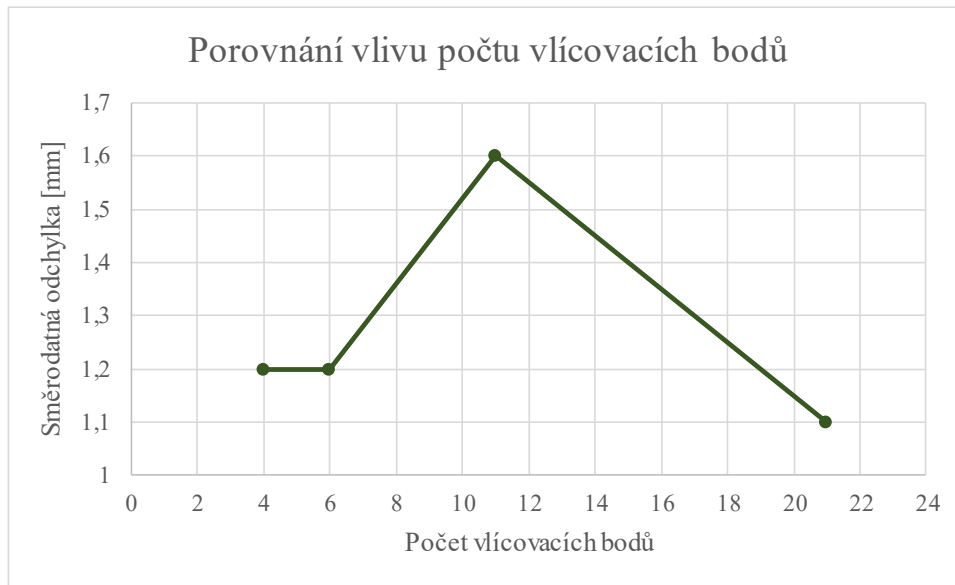
5.5 Zhodnocení vlivu počtu vlíčovacích bodů na přesnost výsledku

Další hodnocený vliv na přesnost výsledku je počet vlíčovacích bodů. Vlícovací body slouží k určení orientace, k transformaci do geodetického systému a k určení měřítka objektu. Zde se podíváme na to, jaký má vliv snižující se počet bodů oproti základnímu modelu, u kterého bylo při výpočtu použito 45 vlíčovacích bodů. Porovnávaná mračna vznikala vždy s polovičním počtem vlíčovacích bodů (21, 11, 6 a 4 vlíčovací body), tak aby body byly rozmístěny rovnoměrně na modelu. Výpočet modelů byl proveden se všemi snímky z UAV (255) na kvalitu *high* a pro získání co nejpodrobnějších dat byla filtrace vypnuta (*disabled*).

V tabulce 8 jsou uvedeny průměrné vzdálenosti a směrodatné odchylky dosažené při porovnání. Výsledky se zde téměř neliší. U průměrné vzdálenosti je rozdíl mezi největší a nejmenší vzdáleností 0,4 mm, a tedy je tento vliv zanedbatelný. Směrodatná odchylka se ve všech případech pohybuje kolem 1,2 mm (Obr. 96). Výrazněji se liší pouze mračno bodů, kde bylo použito 11 vlíčovacích bodů, zde je směrodatná odchylka 1,6 mm. Z globálního pohledu zde výraznější vliv není.

Tabulka 8: Statistické parametry při porovnání vlivu použitých vlíčovacích bodů

Porovnaná mračna (počet vlíčovacích bodů)	Průměrná vzdálenost v ose Z \bar{x}	Směrodatná odchylka s
45–21	-0,1 mm	1,1 mm
45–11	-0,3 mm	1,6 mm
45–6	-0,3 mm	1,2 mm
45–4	-0,5 mm	1,2 mm

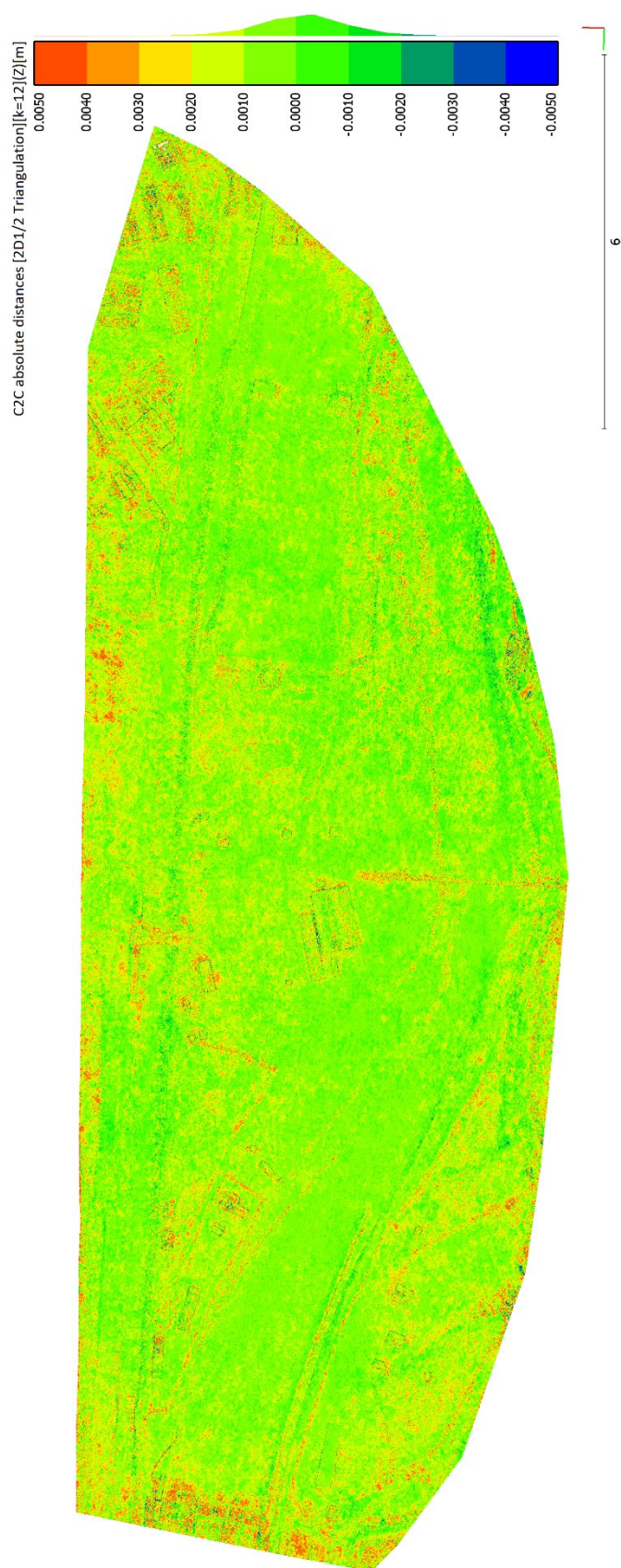


Obr. 96: Graf vývoje směrodatné odchylky v závislosti na počtu vřícovacích bodů

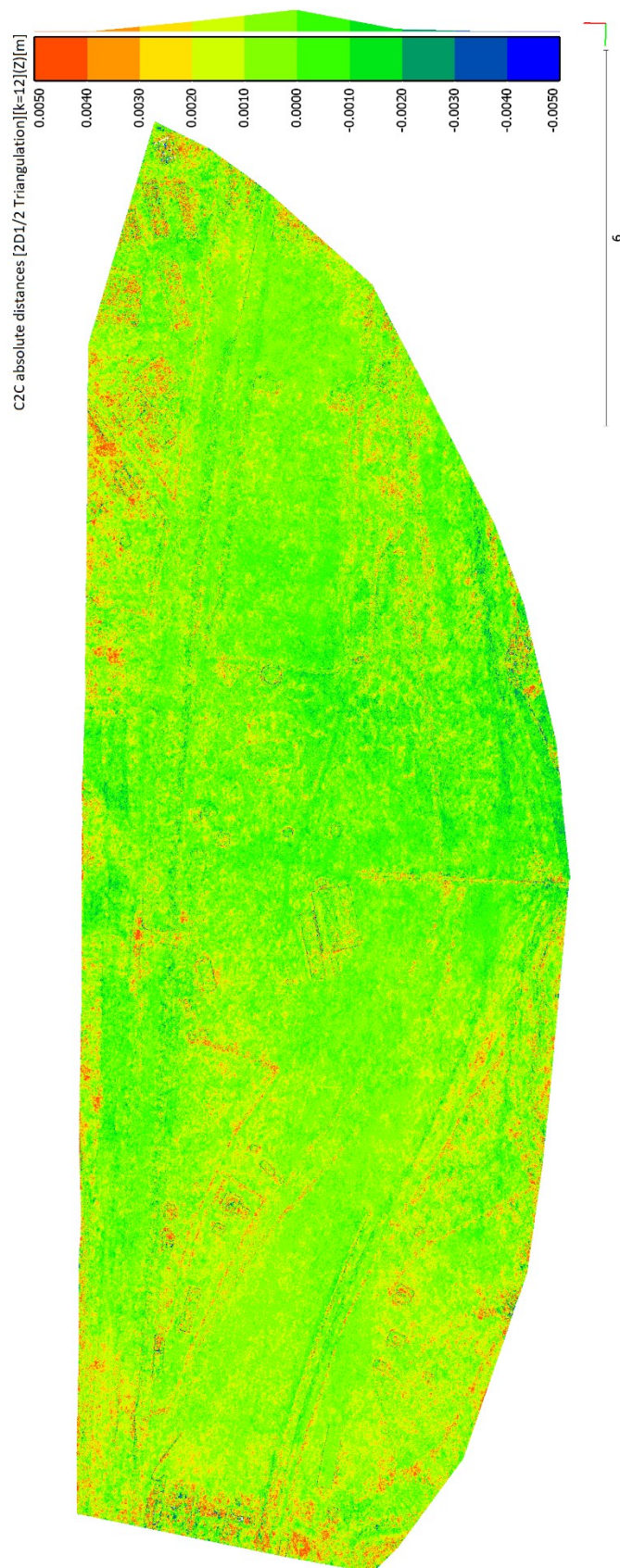
Na obrázcích 97, 98, 99 a 100 jsou jednotlivá porovnání s barevně zobrazenými odchylkami. Stupnice odchylek je zde u všech případů v intervalu od -5 mm do 5 mm a při pohledu na křivku četnosti odchylek je viditelné, že se jich většina nachází v intervalu od -2 mm do 2 mm. V zobrazených porovnáních je vidět, že se maximální odchylky nachází stále na stejných místech, a to v místech ostrých hran, okolí budov, plotu a v oblasti umělé trávy. Při pohledu není mezi jednotlivými porovnáními velký rozdíl jako tomu bylo v předešlých případech, například u testování kvality. Vřícovací body vstupují do výpočtu při svazkovém vyrovnání tedy v posledním kroku před tvorbou mračna metodou obrazové korelace. Počet bodů při výpočtu svazkového vyrovnání ovlivní neznámé prvky vnější a vnitřní orientace ovšem na výsledný tvar modelu je vliv minimální.

Závěr:

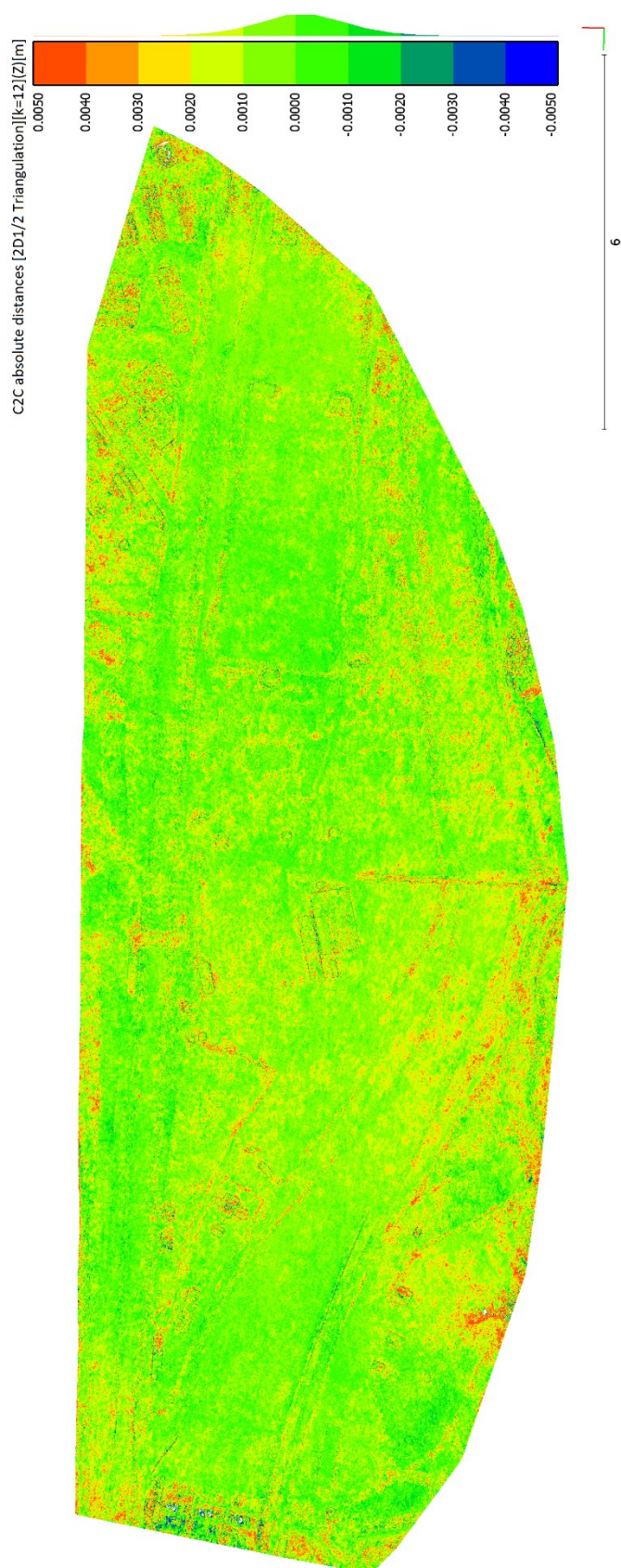
Při tomto testování tedy není prokázán velký vliv počtu bodů na přesnost výsledného modelu. Pro tento případ je dostačující použití čtyř vřícovacích bodů. Pro případ kontroly je ovšem vhodné použít nadbytečný počet bodů a přesnost výsledného modelu nebude ovlivněna. Body je nejlépe umístit rovnoměrně na území.



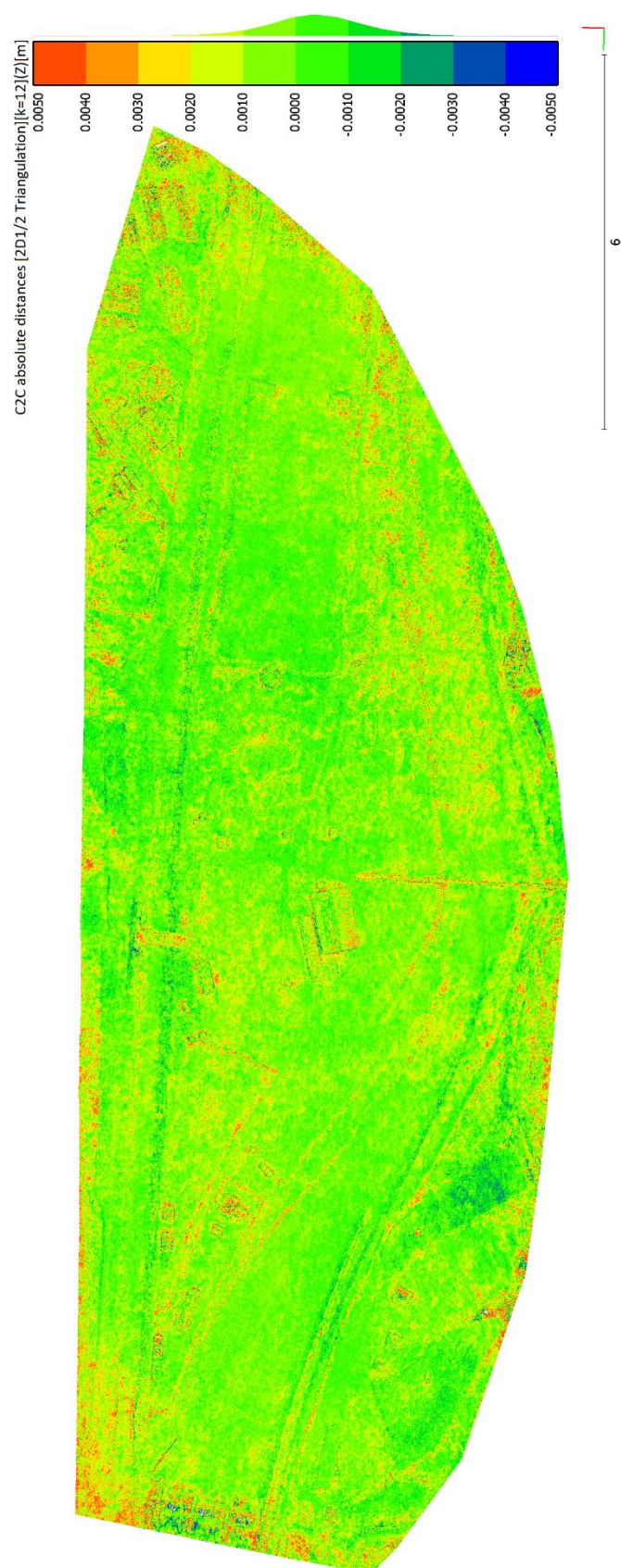
Obr. 97: Porovnání UAV 45 vříc. bodů – UAV 21 vříc. bodů
Průměrná vzdálenost = -0,1 mm; směrodatná odchylka = 1,1 mm



Obr. 98: Porovnání UAV 45 vlíc. bodů – UAV 11 vlíc. bodů
Průměrná vzdálenost = **-0,3 mm**; směrodatná odchylka = **1,6 mm**



Obr. 99: Porovnání UAV 45 vlić. bodů – UAV 6 vlić. bodů
Průměrná vzdálenost = **-0,3 mm**; směrodatná odchylka = **1,2 mm**



Obr. 100: Porovnání UAV 45 vlíc. bodů – UAV 4 vlíc. bodů
Průměrná vzdálenost = -0,5 mm; směrodatná odchylka = 1,2 mm

5.6 Zhodnocení vlivu konfigurace a počtu snímků na přesnost

Poslední hodnocený vliv na přesnost výsledku je konfigurace a počet snímků. Snímky byly pořízeny ve dvou výškových úrovních s téměř vodorovnou osou záběru. Dále byly pořízeny snímky v nižší výškové úrovni ve dvou šikmých směrech. Nejprve byl celkový soubor snímků rozdělen na dolní a horní let. Poté byly z dolního souboru snímků postupně odebírány snímky se šikmou osou záběru. Jelikož z předchozího testování vlivu počtu vlíčovacích bodů na přesnost vzešel závěr, že počet čtyř bodů je dostačující, byla tedy tato konfigurace pro následující výpočet použita. Celkem jsou tedy vypočteny čtyři mračna, která se budou porovnávat s námi zvoleným nejlepším mračnem, které je stejné jako v předešlých porovnáních, tedy získaným ze všech snímků (255) a při použití 45 vlíčovacích bodů. Přehled počtu použitých snímků včetně konkrétního nastavení při výpočtu mračen je uveden v tabulce 9.

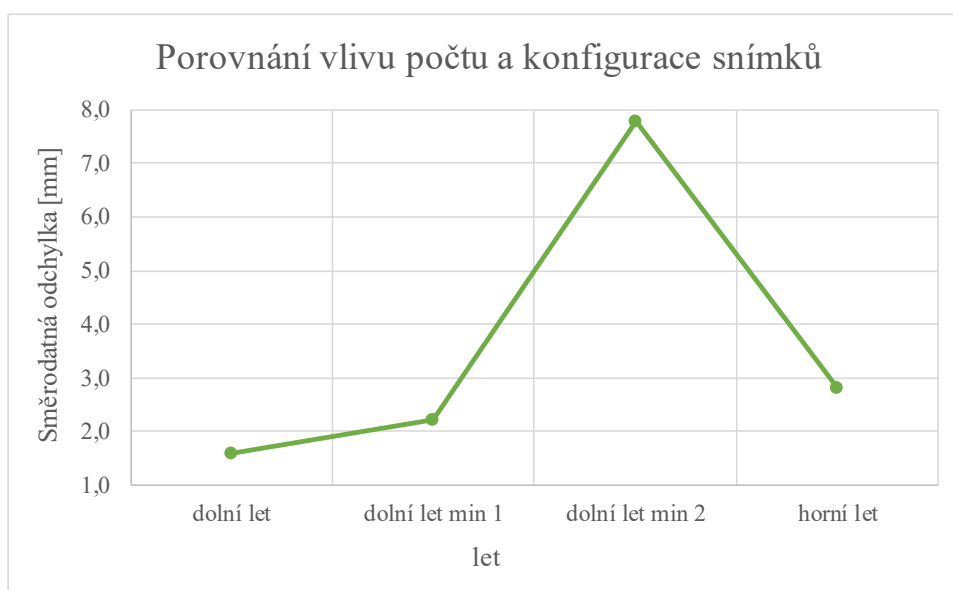
Tabulka 9: Přehled nastavení při výpočtu mračna bodů

Konfigurace	Počet vl. bodů	Počet snímků	Align Photos	Build Dense Cloud	
			Accuracy	Quality	Depth filtering
Vše	45	255	high	high	disabled
Dolní let	4	162	high	high	disabled
Dolní let - 1. šikmá řada	4	108	high	high	disabled
Dolní let - 2. šikmá řada	4	68	high	high	disabled
Horní let	4	93	high	high	disabled

V tomto porovnání se chceme podívat na to, jaký vliv má změna konfigurace a snižující se počet snímků na přesnost oproti modelu, který vznikl ze souboru všech snímků a vlíčovacích bodů. V tabulce 10 jsou uvedeny průměrné vzdálenosti v ose Z a směrodatné odchylky dosažené při porovnání. V grafu (Obr. 101) je vyneseno vývoje směrodatných odchylek se změnou konfigurace a počtu snímků.

Tabulka 10: Statistické parametry při porovnání vlivu konfigurace a počtu snímků

Porovnaná mračna (let)	Průměrná vzdálenost v ose Z \bar{x}	Směrodatná odchylka s
Vše – dolní let	-0,4 mm	1,6 mm
Vše – dolní let_min1	0,2 mm	2,2 mm
Vše – dolní let_min2	11,5 mm	7,8 mm
Vše – horní let	0,9 mm	2,8 mm



Obr. 101: Graf vývoje směrodatné odchylky v závislosti na konfiguraci a počtu snímků

Pokud se podíváme na obrázek 111 je zde zjevné, že pokud odebereme z celkového souboru snímků horní let, tedy 1/3 z celkového souboru, lze pozorovat pohyb vzdáleností od referenčního mračna především v rozmezí -3 mm až 3 mm. Dále jsou zde vidět červené oblasti především uprostřed modelu.

Pokud z dolního mračna odebereme jeden šikmý nálet, přesnost se zhorší o 0,5 mm od předchozího případu. Můžeme také pozorovat, že průměrná vzdálenost se změnila ze záporného čísla na kladné. Na modelu je znatelněji více kladných vzdáleností (Obr. 112). V oblasti vpravo dole je vidět oblast, kde se objevují maximální kladné i záporné hodnoty. V této oblasti bylo méně překrývajících snímků, než je tomu v ostatních místech a tato místa nejsou vytvořena s takovou hustotou. Informace o překrývajících snímcích je uvedena v reportu, který je vyhotoven pro každé vygenerované mračno a je uveden v digitální příloze.

Po odebrání i druhého šikmého náletu je průměrná vzdálenost v ose Z 11,5 mm. Za tento systematický posun může fakt, že po odebrání snímků v nižším náletu není dosaženo takového překrytu snímků. Směrodatná odchylka se výrazně změnila a dosahuje hodnoty 7,8 mm. Při pohledu na vizualizované odchylky (Obr. 113) můžeme vidět, že se pohybují v intervalu od -5 mm do 25 mm. Velikost vzdáleností se zvyšuje od stran do středu modelu. Uprostřed už vzdálenosti dosahují maximální hodnoty tedy 25 mm. Toto mračno je v porovnání s referenčním vypouklé.

Poslední porovnané mračno bylo vypočteno ze snímků z horního náletu, kde jsou snímky pořízené se svislou osou záběru. Průměrná vzdálenost se zde pohybuje kolem 1 milimetru, přesná hodnota je 0,9 mm. Směrodatná odchylka v tomto porovnání je 2,8 mm. Při pohledu na obrázku 114 lze vidět, že odchylky se pohybují nejvíce v intervalu od -3,5 mm do 4 mm. Nejvyšší odchylky se vyskytují opět ve střední části modelu a po okrajích.

Na obrázcích níže jsou uvedeny detaily objektů, nacházejících se na modelu, u kterých můžeme pozorovat vliv počtu snímků na vymodelovaném mračnu. Se snižujícím se počtem snímků v dolním letu je vidět, že se snižuje i počet bodů na bocích a zvyšuje se šum. V mračnu získaném z horního letu je vidět menší množství bodů, ale celkově je model vykreslen dobře i přes menší výskyt šumu.



Obr. 102: Mračno - všechny snímky



Obr. 103: Mračno - dolní let



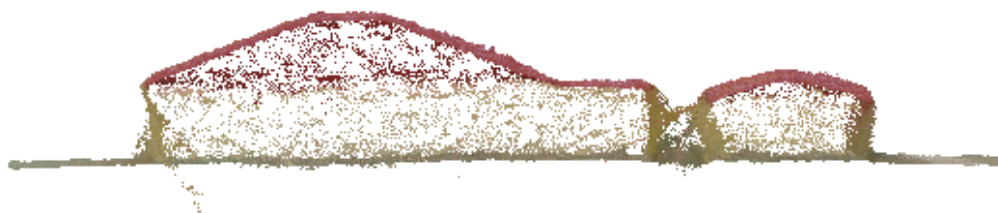
Obr. 104: Pohled na mračno - dolní let min 1



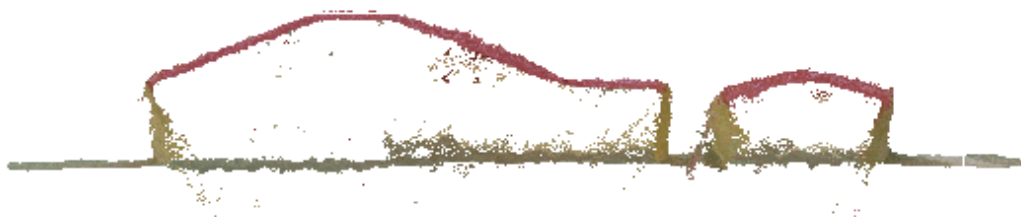
Obr. 105: Mračno - dolní let min 2



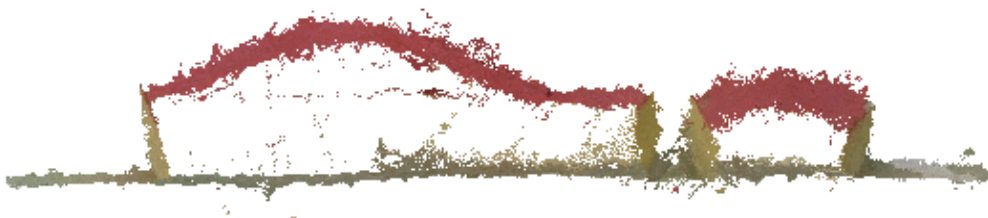
Obr. 106: Mračno - horní let



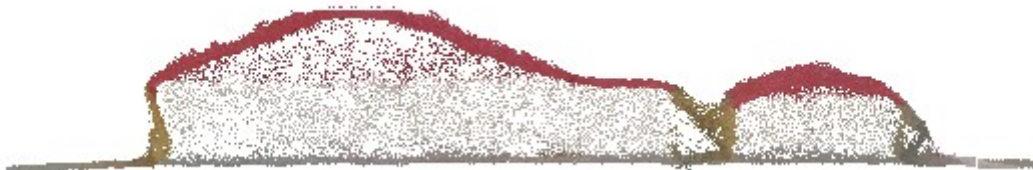
Obr. 107: Průřez objektu na modelu – dolní let



Obr. 108: Průřez objektu na modelu - dolní let bez 1. šikmého náletu



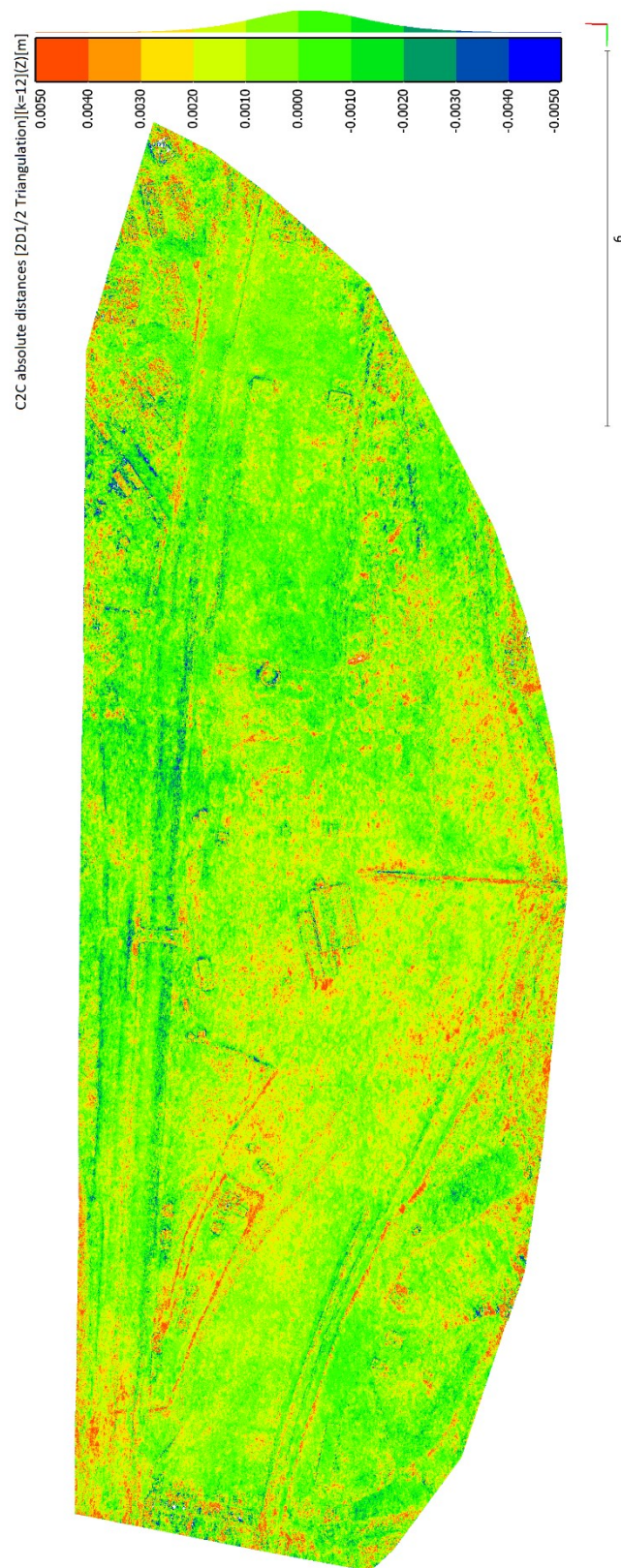
Obr. 109: Průřez objektu na modelu - dolní let bez 2. šikmého náletu



Obr. 110: Průřez objektu na modelu - horní let

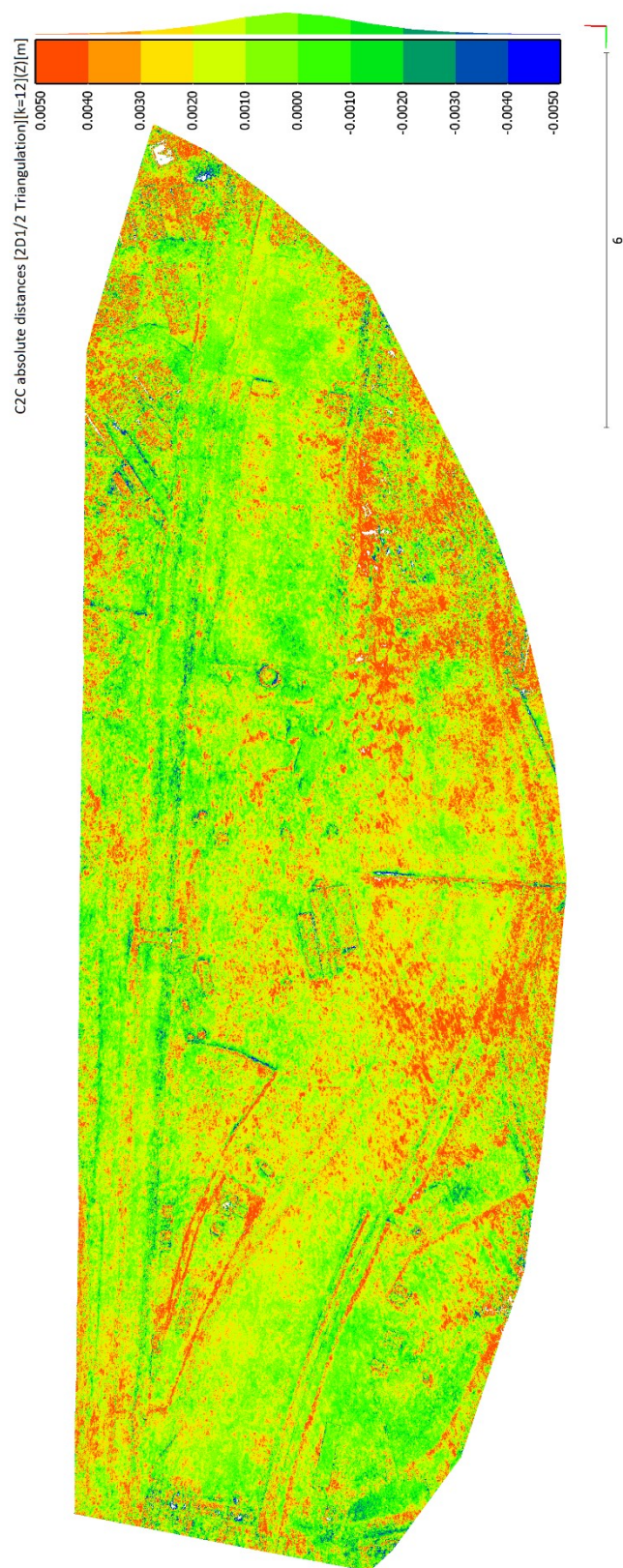
**Závěr:**

Počet snímků neboli především počet překrývajících snímků má na tvorbu mračna velký vliv. V oblastech, ve kterých se překrývá méně snímků, dochází k tvorbě šumu. Pokud je volena nízká výška letu je dobré zahrnout i šikmé lety, které mají vliv například na tvorbu bočních stěn objektů a zajistí nám lepší a podrobnější model. Při horním letu je potřeba snímků méně, což je logické z důvodu většího zorného pole. Přesnost kolem 3 mm u horního letu je dostačující, nevýhodou je ovšem dosažení menších detailů, než je tomu u letů v nižší výšce.

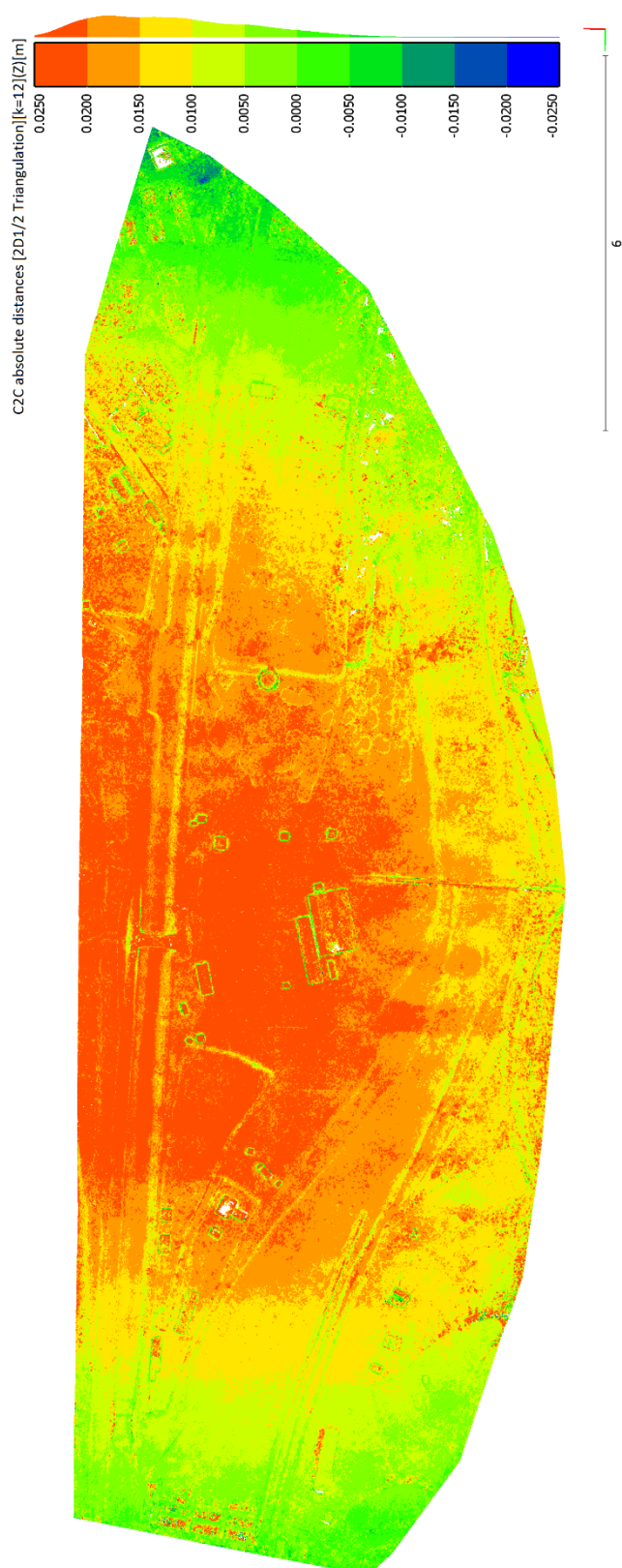


Obr. 111: Porovnání UAV všechny snímky (45 vříc. bodů; 255 snímků) – UAV dolní let (4 vříc. bodů; 162 snímků)

Průměrná vzdálenost = -0,4 mm; směrodatná odchylka = 1,6 mm

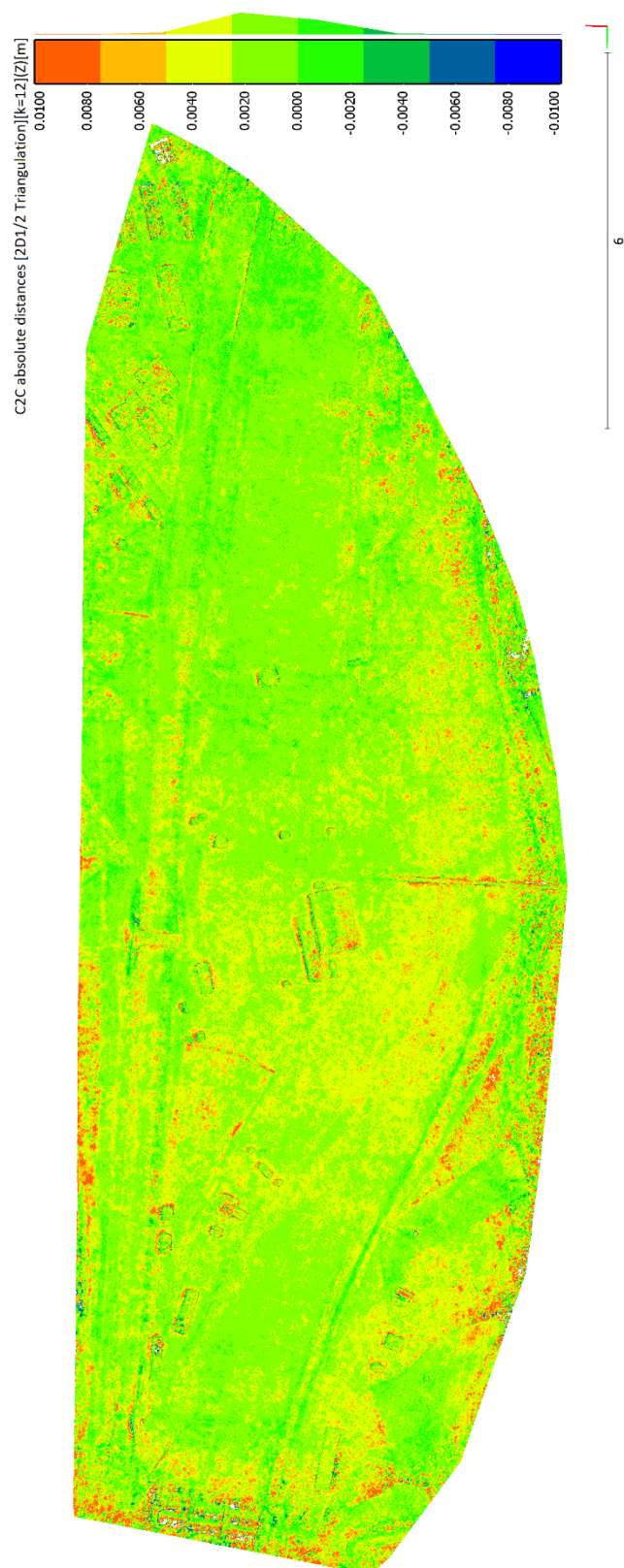


Obr. 112: Porovnání UAV všechny snímky (45 vlíc. bodů; 255 snímků) – UAV dolní let minus 1. šikmá řada (4 vlíc. bodů; 108 snímků)
Průměrná vzdálenost = 0,2 mm; směrodatná odchylka = 2,2 mm



Obr. 113: Porovnání UAV všechny snímky (45 vříc. bodů; 255 snímků) – UAV dolní let minus 2. šikmá řada (4 vříc. bodů; 68 snímků)

Průměrná vzdálenost = 11,5 mm; směrodatná odchylka = 7,8 mm



Obr. 114: Porovnání UAV všechny snímky (45 vlíc. bodů; 255 snímků) – UAV horní let (4 vlíc. bodů; 93 snímků)

Průměrná vzdálenost = 0,9 mm; směrodatná odchylka = 2,8 mm

Závěr

V této diplomové práci byla testována metoda SfM se zaměřením na zpracování snímků pořízených neměřickou komorou s využitím bezpilotních prostředků. Cílem bylo především získat informace o tom, jak přesný 3D model lze touto metodou vytvořit. Naše měření tedy neodpovídá standartnímu plošnému měření pomocí technologie UAV, výsledkem není ortofoto ani digitální model terénu, ale 3D mračno bodů. Jelikož jsme chtěli dosáhnout co nejpodrobnější vyhodnocení snímaného území, byly do snímkování zahrnuty i šikmé osy záběru a tím byl eliminován vznik zakrytých míst.

Předletová kalibrace neměřické kamery nebyla provedena. Snímky byly pořízeny neměřickou kamerou, u které může docházet ke změně vlastností v čase. Dále bylo provedeno velké množství snímků, ze kterých Agisoft PhotoScan provedl svou kalibraci přímo během výpočtu digitálního modelu. V diplomové práci Implementace metody Structure from Motion do UAV fotogrammetrie od Martina Šimíčka [26] bylo dokonce zjištěno, že program PhotoScan dosahuje lepších výsledků s hodnotami vlastní kalibrace. Kalibrační údaje pro jednotlivé výpočty jsou uvedeny ve zprávách, které jsou uvedeny v přílohách na DVD.

Pro testování metody SfM byl zvolen objekt vodohospodářského modelu ve Výzkumném ústavu vodohospodářském T. G. Masaryka, který byl nasnímán vestavěným fotoaparátem bezpilotního letounu DJI Spark. Takto získané snímky byly zpracovány softwarem Agisoft PhotoScan pro různé nastavení a konfigurace snímků nebo vlíčovacích bodů. Vyhotovená 3D mračna bodů byla porovnána v softwaru CloudCompare, kde byly zkoumány především rozdíly ve vertikálním směru tedy v ose Z. Na základě těchto porovnání byly stanoveny závěry. Porovnání bylo rozděleno do šesti částí.

V první části byly porovnány metody získání 3D mračna bodů. Jako první bylo porovnáno mračno bodů získané pomocí metody UAV s kontrolním souborem bodů zaměřených totální stanicí. Zde bylo dosaženo směrodatné odchylky 1,3 mm. Pro komplexnější zhodnocení bylo provedeno porovnání metody SfM s metodou laserového skenování. Pro tuto metodu bylo k dispozici měření dvou laserových skenerů. Prvním ze skenerů byl Leica ScanStation P40, se kterým bylo při porovnání dosaženo směrodatné odchylky 2,2 mm. Druhým byl skener Leica BLK360, se kterým byla dosažena

směrodatná odchylka 2,8 mm. Laserové skenování má oproti metodě SfM výhodu věrnějšího zachycení tvaru objektu. Největším problémem metody SfM jsou ostré hrany, které jsou v mračnu bodů zaoblené a v těchto místech vznikají největší odchylky. Ovšem ve volných plochách, kde je hladký a plynulý terén, bylo dosaženo odchylek pohybující se kolem 1 mm. Celkově bylo docíleno velmi příznivých výsledků pro metodu SfM. Ta má díky UAV výhodu v zachycení objektů nebo terénu těžko dostupných pro laserové skenování.

V druhé části byl proveden pokus srovnání 3D mračen získaných ze snímků z jiných fotoaparátů. Pro porovnání byl model nasnímán digitální zrcadlovkou Canon EOS 5D Mark II s objektivem Canon EF 40 mm f/2,8 STM a mobilním telefonem Samsung Galaxy S6. Při porovnání bylo zjištěno, že vliv na přesnost výsledku má především počet a detailnost pořízených snímků.

Dále byl testován vliv nastavení softwaru na přesnost výsledku. Jako první byl testován vliv filtračního procesu. Zde bylo zjištěno, že s vyšší mírou filtrace klesá i přesnost výsledku. Při výpočtu statistických parametrů je tento vliv minimální, ovšem při vizuálním porovnání jednotlivých částí mračen je vidět, že u větší míry filtrace dochází k odfiltrování některých bodů, které mají vliv na výsledné mračno bodů, zejména na hranách. Pro určení podrobného mračna s největší podrobností je tedy vhodné filtrace vypnout nebo použít volbu mild i přes možný šum.

Dalším hodnoceným nastavením bylo nastavení kvality. Zde byl potvrzen očekávaný předpoklad, že s nižší kvalitou klesá přesnost. Především je to způsobené mírou generalizace objektu. Při snížení kvality se vytváří menší množství bodů a při zjednodušování dochází k deformaci objektů. Pro členitá území je dobré použít kvalitu high, kompromisem je pak nastavení medium. Ostatní nastavení je vhodné pro rovinné území, kde není potřeba tak podrobných výsledků.

Předposlední předmět testování je vliv počtu vlíčovacích bodů na výsledek. V práci byla porovnána přesnost mračen vypočtených s různým počtem vlíčovacích bodů. Při porovnání nebyl potvrzen předpoklad, že s ubývajícím počtem těchto bodů klesá přesnost. Pro přesný výsledek je dostačující počet 4 vlíčovacích bodů, ovšem pro kontrolu je dobré volit vyšší počet rovnoměrně rozmístěný po terénu (nutný počet jsou 3 vlíčovací body).

Jako poslední byl testován vliv konfigurace a počtu snímků na přesnost výsledného modelu. Důležitý je zde především počet překrývajících se snímků. Pro fotogrametrii je standartní volba svislých os záběru, nicméně pro tvorbu podrobnějšího mračna je vhodné zahrnout i snímky pořízené se šikmou osou záběru, zejména pokud je volena nízká výška letu. Při volbě vyšší výšky letu není potřeba takové množství snímků, to ale znamená také menší množství vygenerovaných bodů. Zde je zejména důležitý požadavek na podrobnost výsledku.

Program Agisoft PhotoScan díky metodě SfM umožňuje zpracovat velké množství snímků najednou, a to poměrně jednoduše. Při porovnání metody SfM s kontrolními metodami bylo dosaženo výborných výsledků, na kterých má zásluhu především možnost krátké vzdálenosti mezi kamerou a zaměřeným objektem. Při zpracování metody SfM je vygenerováno velké množství bodů, a to znamená podrobný model díky snímkům, na nichž je možné rozeznat jednotlivé objekty zachycené ve scéně. Při této metodě je výhoda především v minimalizaci prací v terénu, přesnosti a poměrně dobré tvarové věrnosti zobrazeného terénu (objektu).

V neposlední řadě je výhoda metody SfM ve spojení s UAV především v nízkých nákladech na pořízení bezpilotního letounu s neměřickou kamerou a zpracovatelského softwaru ve spojení s velmi dobrou dosaženou přesností výsledků, zejména v porovnání s cenou vybavení pro 3D skenování.

Použitá literatura

- [1] PAVELKA, Karel. *Fotogrammetrie 1*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04249-6
- [2] BÖHM, Jozef. *Fotogrammetrie*, vydavatelství VŠB – TUO, Ostrava 2002.
- [3] Structure from Motion. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. 2018 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Structure_from_motion
- [4] Mach, Lukáš: SIFT: *Scale Invariant Feature Transform: Automatické nalezení korespondencí mezi dvojicí obrázků* [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://cgg.mff.cuni.cz/~pepca/ref/SIFT.pdf>
- [5] *3D Structure from 2D Motion* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www1.cs.columbia.edu/~jebara/htmlpapers/SFM/sfm.html>
- [6] *Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints* [online]. University of British Columbia, Vancouver, B.C., Canada, 2004 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/ijcv04.pdf>
- [7] *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X12004217>
- [8] ŠEDINA, Jaroslav. *Porovnání 3D skenovacích metod s mračnem bodů, vytvořeným obrazovou korelací v digitální fotogrammetrii*. Praha, 2012. Diplomová práce, ČVÚT, Fakulta stavební
- [9] *The UAV* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.theuav.com/>
- [10] *Drony všude nad námi* [online]. [cit. 2018-03-30]. <https://stavba.tzb-info.cz/14444-drony-vsude-nad-nami>
- [11] ŠTRONER, Martin. *Laserové skenování: Informace k přednáškám* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/LSK/>
- [12] *DJI Spark specifications* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.dji.com/spark/info#specs>

- [13] *UAV DJI Spark* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.robotworld.cz/dji-spark-alpine-white>
- [14] *Canon EOS 5D Mark II* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.fotoradce.cz/canon-eos-5d-mark-ii-1>
- [15] *Objektiv Canon EF 40 mm f/2,8 STM* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://www.megapixel.cz/>
- [16] *Samsung Galaxy S6* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <https://smartmania.cz/katalog/samsung-galaxy-s6/>
- [17] *Samsung Galaxy S6 – obrázek* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: https://www.kickmobiles.com/content/images/thumbs/0004538_samsung-galaxy-s6-sm-g920f-32gb-gold-platinum_420.jpeg
- [18] *Trimble S8 Total Station* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-390412/022543-410H_TrimbleS8_DS_0115_LR_sec.pdf
- [19] *Leica ScanStation P40 User Manual* [online]. [cit: 2.3.2018]. Dostupné z: <http://surveyequipment.com/assets/index/download/id/457/>
- [20] *Gefos ČR Leica ScanStation P40* [online]. [cit: 2.3.2018]. Dostupné z: <http://www.gefos-leica.cz/cz/leica/produktyl/202/scanstation-p30-p40-p50>
- [21] *Gefos ČR Leica BLK360* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné z: <http://www.gefos-leica.cz/cz/leica/produktyl/264/blk360>
- [22] *Skener Leica BLK360* [online]. [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: http://www.gefos-leica.cz/public/img/produkty_leica/cyrax/blk360/853811_leica_blk360_um_v1.0.0_en.pdf
- [23] URBAN, Rudolf. *Geodetické práce při měření posunů a deformací stavebních objektů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05786-5.
- [24] *Agisoft PhotoScan User Manual: Standard Edition, Version 1.2* [online]. 2016 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan_1_2_en.pdf



[25] *CloudCompare: User documentation* [online]. [cit. 2018-04-05]. Dostupné z:
<http://www.danielgm.net/cc/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>

[26] ŠIMÍČEK, Martin. *Implementace metody Structure from Motion do UAV fotogrammetrie*. Olomouc, 2014. Diplomová práce, Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta



Seznam tabulek

Tabulka 1: Seznam vypočtených hustých mračen bodů včetně jejich vlastností	36
Tabulka 2: Statistické parametry při porovnání metod získání 3D mračen bodů.....	51
Tabulka 3: Přehled porovnávaných mračen a jejich vlastnosti.....	54
Tabulka 4: Statistické parametry při porovnání mračen získanými jinými fotoaparáty.....	56
Tabulka 5: Statistické parametry při porovnání nastavení – filtrace	59
Tabulka 6: Statistické parametry při porovnání nastavení – kvalita.....	68
Tabulka 7: Počet bodů v hustém mračnu.....	71
Tabulka 8: Statistické parametry při porovnání vlivu použitých vlčovacích bodů	76
Tabulka 9: Přehled nastavení při výpočtu mračen bodů	82
Tabulka 10: Statistické parametry při porovnání vlivu konfigurace a počtu snímků.....	83

Seznam obrázků

Obr. 1: Středové promítání	13
Obr. 2: Podmínka komplanarity [26].....	16
Obr. 3 Zjednodušený princip metody SfM [3]	17
Obr. 4: Zobrazení řídkého mračna a pozic kamer	18
Obr. 5: Ukázka vygenerovaného hustého mračna bodů ze SW Agisoft PhotoScan	19
Obr. 6: Popis dronu DJI Spark [13]	22
Obr. 7: DJI Spark [13]	23
Obr. 8: Canon EOS 5D Mark II [14]	24
Obr. 9: Objektiv Canon EF 40 mm f/2,8 STM [15].....	24
Obr. 10: Mobilní telefon Samsung Galaxy S6 [17]	24
Obr. 11: Totální stanice Trimble S8 [18].....	25
Obr. 12: Laserový skener Leica ScanStation P40 [20]	26
Obr. 13: Laserový skener Leica BLK360 [21].....	26
Obr. 14: Vodohospodářský model	28
Obr. 15: Ukázka rozmístění vlíčovacích bodů	29
Obr. 16: Detail vlíčovacího bodu	29
Obr. 17: Dialogové okno Align Photos	32
Obr. 18: Nastavení Optimize Camera Alignment	33
Obr. 19: Ukázka odchylek vlíčovacích bodů	34
Obr. 20: Dialogové okno Build Dense Cloud	35
Obr. 21: Cloud-cloud distance computation.....	38
Obr. 22: Ukázka výsledného mračna porovnání	39
Obr. 23: Statistické parametry normálního rozdělení pro vzdálenosti v ose Z.....	39
Obr. 24: Pohled na vodohospodářský model.....	42
Obr. 25: Četnost jednotlivých vzdáleností při porovnání UAV – totální stanice	43
Obr. 26: Četnost jednotlivých vzdáleností při porovnání P40 – totální stanice.....	44
Obr. 27: Detail plotu na snímku	47
Obr. 28: Detail plotu získaným laserovým skenerem Leica ScanStation P40.....	47
Obr. 29: Detail plotu na hustém mračnu získaného metodou SfM	47
Obr. 30: Detail plotu na mračnu bodů získaným laserovým skenerem Leica BLK360	47

Obr. 31: Vzájemné srovnání oblasti plůtku – SfM a laserové skenování	47
Obr. 32: Oválný objekt (Leica ScanStation P40).....	48
Obr. 33: Oválný objekt UAV	48
Obr. 34: Oválný objekt Leica BLK360	48
Obr. 35: Průřez oválným objektem - P40	48
Obr. 36: Průřez oválným objektem - UAV	48
Obr. 37: Průřez oválným objektem – BLK	48
Obr. 38: Zaměřené budovy – Leica ScanStation P40	49
Obr. 39: Zaměřené budovy – UAV	49
Obr. 40: Zaměřené budovy: Leica BLK360.....	49
Obr. 41: Objekt zaměřeného skenerem Leica ScanStation P40.....	49
Obr. 42: Vyhodnocený objekt a zakryté místo mezi objekty UAV	49
Obr. 43: Objekt zaměřený skenerem Leica BLK360.....	50
Obr. 44: Porovnání budovy vyhodnocené metodou SfM s laserovým skenováním	50
Obr. 45: Snímek lávky	50
Obr. 46: Zaměření lávky - Leica ScanStation P40.....	50
Obr. 47: Zaměření lávky – UAV	50
Obr. 48: Zaměření lávky - Leica BLK360	50
Obr. 49: Porovnání UAV high (disabled) – Leica ScanStation P40	52
Obr. 50: Porovnání UAV high (disabled) – Leica BLK360.....	53
Obr. 51: Oválný objekt – UAV	55
Obr. 52: Oválný objekt - Canon.....	55
Obr. 53: Oválný objekt – mobilní telefon.....	55
Obr. 54: Budova uprostřed vodohospodářského modelu - UAV	56
Obr. 55: Budova uprostřed vodohospodářského modelu - Canon	56
Obr. 56: Budova uprostřed vodohospodářského modelu - mobil	56
Obr. 57: Porovnání UAV high (mild) – Canon high (mild)	57
Obr. 58: Porovnání UAV high (mild) – Mobil high (mild).....	58
Obr. 59: Graf vývoje směrodatné odchylky v závislosti na změně filtrace	60
Obr. 60: Disabled	61
Obr. 61: Mild	61
Obr. 62: Moderate.....	61
Obr. 63: Aggressive	61



Obr. 64: Průřez budovami - Disabled	62
Obr. 65: Průřez budovami - Mild.....	62
Obr. 66: Průřez budovami – Moderate	62
Obr. 67: Průřez budovami - Aggressive	62
Obr. 68: Lávka - disabled	63
Obr. 69: Lávka – mild.....	63
Obr. 70: Lávka - moderate.....	63
Obr. 71: Lávka – aggressive.....	63
Obr. 72: Porovnání UAV high (disabled) – Leica ScanStation P40	64
Obr. 73: Porovnání UAV high (mild) - Leica ScanStation P40	65
Obr. 74: Porovnání UAV high (moderate) - Leica ScanStation P40	66
Obr. 75: Porovnání UAV high (aggressive) - Leica ScanStation P40	67
Obr. 76: Graf vývoje směrodatné odchylky v závislosti na změně kvality	69
Obr. 77: Pohled na boční stranu budovy – high	70
Obr. 78: Pohled na boční stranu budovy - medium.....	70
Obr. 79: Pohled na boční stranu budovy – low	70
Obr. 80: Pohled na boční stranu budovy - lowest	70
Obr. 81: Průřez budov - high.....	70
Obr. 82: Průřez budov - medium.....	70
Obr. 83: Průřez budov - low	70
Obr. 84: Průřez budov – lowest.....	70
Obr. 85: Průřez vodním korytem – high.....	71
Obr. 86: Průřez vodním korytem - medium	71
Obr. 87: Průřez vodním korytem - low	71
Obr. 88: Průřez vodním korytem - lowest	71
Obr. 89: Oválný objekt – high	72
Obr. 90: Oválný objekt - medium	72
Obr. 91: Oválný objekt – low	72
Obr. 92: Oválný objekt – lowest	72
Obr. 93: Porovnání UAV high– UAV medium	73
Obr. 94: Porovnání UAV high – UAV low.....	74
Obr. 95: Porovnání UAV high – UAV lowest	75
Obr. 96: Graf vývoje směrodatné odchylky v závislosti na počtu vřícovacích bodů	77

Obr. 97: Porovnání UAV 45 vlíc. bodů – UAV 21 vlíc. bodů	78
Obr. 98: Porovnání UAV 45 vlíc. bodů – UAV 11 vlíc. bodů	79
Obr. 99: Porovnání UAV 45 vlíc. bodů – UAV 6 vlíc. bodů	80
Obr. 100: Porovnání UAV 45 vlíc. bodů – UAV 4 vlíc. bodů	81
Obr. 101: Graf vývoje směrodatné odchylky v závislosti na konfiguraci a počtu snímků	83
Obr. 102: Mračno - všechny snímky.....	84
Obr. 103: Mračno - dolní let	84
Obr. 104: Pohled na mračno - dolní let min 1	84
Obr. 105: Mračno - dolní let min 2	84
Obr. 106: Mračno - horní let.....	85
Obr. 107: Průřez objektu na modelu – dolní let	85
Obr. 108: Průřez objektu na modelu - dolní let bez 1. šikmého náletu	85
Obr. 109: Průřez objektu na modelu - dolní let bez 2. šikmého náletu	85
Obr. 110: Průřez objektu na modelu - horní let.....	85
Obr. 111: Porovnání UAV všechny snímky – UAV dolní let.....	87
Obr. 112: Porovnání UAV všechny snímky – UAV dolní let minus 1. šikmá řada.....	88
Obr. 113: Porovnání UAV všechny snímky – UAV dolní let minus 2. šikmá řada.....	89
Obr. 114: Porovnání UAV všechny snímky – UAV horní let	90

Seznam příloh

Přílohy na přiložených DVD

DVD 1

- ***A_projekt_Canon***
 - Adresář obsahuje projekt softwaru Agisoft PhotoScan se snímky z digitální zrcadlovky Canon EOS 5D Mark II
 - *projekt_Canon.files*
 - *projekt_Canon.psx*
 - *Canon_5D – vyber* – snímky ve formátu JPEG
- ***B_projekt_mobil***
 - Adresář obsahuje projekt softwaru Agisoft PhotoScan se snímky z mobilního telefonu Samsung Galaxy S6
 - *projekt_mobil.files*
 - *projekt_mobil.psx*
 - *samsung* – snímky ve formátu JPEG

DVD 2

- ***C_projekt_UAV***
 - Adresář obsahuje projekt softwaru Agisoft PhotoScan se snímky z UAV (projekt obsahuje všechny snímky a vlícovací body)
 - *projekt_UAV.files*
 - *projekt_UAV.psx*
 - *spark* – snímky ve formátu JPEG
- ***D_reporty***
 - Adresář obsahuje reporty z vypočtených mračen, obsahuje především informace o kalibraci kamery a odchylky vlícovacích bodů
 - *Report_Canon_mild.pdf*

-
- *Report_Mobil_mild.pdf*
 - *Report_UAV_high_dis.pdf*
 - *Report_UAV_high_mild.pdf*
 - *Report_UAV_high_mod.pdf*
 - *Report_UAV_high_aggr.pdf*
 - *Report_UAV_medium_dis.pdf*
 - *Report_UAV_low_dis.pdf*
 - *Report_UAV_lowest_dis.pdf*
 - *Report_UAV_high_dis_4.pdf*
 - *Report_UAV_high_dis_6.pdf*
 - *Report_UAV_high_dis_11.pdf*
 - *Report_UAV_high_dis_21.pdf*
 - *Report_UAV_dolni_let.pdf*
 - *Report_UAV_dolni_let_min1.pdf*
 - *Report_UAV_dolni_let_min2.pdf*
 - *Report_UAV_horni_let.pdf*
 - ***E_souradnice_VB.txt*** – Souřadnice vlíčovacích bodů
 - ***F_mracno_totalni_stanice.txt*** – Mračno získané totální stanicí pro porovnání s metodou SfM
 - ***G_Leica_ScanStation_P40.txt*** – Mračno získané laserovým skenerem Leica ScanStation P40 pro porovnání s metodou SfM
 - ***H_Leica_BLK360*** – Mračno získané laserovým skenerem Leica BLK360 pro porovnání s metodou SfM
 - ***I_hana-ryglova-dp-2018.pdf***