

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA PROSTOROVÝCH VĚD

VYHODNOCENÍ POLOHOVÉ PŘESNOSTI METOD
GEOREFERENCOVÁNÍ SNÍMKŮ POŘÍZENÝCH
BEZPILOTNÍM LETECKÝM PROSTŘEDKEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

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

Diplomant: Bc. Lukáš Kalivoda

2022

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Fakulta životního prostředí

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Bc. Lukáš Kalivoda

Regionální environmentální správa

Název práce

Vyhodnocení polohové přesnosti metod georeferencování snímků pořízených bezpilotním leteckým prostředkem

Název anglicky

Evaluation of positional accuracy of georeferencing methods taken by unmanned aerial vehicles

Cíle práce

Cílem práce je vyhodnocení polohové přesnosti metod georeferencování leteckých snímků v reálném čase (RTK) oproti využití tradičních pozemních vlčcovacích bodů (GCP). Cílem je kvantifikace systematické polohové odchylky jednotlivých metod pomocí běžných statistických ukazatelů.

Metodika

Autor zpracuje literární rešerši k problematice snímkování bezpilotními systémy s následným využitím pořízených dat v různých oblastech se zaměřením na popis metod georeference (GCP, RTK, PPK) potřebných ke sběru těchto dat. Autor pořídí odpovídající letecká data vybraných vojenských objektů pomocí bezpilotního prostředku DJI Phantom 4 RTK a zhodnotí polohovou přesnost zmíněných metod pomocí běžných statistických ukazatelů (RMSE, MAE, graficky atd.). Autor stanoví odpovídající závěry a formuluje doporučení k metodám georeferencování leteckého snímkování malých člověkem vytvořených prvků v krajině.

Doporučený rozsah práce

40-50 stran

Klíčová slova

Georeferencování, geotagging leteckých snímků, poziční chyba, Real-time Kinematic (RTK), Ground Control Points (GCPs), DJI Phantom 4 RTK

Doporučené zdroje informací

- Famiglietti, N. A., Cecere, G., Grasso, C., Memmolo, A., & Vicari, A. (2021). A test on the potential of a low cost unmanned aerial vehicle RTK/PPK solution for precision positioning. *Sensors*, 21(11), 3882.
- Iizuka, K., Ogura, T., Akiyama, Y., Yamauchi, H., Hashimoto, T., & Yamada, Y. (2021). Improving the 3D model accuracy with a post-processing kinematic (PPK) method for UAS surveys. *Geocarto International*, 1-21.
- Kalacska, M., Lucanus, O., Arroyo-Mora, J. P., Laliberté, É., Elmer, K., Leblanc, G., & Groves, A. (2020). Accuracy of 3d landscape reconstruction without ground control points using different uas platforms. *Drones*, 4(2), 13.
- McMahon, C., Mora, O. E., & Starek, M. J. (2021). Evaluating the Performance of sUAS Photogrammetry with PPK Positioning for Infrastructure Mapping. *Drones*, 5(2), 50.
- Przybilla, H. J., Bäumer, M., Luhmann, T., Hastedt, H., & Eilers, M. (2020). Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for RTK-based UAV photogrammetry. *ISPRS and Spatial Information Sciences*, 43, 485-492.
- Remzi, E. K. E. R., Alkan, E., & AYDIN, A. (2020). A comparative analysis of UAV-RTK and UAV-PPK methods in mapping different surface types. *European Journal of Forest Engineering*, 7(1), 12-25.
- Tmušić, G., Manfreda, S., Aasen, H., James, M. R., Gonçalves, G., Ben-Dor, E., ... & McCabe, M. F. (2020). Current practices in UAS-based environmental monitoring. *Remote Sensing*, 12(6), 1001.
- Zhang, H., Aldana-Jague, E., Clapuyt, F., Wilken, F., Vanacker, V., & Van Oost, K. (2019). Evaluating the potential of PPK direct georeferencing for UAV-SfM photogrammetry and precise topographic mapping. *Earth Surf. Dyn. Discuss*, 7, 807-827.
- Žabota, B., & Kobal, M. (2021). Accuracy assessment of uav-photogrammetric-derived products using PPK and GCPs in challenging terrains: In search of optimized rockfall mapping. *Remote Sensing*, 13(19), 3812.
-

Předběžný termín obhajoby

2021/22 LS – FZP

Vedoucí práce

Ing. Jan Komárek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra prostorových věd

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2022

doc. Ing. Petra Šimová, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 21. 3. 2022

prof. RNDr. Vladimír Bejček, CSc.

Děkan

V Praze dne 28. 03. 2022

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou/závěrečnou práci na téma: Vyhodnocení polohové přesnosti metod georeferencování snímků pořízených bezpilotním leteckým prostředkem zpracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na mou diplomovou/závěrečnou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové/závěrečné práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že údaje uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 30. 3. 2022

.....

Poděkování

Mé poděkování patří panu Ing. Janu Komárkovi, Ph.D. za odborné vedení a veškeré rady při konzultacích. Dále bych rád poděkoval panu Jiřímu Hamplovi za praktické poznatky a ochotu při spolupráci. V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině a blízkým přátelům za podporu, kterou mi při zpracování této práce poskytli.

Abstrakt

Diplomová práce se zaměřuje na vyhodnocení přesnosti metod georeferencování snímků, které byly pořízeny bezpilotním leteckým prostředkem. Data pro zpracování a následné zhodnocení byla pořízena dronem DJI Phantom 4 RTK. Předmětem měření byly dva vojenské opevněné objekty nacházející se v Moravskoslezském kraji. Pro každý z objektů bylo vytvořeno bodové mračno a 3D model, a to pomocí celkem čtyř georeferenčních metod. Zaprvé šlo o metodu určování polohové přesnosti pouze ze satelitů GNSS. Druhá z metod má základ té první, ovšem je zpřesněna o vlíčovací body (GCP). Třetí metoda využívá korekci polohy v reálném čase (RTK) a pro podobu čtvrté metody je taktéž upřesněna o zaměřené vlíčovací body.

V první části práce se nachází literární rešerše, která představuje teoretický úvod do problematiky letecké fotogrammetrie. Druhá část se již zabývá praxí, kde jsou popsány prostředky pro sběr a zpracování potřebných dat a pracovní postup tvorby bodových mračen a konečných 3D modelů, včetně získání hodnot využitelných pro posouzení. Výsledné hodnoty odchylek jsou zde vizualizovány a veškerá konečná data přehledně sumarizována a zhodnocena.

Způsob korekce polohy snímků v reálném čase za pomoci referenčních stanic značně ulehčuje práci geodetů, a v případě dosažení potřebné přesnosti jde o způsob skrze efektivní. Výsledky práce však značí, že polohová přesnost snímků pořízených v režimu RTK zde nedosahovala uspokojivých hodnot a pro docílení potřebné přesnosti bylo nutné využít pozemní vlíčovací body. Metodu georeferencování pomocí GCP je možno považovat za již tradiční. Konečné výsledky této práce však značí, že v tomto případě se stále jedná o způsob dosažení nejvyšší možné přesnosti, z čehož plyne doporučení implementace GCP do postupu provádění měření a následných výpočtů.

Klíčová slova: Georeferencování, geotagging leteckých snímků, poziční chyba, Real-time Kinematic (RTK), Ground Control Points (GCPs), DJI Phantom 4 RTK

Abstract

The diploma thesis focuses on the evaluation of the accuracy of methods of georeferencing images which were taken by an unmanned aerial vehicle. The data for processing and subsequent evaluation were obtained with a DJI Phantom 4 RTK drone. The subject of the measurement was two military fortified buildings located in the Moravian-Silesian Region. A point cloud and a 3D model were created for each of the objects, using a total of four georeferencing methods. First, it was a method of determining positional accuracy only from GNSS satellites. The second method is based on the first, but is specified by ground control points. The third method uses real-time position correction (RTK) and for the form of the fourth method it is also specified by focused ground control points.

The first part of the thesis contains a literature review, which is a theoretical introduction to the issue of aerial photogrammetry. The second part deals with the practice, which describes the means for collecting and processing the necessary data and the workflow for creating point clouds and 3D models, which includes obtaining the necessary values for assessment. The resulting values of deviations are visualized and all final data are clearly summarized and evaluated.

The method of correcting the position of images in real time with the help of reference stations, greatly simplifies the work of surveyors, and if the required accuracy is achieved, it is remarkably efficient. However, the results of this thesis indicate that the positional accuracy of the images taken in the RTK mode did not reach satisfactory values here and the use of ground control points was necessary to achieve the required accuracy. The GCP georeferencing method can be considered as traditional. Finally, the results of this thesis indicate that in these circumstances this is still the best way to achieve the highest possible accuracy. Because of this the implementation of GCP is recommended in the process of performing measurements and subsequent calculations.

Keywords: Georeferencing, aerial image geotag, position error, Real-time Kinematic (RTK), Ground Control Points (GCPs), DJI Phantom 4 RTK

Seznam použitých zkratk

EUROUVS: The European Association of Unmanned Vehicle Systems (Evropská asociace systémů bezpilotních prostředků)

GCPs: Ground control points (Pozemní vlícovací body)

GLONASS: Global Orbiting Navigation Satellite System (Globální družicový polohový systém)

GNSS: Global Navigation Satellite System (Globální družicový polohový systém)

GPS: Global Positioning System (Globální polohový systém)

IZS: Integrovaný záchranný systém

PPK: Post-Processed Kinematic (Post-processingová kinematická metoda)

RTK: Real-Time Kinematic (Kinematická metoda v reálném čase)

S-JTSK: Souřadnicový systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální

UAV: Unmanned Aerial Vehicle (Bepilotní létající prostředek)

VRS: Virtual reference systém (Virtuální referenční systém)

WGS84: World Geodetic System 1984 (Světový geodetický systém 1984)

Obsah

1. Úvod	12
2. Cíl práce.....	13
3. Literární rešerše	14
3.1 Bezpilotní létající prostředky (UAV)	14
3.2 Letecké snímkování	15
3.2.1 Výškové inspekce	15
3.2.2 Geodetické služby.....	15
3.2.3 Fotografie a videa	16
3.2.4 Výzkumná činnost	16
3.2.5 Integrovaný záchranný systém (IZS).....	16
3.2.6 Vojenské účely	17
3.3 Fotogrammetrie	18
3.3.1 Pozemní fotogrammetrie.....	18
3.3.2 Letecká fotogrammetrie	19
3.3.3 Metody snímkování	20
3.3.4 Centrální projekce, prvky vnitřní a vnější orientace.....	21
3.3.5 Aerotriangulace	22
3.3.6 Vyrovnání bloku svazků (Block bundle adjustment)	22
3.3.7 Tachymetrie.....	23
3.3.8 Georeferencování.....	23
3.3.9 Distorze	23
3.4 GNSS (Global Navigation Satellite System)	24
3.4.1 Určování polohy	25
3.5 Metody georeferencování leteckých snímků.....	25
3.5.1 Ground Control Points (GCPs).....	26
3.5.2 Real-time Kinematic (RTK).....	26
3.5.3 Post-Processing Kinematic (PPK).....	27
3.6 Algoritmy a přístupy pro generování bodových mračen	27
3.6.1 Structure from Motion	27
3.6.2 Multi-View Stereo	28
3.6.3 Semi-global matching (Semi-globální obrazová korelace).....	28
3.7 Využití bezpilotních systémů v konkrétních oblastech zemědělství a životního prostředí	29
3.8 Podobné studie.....	31

3.8.1	„Measurement Accuracy of the DJI Phantom 4 RTK and Photogrammetry“	31
3.8.2	„Evaluation of the Georeferencing Accuracy of a Photogrammetric Model Using a Quadcopter with Onboard GNSS RTK“	32
4.	Charakteristika zájmové krajiny a objektů	35
4.1	Geografická poloha zájmového území	35
4.2	Vojenská opevnění	36
5.	Metodika	37
5.1	Použité pomůcky	37
5.1.1	Dron DJI Phantom 4 RTK	37
5.1.2	GNSS přijímač Trimble R8	37
5.1.3	Pozemní vlíčovací body	37
5.2	Použitý Software	37
5.2.1	DJI Terra Pro Overseas Perpetual	37
5.2.2	CloudCompare v2.11.3 (Anoia)	38
5.2.3	ArcMap 10.7.1	38
5.3	Sběr dat	38
5.4	Tvorba výsledných modelů a mračen bodů	39
5.5	Porovnání mračen bodů	41
5.6	Porovnání výsledných a referenčních souřadnic	42
5.7	Sumarizace výsledných hodnot	42
6.	Výsledky	43
6.1	Měření objektu OP-S 25	43
6.2	Měření objektu vz. 37 řopík	49
6.3	Porovnání výsledků měření objektů	55
7.	Diskuse	56
8.	Závěr a přínos práce	58
9.	Zdroje	59
9.1	Internetové zdroje	59
9.2	Bakalářské a diplomové práce	61
9.3	Odborné knihy	62
9.4	Články v odborném periodiku	63
10.	Přílohy	68
10.1	OP-S 25	68
10.1.1	GNSS	68
10.1.2	GNSS GCP	69

10.1.3 RTK	69
10.1.4 RTK GCP.....	70
10.2 Řopík	70
10.2.1 GNSS	70
10.2.2 GNSS GCP.....	71
10.2.3 RTK	71
10.2.4 RTK GCP.....	72

1. Úvod

V polední době je využívání bezpilotních leteckých prostředků v mnoha oblastech, jako je geodézie či environmentální výzkum stále větším trendem. Popularitu si tyto letouny získávají především díky své flexibilitě, klesající ceně a tím zvyšující se dostupnosti. Přesnost vícerotorových UAV (Unmanned Aerial Vehicle) je v tomto ohledu velmi důležitým aspektem, kterým se zabývá mnoho studií. Drony vybavené modulem GNSS RTK (modul zajišťující korekce polohy v reálném čase) se na trhu vyskytují již nějakou dobu. V roce 2018 byla započata výroba dronu Phantom 4 RTK od firmy DJI, který je považován z průkopníka v oblasti cenově dostupných dronů vybavených právě modulem GNSS RTK pro korekci polohy v reálném čase (DJI ©2022).

Z hlediska efektivity pracovního postupu je myšlenka spoléhat se pouze na výpočet polohy snímků v reálném čase bez geodetického zaměření pozemních vlíčovacích bodů velmi atraktivní. Vzhledem k principu výpočtu, kdy se pracuje s mnoho proměnnými, je ovšem nutné ověřit, zda georeferenční metoda RTK může dosáhnout výsledků s dostatečnou přesností nebo zda je nutné použití pozemních vlíčovacích bodů (GCP). Praktické využití zjednodušeného procesu bez upřesnění skrz vlíčovací body by bylo přivítáno v mnoha aplikacích. Primárně by se jednalo o měření prováděné v místech, kde je obtížné stabilizovat body GCP, jako například při monitoringu změn v morfologii sopky, eroze hrází a koryt, rychlost pohybu ledovce, či dokumentování skalních výchozů (Štroner a kol., 2020).

V této diplomové práci je hodnocena výsledná přesnost měření za použití obou ze zmíněných georeferenčních metod. Smyslem studie je tedy vyhodnocení, zda lze v případě měření za použití dronu DJI Phantom 4 RTK dosáhnout potřebné přesnosti pouze s výpočtem polohy v reálném čase, a to bez použití pozemních vlíčovacích bodů. Pro oblasti, kde jsou pro měření využívány tyto drony, by se jednalo o značné ulehčení a celkové zefektivnění pracovního postupu.

2. Cíl práce

Cílem práce je vyhodnocení polohové přesnosti metod georeferencování snímků pořízených bezpilotním leteckým prostředkem. Jedná se o metody georeferencování v reálném čase (RTK) a využití tradičních pozemních vlíčovacích bodů (GCP). Cílem je kvantifikace systematické polohové odchylky každé z metod pomocí běžných statistických ukazatelů.

Předmětem měření budou dva vojenské objekty nacházející se v Moravskoslezském kraji. Odpovídající letecká data těchto objektů budou pořízena za pomoci kvadrokoptéry DJI Phantom 4 RTK.

Po teoretickém úvodu obsaženém v literární rešerši, budou v metodické části popsány prostředky pro sběr a tvorbu dat potřebných k získání výsledných hodnot odchýlení jednotlivých metod. Výsledné hodnoty budou následně sumarizovány, popřípadě vizualizovány a porovnány mezi sebou, ale také s výsledky podobných studií. V závěru bude zmíněno konečné doporučení plynoucí právě z dosažených výsledků.

3. Literární rešerše

3.1 Bezpilotní létající prostředky (UAV)

Zkratkou UAV (Unmanned Aerial Vehicle) jsou označeny bezpilotní létající prostředky. Úřadem pro civilní letectví jsou bezpilotní prostředky definovány jako „letadla určená pro provoz bez pilota na palubě“ (Řehák, 2012). Další z definic označuje tyto bezpilotní létající prostředky za systémy, které se skládají z bezpilotního letadla, řídicí stanice a dalšího jakéhokoliv prvku, který je nezbytný k umožnění letu, jako například datový spoj pro řízení a kontrolu a prvek pro vypouštění a návrat (Tsach a kol., 2010).

Rozlišujeme různé platformy bezpilotních prostředků pro různá využití. Jednou z prvně využívaných platforem byl drak. Využití právě této platformy ovšem značně komplikovala omezení, jako jsou dosah lana, rychlost větru, popřípadě také rozloha území, které mělo být snímkováno. Zároveň se v tomto počátku UAV fotogrammetrie využívaly také horkovzdušné balóny či vzducholodě. Výhodou těchto prostředků byly nižší náklady a možnost setrvat ve vzduchu na jednom místě, což bylo výhodou pro aplikace vyžadující delší dobu snímkování (Eisenbeiss, 2009). S dobou a technickým vývojem se postupně začaly využívat převážně bezpilotní multirotorové systémy jako bezpilotní letouny a multikoptéry. V současné době jsou pro UAV fotogrammetrická měření využívány drony, které mají schopnost snímkovat za letu v předem určených náletových osách, ale také setrvat na místě. V této době lze využívat běžně dostupné drony nesoucí neměřickou kameru nebo zakoupit speciální systém s kamerou měřickou, který je navržen speciálně pro účely fotogrammetrického měření (Gartner, 2020).

Hlavní výhodou UAV systémů oproti leteckým prostředkům řízeným pilotem je využití v riskantních situacích s vyloučením ohrožení pilotova života. Dále je také možnost využití na nedostupných místech, v nižších výškách a blízkostech objektů, kde prostředky s pilotem nemohou létat. Tímto jsou myšleny oblasti, které například postihly přírodní katastrofy. Další výhodou je využití při zhoršených podmínkách, jako je mrholení či zatažená obloha, jelikož UAV létají v nižších výškách než letadla pilotovaná. Vertikální vzlet bez potřeby přistávací plochy může být v mnoha případech také výhodou (Eisenbeiss, 2009).

Poměrně rychlý vývoj bezpilotních leteckých prostředků proběhl až v posledních několika letech a dnes již na trhu existuje široká škála těchto produktů. EUROUVS (The European Association of Unmanned Vehicle systems) sestavil klasifikaci různých platform těchto systémů, která přehledně prezentuje současný stav vývoje bezpilotních létajících prostředků (Bento, 2008).

3.2 Letecké snímkování

Nejrozšířenějším způsobem, kterým jsou v současné době využívány civilní bezpilotní prostředky, je letecké snímkování. Možnosti využití snímků pořízených bezpilotními prostředky jsou stále širší a díky snazšímu a levnějšímu provozu již nahradily dříve častěji využívané vrtulníky, případně letadla (Hlaváč, 2017). Ovšem s ohledem na evropskou legislativu není možno se s bezpilotními prostředky pohybovat nad hranicí 120 metrů nad terénem (EASA ©2022). Bepilotní prostředky jsou renomovanými firmami, státními složkami, popřípadě subjekty zabývajícími se výzkumem využívány k následujícím pracím.

3.2.1 Výškové inspekce

V tomto odvětví drony nejčastěji zastupují vysokozdvizné plošiny či vrtulníky. V případě výškových inspekcí v těžko dostupných místech, jako je vedení vysokého napětí, větrné elektrárny či různé vysílače, jsou bezpilotní prostředky často efektivnější a bezpečnější možností pro jejich provádění. Výstupem v tomto případě bývají fotografie a videozáznamy pro víceúčelová využití, popřípadě video a fotozáznamy z termokamer, které mohou sloužit například jako podklady pro analýzu izolačních vlastností objektů (Hlaváč, 2017).

3.2.2 Geodetické služby

V oblasti geodetických služeb jsou bezpilotní prostředky využívány pro letecké mapování, tvorbu ortofoto map, 3D objektů pro víceúčelová využití či jako prostředek pro kontrolu dodržování územního plánu. Hlavní výhodou jejich využití je vysoká přesnost, a to 2 až 3 cm bez nutnosti použití pozemních vlícovacích bodů (GCPs) při použití vestavěného RTK GNSS přijímače a sítě VRS či referenční stanice. Dalším bonusem je vysoká efektivita, jelikož se jedná o metodu rychlejší až o 80 % oproti využití pozemního měření, přičemž je také značně levnější (Mulakala, 2019).

3.2.3 Fotografie a videa

Pořizování leteckých snímků získalo díky dronům zcela nový rozměr. Profesionální bezpilotní stroje jsou schopny unést nejmodernější fotozařízení, s jejichž pomocí je možno pořizovat fotografie, které jsou v mnoha případech kvalitnější, než fotografie pořízené z letadla či vrtulníku (Hlaváč, 2017). Díky pomoci bezpilotních prostředků je samozřejmě také možno pořizovat špičkové výškové záběry. Tyto specializované drony, které jsou pro natáčení využívány, mají často pořizovací náklady ve stovkách tisíc korun. Následné provozní náklady jsou však minimální. Celkově je tedy finanční náročnost ve srovnání s náklady pro využití vrtulníku velmi nízká (Land of drones ©2022).

3.2.4 Výzkumná činnost

V oblasti vědy a výzkumu nachází bezpilotní systémy své uplatnění převážně při environmentální praxi, kde jsou využívány výzkumnými institucemi i univerzitami. Jedná se o efektivní nástroje pro sběr dat o přírodě s širokou škálou možností uplatnění (Komárek a Vávra, 2019). Například studie Minaříka a Langhammera (2016) představuje metodický postup pro hodnocení prostorových a kvalitativních aspektů narušení lesů na základě použití multispektrální zobrazovací kamery s UAV fotogrammetrií. Certifikovaná metodika Kloučka a kol. (2019) se zabývá vytvořením uceleného postupu po detekci napadení lesních porostů škůdci. Zde je popsáno, jak s UAV úspěšně identifikovat napadené stromy, data zpracovat a následně vyhodnotit. Z oblasti zemědělského výzkumu stojí za zmínku studie Zhanga a kolektivu (2014), která skrze bezpilotní prostředky představuje metodiku sledování a hodnocení stavu polí a hnojiv zde aplikovaných. V oblasti jaderné energetiky pak bylo dosaženo úspěchu vývojem dronu, jež je schopen monitorovat a měřit jadernou radiaci (OM Solutions ©2021). Skrze veškerou tuto výzkumnou činnost je případně možno konkrétní studie aplikovat v praxi.

3.2.5 Integrovaný záchranný systém (IZS)

Bezpilotní letecké prostředky jsou již v dnešní době hojně využívány složkami integrovaného záchranného systému. Hasičské záchranné sbory využívají drony v případě rozsáhlých požárů lesních porostů, kde tyto prostředky mohou poskytovat informace velikosti rozlohy požáru a směru jeho šíření. Dále jsou speciální drony využívány při požárech v průmyslových areálech, kde mapují stav požářiště

a zasaženého objektu (HZSCR ©2021). Díky své technické vybavenosti jsou tyto prostředky schopny přiblížit potřebné místo na požářišti či odhalit skrytá ohniska požáru, což znamená značnou úsporu času a zvýšení šance požár rychleji eliminovat. (Jensen a Jensen, 2020). Využívány jsou také pro průzkum oblastí, kde se hasiči se svou technikou nedostanou, případně by mohlo být ohroženo jejich zdraví z důvodu úniku nebezpečných látek (HZSCR ©2021).

Speciálně vybavené drony využívají hojně také policejní sbory. Jedná se primárně o případy vyhledávání pohřešovaných osob pomocí termokamer (Klauser, 2021). Své uplatnění nachází také v monitoringu určité dopravní situace, kde dokáží relativně spolehlivě určit její budoucí vývoj a varovat tak před možnými komplikacemi. Přínosný je také průzkum míst po dopravních nehodách, který zefektivní následné postupy pro vyřešení dané situace (Elloumi a kol, 2018).

Zdravotnická záchranná služba zatím nevyužívá bezpilotních prostředků v takové míře jako ostatní složky záchranného systému. Najdou zde své využití například pro přepravu potřebného zdravotnického materiálu do hůře přístupných oblastí. V tomto odvětví jsou často zmiňovány ambulantní drony sloužící k rychlé přepravě defibrilátoru k pacientovi (Sivabalaselvamani a kol, 2021). V poslední době byl zaznamenán úspěch právě v podobě záchrany člověka se zástavou srdce, jemuž se dostalo rychlé pomoci díky dronu, který byl tímto defibrilátorem vybaven (The Verge ©2022).

3.2.6 Vojenské účely

Způsob válčení se v posledních letech značně změnil a nemalou měrou k tomu přispělo právě využívání leteckých prostředků bez pilota. Drony jsou nasazovány při operacích v rizikových oblastech, například pro špionáž či pro útok právě bez rizika ztráty života útočníka (Vacca, 2017). Využití moderních dronů pro armádu tedy představuje zcela novou etapu, která je charakteristická zpřístupněním značně většího objemu průzkumných informací o protivníkovi díky přítomnosti špičkových senzorů. Používají se senzory pro vedení radiolokačního, optického, rádiového a radiotechnického, radiačního, meteorologického, biologického a chemického průzkumu a analýzy stavu prostředí (MO ČR ©2022).

3.3 Fotogrammetrie

Fotogrammetrie je inženýrská disciplína, která je značně ovlivněna vývojem v oblasti počítačových věd a elektroniky. Neexistuje žádná všeobecně uznávaná definice fotogrammetrie (Schenk, 2005). Fotografie je definována na mnoho způsobů, ale u některých z nich dochází v průběhu času v jejich zněních ke změnám díky závislosti na použitých metodách a technologiích, které prochází neustálým vývojem, tudíž se zlepšují a zdokonalují (Miřijovský, 2013). Následující definice zachycuje nejdůležitější pojmy této disciplíny: „Fotogrammetrie je věda o získávání spolehlivých informací o vlastnostech povrchů a objektů bez nutnosti fyzického kontaktu se zkoumanými objekty a následné měření a interpretace získaných informací“ (Schenk, 2005). Pavelka (2003) definuje fotogrammetrii jako „vědu, způsob a technologii, která se zabývá získáváním dále využitelných měření, map, digitálního modelu terénu a dalších produktů, které je možno získat z obrazového, nejčastěji fotografického záznamu“. Aber a kol. (2010) uvádí, že fotogrammetrie je primárně zaměřena na přesné měření trojrozměrných objektů a terénu z dvojrozměrných fotografií. Z počátku byl v oboru fotogrammetrie využíván pouze princip průsekové pozemní fotogrammetrie. Následně byly v padesátých letech 20. století objeveny principy stereoskopie a leteckého snímkování, které brzy našly své uplatnění. Objev těchto principů měl za následek vývoj analogových přístrojů vyhodnocujících dané snímky. Analogová metoda se přestala využívat s rozvojem digitální techniky z důvodu přechodu na metodu digitální. Tato změna díky technologickému pokroku podpořila nový způsob zpracování snímků včetně způsobu využívání metod fotogrammetrie (Šimíček, 2012).

3.3.1 Pozemní fotogrammetrie

Metoda pozemní fotogrammetrie je založena na získávání snímků ze statického stanoviska, které je umístěno na zemi a lze geodeticky přesně zaměřit (Bemis a kol., 2014). Ve srovnání s leteckou fotogrammetrií je tato metoda méně náročná na fotografické a celkově i technické vybavení. Výhodou je také nenáročnost ve vztahu k počasí a možnost delší expozice pro získání kvalitních a ostrých snímků ve vysokém rozlišení a bez smazu (Böhm, 2002). Tato metoda je vhodná pro vyhodnocení menších objektů, u kterých jsou kladeny větší nároky na detailnost (Pavelka, 2009).

V této oblasti je také znám pojem blízká fotogrammetrie. V dnešní době se jedná o často využívaný způsob pro získání kvalitních 3D modelů různých objektů menšího až středního rozsahu. Pro získání snímků vyšší kvality není nutné využití měřičské kamery, jelikož je možné využít také chytrých telefonů s fotoaparátem. Pro laické potřeby je zde možnost využití dostupných free software ke zpracování fotografií i videozáznamů. Populární je použití vzniklého 3D modelu k následnému zhmotnění pomocí 3D tiskárny (Průša, 2018). V případě varianty geodetického zpracování je ovšem nutné využití profesionálních software, které umožňují ověření přesnosti, georeferencování, popřípadě jiné kvalitativní výstupy. Pro pořízení snímků již nebude stačit chytrý telefon, ale je potřeba kvalitní zrcadlový fotoaparát s objektivem disponujícím pevnou ohniskovou vzdáleností pro získání co nejpřesnějších dat (Hanzl, 2007).

3.3.2 Letecká fotogrammetrie

V případě metody letecké fotogrammetrie se snímky pořizují z nosiče, který je v pohybu, tudíž nedochází ke kontaktu s povrchem země. Většinou se pro takovéto snímkování využívá letadlo, vrtulník, balón či právě stěžejní bezpilotní létající prostředek. Předností této metody je oproti pozemní fotogrammetrii výhoda vertikálního pohledu (Aber a kol., 2010). Základní princip, tedy geometricko-matematická rekonstrukce směru fotografických paprsků na snímku, zůstává stále stejný (Miřijovský, 2013). Nenahraditelnost této metody je nejvíce znatelná v případech dokumentace těžko přístupných nebo nepřístupných oblastí, kdy ani není možné použít jinou měřickou metodu (Böhm, 2002).

Obecně vzato je většina fotogrammetrických měření prováděna právě pomocí metod fotogrammetrie letecké, a to z důvodu hospodárnosti mapovacích prací, včetně sběru dat a jejich následného zpracování. Naopak nevýhodou je nemožnost provedení měření za zhoršeného počasí, a to kvůli špatným povětrnostním podmínkám, zhoršené viditelnosti či dešti (Pavelka, 2003).

Letecké měřičské snímky se dají rozdělit podle směru fotografování (myšleno směřování sklonu osy záběru) na vertikální, horizontální a šikmé. Dále podle způsobu, jakým jsou fotografie pořizovány, se dělí na jednotlivé a řadové, které se překrývají. U leteckých měřičských fotografií hraje důležitou roli jejich vzájemný překryv a následně také rozsah. Pro ujištění, že jsou jednotlivá místa v terénu

nasnímána alespoň dvakrát, by měl být podélný překryv snímků v řadách alespoň 60 % a překryv řad 30 % (Cibulka, 2018).

UAV fotogrammetrie

Systémy UAV představují flexibilní technologii schopnou shromažďovat velké množství informací ve vysokém rozlišení pro víceúčelové využití, primárně však metrické (Gini a kol., 2013). V posledních několika letech byly UAV díky technologickému pokroku vybaveny kvalitními snímkovacími zařízeními. Díky tomu se jedná o platformu dálkového průzkumu země zahrnující širokou škálu možných aplikací. Jedná se především o využití v zemědělství, monitorování stavu životního prostředí, inventarizace lesů, zkoumání divoké zvěře či využití v archeologii (He a kol., 2018). Tato fotogrammetrická metoda kloubí výhody fotogrammetrie pozemní i letecké, a to vysokým detailem snímku a vertikálním pohledem (Aber a kol., 2010). Další značnou výhodou využití UAV je nízká cena, malé rozměry, snadné skladování, možnost rychlejšího sběru prostorových dat a v neposlední řadě nízká letová výška umožňující pořízení kvalitnějších záběrů (He a kol., 2018). Přesnost výstupů měření pomocí UAV techniky dosahuje zpravidla až 99,6 % přesnosti v porovnání s klasickým topografickým měřením (Nikolaukopoulos, 2016).

3.3.3 Metody snímkování

Metody snímkování se dělí podle počtu a konfigurace vyhodnocených snímků. První z nich je metoda jednosnímková. V tomto případě se jedná o nejjednodušší typ fotogrammetrie a při měření se využívají samotné měřické snímky. Na snímku je možno měřit pouze rovinné souřadnice, z čehož je patrné, že je možné také určit pouze rovinné souřadnice (Pavelka, 2003). Jednosnímková metoda se v pozemní fotogrammetrii využívá pro tvorbu plánů rovinných objektů. V případě letecké fotogrammetrie, kde je osa záběru zpravidla svislá, se jednosnímková metoda využívá k vyhodnocování polohopisné složky mapy rovinného území (Šimíček, 2014).

Metoda vícesnímková vyžaduje minimálně dva překrývající se snímky stejné scény pro určení prostorové polohy a náležitých souřadnic X, Y a Z. Objekt, který je předmětem měření, musí být tedy vyobrazen na obou snímcích. Při pořizování snímků je potřebné dodržet dostatečný překryv snímků, a to 80 % v podélném směru

a 60 % v příčném směru (Hofmann-Wellenhof, 2007). V případě využití stereoskopického vjemu při vyhodnocování, hovoříme o stereofotogrammetrii. Stereofotogrammetrická metoda využívá binokulární (umožňující současné vidění oběma očima) přímé měření snímkových souřadnic. Tyto souřadnice se nachází na jednom snímku a druhý ze snímků je využit pro určení horizontální X paralaxy (úhel svírající směry vedené ze dvou různých míst prostoru k pozorovanému tělesu), kterou je vyjádřena prostorová složka (Pavelka, 2009).

3.3.4 Centrální projekce, prvky vnitřní a vnější orientace

V případě fotogrammetrického zpracování snímků je nutné definovat určité charakteristiky kamery a koncového snímku (Šimíček, 2014). Každá fotografie je výsledkem centrální projekce (Aber a kol., 2010). Vztah mezi předmětem a jeho případnou podobou na snímku definuje svazek paprsků zachycený kamerou, kdy poznání tohoto svazku je klíčové při rekonstrukci tvaru a rozměrů daného objektu. Místo sbíhání jednotlivých paprsků se nazývá střed promítání. Ten se v ideálním případě nachází ve středu objektivu, ale v případě dnešních složitých optických soustav objektivů může být určení jeho polohy poměrně obtížné. Z centrálního bodu promítání se paprsky rozebíhají pod stejným úhlem a dopadají na fotografickou vrstvu, v současné době spíše na snímací čipy (Mířijovský, 2013). Prvky vnitřní orientace snímku se týkají primárně kamerového objektivu. Těmito prvky je určen vztah mezi projekčním centrem a rovinou snímku (Šimíček, 2014). Prvním prvkem je ohnisková vzdálenost (značena „c“ nebo „f“), která nám udává vzdálenost středu optické soustavy objektivu od kamerového snímače. S nižší hodnotou ohniskové vzdálenosti roste úhel záběru kamery. Dalším prvkem je poloha hlavního bodu (značena H) (Pavelka, 2003). Jde o polohu paty kolmice představující paprsek, který prochází v předmětovém prostoru středním promítáním na obrazové rovině (Böhm, 2002). V praxi se zpravidla při zpracování fotogrammetrických dat zadává spíše tzv. offset hlavního snímkového bodu, což je vzdálenost skutečného bodu, kterým prochází průsečík, od ideální polohy hlavního bodu (Mířijovský, 2013). Poslední prvek je distorze objektivu, kterou způsobuje nepřesné urovňování konstrukčních prvků objektivu do ideální optické osy. Díky tomuto nedostatku je znatelný rozdíl mezi uhly vstupujícího a vystupujícího paprsku, což má za následek, že poloha zobrazovaného bodu a ohyb paprsků se s drobnými odchylkami liší od polohy správné (Pavelka, 2003).

Mezi prvky vnější orientace patří prostorové souřadnice středu promítání – X, Y, Z a úhly pootočení kolem osy – ω, φ, κ . Tyto prvky nám definují polohu a pootočení kamery v objektovém souřadnicovém systému. Díky snímkovým souřadnicím a prvkům vnitřní orientace můžeme rekonstruovat trs paprsků, který vychází z projekčního centra, a tento trs pomocí orientace vnější orientujeme v objektovém systému (Hanzl, 2007). Určení prvků vnější orientace se provádí ve dvou krocích. Prvním krokem je relativní orientace, tedy vytvoření modelu v relativních souřadnicích. Model je tedy prostorově libovolně orientovaný, nevázaný na geodetické souřadnice. Druhým krokem je orientace absolutní. Model je pootočen a posunut do geodetických souřadnic díky vlíčovacím bodům (Madura, 2012).

3.3.5 Aerotriangulace

Snímková triangulace je úspěšnou fotogrammetrickou aplikací, jejíž princip spočívá v řešení vyhnutí se měření většího množství vlíčovacích bodů (Zioboro, 2011). Aerotriangulace využívá vázacích bodů (tie points), což jsou body s neznámými geodetickými souřadnicemi. Vázací body jsou jednoduše lokalizovatelné a následně dobře změřitelné na překryvu dvou, popřípadě více snímků, díky čemuž jsou v procesu aerotriangulace vypočteny reálné souřadnice těchto bodů. Pro určení absolutní orientace modelu jsou potřeba nejméně tři vlíčovací body. Jedná se o základní metodu určování prvků vnější orientace snímků a již zmíněných reálných geodetických souřadnic vázacích bodů. Pro výpočet se využívá metody vyrovnání bloku svazků (Block bundle adjustment) (Hanzl, 2007).

3.3.6 Vyrovnání bloku svazků (Block bundle adjustment)

Jedná se o komplexní řešení úplné orientace, a to v jediném kroku. Vyrovnání bloků svazků se také stalo nedílnou součástí metody Structure from Motion viz kapitola 3.5 (Jeong a kol., 2012). Výpočet touto metodou probíhá iteračně (opakovaným výpočtem) na základě kolineárních rovnic, kde jsou zpočátku stanoveny přibližné hodnoty neznámých, které jsou následnými iteracemi dále zpřesňovány. Neznámé jsou tedy v tomto případě prvky vnější orientace a souřadnice nově určovaných bodů (Blaha a kol, 2012).

3.3.7 Tachymetrie

Tachymetrie je definována jako odvětví zeměměřičství, ve kterém je zaměřován terénní reliéf zemského povrchu, který následně slouží k určení polohopisu a výškopisu (Stumpf a kol., 2015). Hovoříme tedy o polární prostorové metodě, která je nejpoužívanější metodou v geometrické praxi. Dané body jsou označeny výtyčkou s odrazným hranolem. Pomocí totální stanice skrz elektronický dálkoměr je určena šikmá vzdálenost načež na kódových kruzích, nesoucích čárový kód jsou elektronicky určeny vodorovné a zenitové úhly. Díky těmto změřeným parametrům je možno určit prostorovou polohu konkrétních bodů (Urban, 2015).

Tachymetrie je relativně rychlá metoda s nižší přesností oproti nivelaci či ortogonální metodě. Na druhou stranu se hodí při střetu se složitými podmínkami, jako je strmý a členitý terén, hluboké rokle, vodní úseky nebo bažiny. Využívá se převážně při přípravě vrstevnicových plánů, ale je také vhodná pro průzkumy silnic, železnic atd. Někdy se také využívá při menších průzkumech, kde není určována nadmořská výška. Její primární předností je tedy účelnost a hospodárnost (Engineering Notes ©2022).

3.3.8 Georeferencování

V případě georeferencování hovoříme o metodě, díky níž je možno model implementovat do referenčního systému. Možností georeferencování máme vícero. Jednou z nich je vytvoření relativně orientovaného modelu, který je následně absolutní orientací transformován do referenční soustavy. Tato možnost se doporučuje v případě, že jsou k dispozici méně přesná data, jako například přibližné souřadnice GPS snímků. Další možností georeferencování je při vyrovnání bloku svazků. Pro tuto možnost se doporučují použít přesnější data, jelikož přesnost, s jakou jsou určeny vlíčovací body, přímo vstupuje do vyrovnání, načež data, která neodpovídají přesnosti výstupu, by teoreticky mohla model deformovat (Gábrlík, 2020).

3.3.9 Distorze

Rozlišujeme hlavní dva typy rozměrového zkreslení, a to radiální a tangenciální distorze, ke které může dojít například jako následek nepřesného sestavení optického systému. Symetrickým posunem bodů v obrazu směrem k jeho hranám či středu se vyznačuje distorze radiální (Liu a kol., 2021). Distorze tangenciální je typem

zkreslení obrazu, který se vyskytuje v případě, že senzor kamery není ve stejné rovině jako její čočka. Toto zkreslení se projeví posunutím středu (hlavního bodu) snímku. Oproti radiální distorzi bývá vliv distorze tangenciální zpravidla zanedbatelný (Hugemann, 2010). Optickou vadu způsobenou rozměrovou nedokonalostí čoček nazýváme geometrická distorze. Touto distorzi není ovlivněna kvalita obrazu z pohledu rozlišení či barvy, ale je zkreslen tvar a velikost objektu na snímku.

Faktory, které distorzi ovlivňují, se dělí na vnitřní a vnější. Mezi vnější faktory řadíme denní dobu, tedy míru nasvícení, počasí z pohledu vlhkosti, stav čočky či umístění kamery. Vnitřními faktory jsou parametry fotoaparátu a parametry čočky (Mallet a kol., 2018).

Distorze je změřitelná porovnáním reálných rozměrů objektu a rozměrů zkreslených na snímku, přičemž její míra je vyjádřitelná procentuálně jako relativní změna uhlopříčky objektu. Lidský zrak je na optickou distorzi poměrně citlivý, tudíž míra více než 1,5 % je lidským okem zjistitelná (Liu a kol., 2021).

3.4 GNSS (Global Navigation Satellite System)

Jedná se o označení každého satelitního systému, který je využíván pro přesné určení prostorové polohy kdekoli na světě. V současnosti jsou plně využívány čtyři GNSS systémy, a to GPS (Global Positioning System), který provozují Spojené státy Americké, dále systém zvaný GLONASS (Global Orbiting Navigation Satellite System), který provozuje Ruská federace (Hofmann-Wellenhof, 2007). Dalším navigačním systémem je evropský Galileo, který Evropě dopomáhá k nezávislosti právě na systémech GPS a GLONASS (EUSPA ©2021). Čtvrtým satelitním navigačním systémem je čínský BeiDou, který byl ve své době využitelný pouze pro území Čínské lidové Republiky (Kaplan a Hegarty, 2017). V dnešní době je již BeiDou plně využitelný pro plochu celé Země (NovAtel ©2022).

Jednotlivé navigační satelitní systémy se skládají ze tří částí. Jedná se o vesmírný segment, řídicí segment a uživatelský segment. Vesmírný segment je složen ze satelitů jednotlivých navigačních systémů, které jsou umístěny nad Zemí v téměř kruhových orbitálních rovinách (NAIC ©2022). Řídicí segment je skrze pozemní

pozorovací stanice zodpovědný za řízení systému jako celku, včetně jeho údržby, sledování polohy satelitů na jejich oběžné dráze a korekci atomových hodin. Dále je zodpovědný za šifrování dat a ochranu služeb před neoprávněnými uživateli. Uživatelská část se skládá z pasivního přijímače, který přijímá signály z jednotlivých družic, díky kterým následně určí polohu, rychlost a čas. Užívání těchto přijímačů není spojeno s žádnými poplatky. Speciální GNSS přijímače má pro své interní využití pouze armáda (Dawoud, 2012). Smyslem systému GNSS je dosažení kompatibility mezi jednotlivými satelitními navigačními systémy s cílem dosažení nejvyšší možné spolehlivosti a přesnosti (Gibbons Media & Research LLC ©2014).

3.4.1 Určování polohy

Pro určení polohy musí již zmíněný kosmický segment, skládající se z jednotlivých satelitů, zajistit pokrytí daných míst dostatečnou kvalitou signálu. Pro výpočet polohy ze zpracovaných signálů družic se využívá více metod, ovšem všechny mají společné to, že je nutné pro určení polohy znát přesnou polohu družic (Kaplan a Hegarty, 2017). GNSS satelity mají atomové hodiny, rádiové transceivery (síťový prvek umožňující překlad informačního toku z jednoho typu sítě na jiný typ), počítače a podpůrná zařízení používaná pro provoz systému. Signály každého satelitu umožňují určit přibližnou vzdálenost od přijímače k satelitu, což se nazývá pseudovzdálenost. Tato pseudovzdálenost se počítá z času cesty signálu ze satelitu k přijímači. Termín pseudovzdálenost je zaveden kvůli nutnosti dalších doplňujících výpočtů, které zpřesní určení výsledné polohy. Pro stanovení dvojrozměrné polohy stačí příjem signálu z minimálně tří družic. Pro určení polohy trojrozměrné je potřeba minimálně čtyř družic (Hofmann-Wellenhof, 2007). Základ metody GNSS je tedy určení vzdáleností od satelitu k přijímači s následnou aplikací prostorového protínání délek. Satelity vysílají signál, který je posléze k výpočtu absolutní a relativní polohy přijímače (Kaplan a Hegarty, 2017).

3.5 Metody georeferencování leteckých snímků

Úkolem geodeta je zachytit přesná data. V případě pozemního měření je odpovědnost téměř výhradně na geodetech a jejich úrovni odbornosti (Sestras, 2021). Zatímco pokládání vlíčovacích kontrolních bodů bylo v minulosti jedním z nezbytných kroků v pracovních postupech průzkumu drony, pokroky v technologii

GNSS vedly k vývoji kinematických metod v reálném čase (RTK) a post-processingových kinematických metod (PPK). Ovšem jako ve většině případů má každá z těchto metod své klady, ale také zápory.

Obecně vzato mají metody RTK a PPK podobné výhody a nevýhody ve srovnání s GCPs, a to díky své účinnosti a vyšší bezpečnosti, kterou tyto dvě metody nabízí. Je také zřejmé, že přes všechna pro a proti těmto metod je celkový obraz stejný. Integrace technologie GNSS do průmyslového odvětví dronů pomohla zlepšit pracovní postup jejich pilotů. Díky tomu jsou mapovací mise přesnější, rychlejší, nákladově efektivnější a především bezpečnější (Sensefly ©2022).

3.5.1 Ground Control Points (GCPs)

Pozemní kontrolní body jsou definovány jako místo nebo objekt na zemi, který má přesně známé souřadnice. Tyto vlíčovací body se využívají k přesné georeferenci a zarovnání projektů od relativní přesnosti jeden až dva metry po absolutní přesnost dva až pět centimetrů (Mulakala, 2019).

Metoda využití vlíčovacích bodů je původní, tedy i nejznámější a nejdůvěryhodnější. Nabízí vysokou míru přesnosti a také umožňuje poskytnout prokazatelnost kvality. Jedná se tedy o variantu s konzistentní přesností výstupu (Matínez-Corricondo, 2018). Nevýhodou oproti metodám RTK a PPK je vyšší časová náročnost kvůli nutnosti rozmístění kontrolních bodů, a to v závislosti na velikosti měřeného území. V určitém prostředí může být rozmístování bodů nebezpečné. Vyžaduje vybavení v podobě terčů, popřípadě barvy ve spreji, GPS roveru, síťové licence VRS či základny (Sensefly ©2022).

3.5.2 Real-time Kinematic (RTK)

Kinematika v reálném čase je technikou, která je používána pro zvýšení přesnosti dat o poloze odvozených z družicových pozičních systémů. Tyto systémy se spoléhají na jedinou referenční stanici nebo případně na interpolovanou virtuální stanici pro korekci míst, která byla geograficky označena za letu. Zjednodušeně řečeno se jedná o korekční metodu, jež zvyšuje přesnost GNSS (Famiglietti a kol., 2021).

Výhodou této metody je, že není nutné pokládat vlíčovací body, což je v případě členitého terénu značné ulehčení. Díky tomu je patrná také úspora času a s tím spojená vyšší efektivita, a to i díky korekcím v reálném čase. Není tedy nutné

provádět žádné následné zpracování (Przybilla, 2020). Nevýhodou ovšem je, že se jedná o relativně nový koncept a celkově technologie dronů je považována za novou. Pro zpracování dat v reálném čase je zapotřebí základová stanice, speciální vybavení a především konzistentní připojení. Je zde tedy větší šance výskytu chyby. Nelze uchovávat nová nebo stará data pro doložení validity (Sensefly ©2022).

Metoda RTK funguje dobře v rovinném terénu s nižším výskytem stromů či jiných objektů, které by mohly překážet komunikačnímu signálu. V opačném případě je zde patrná možnost ztráty signálu. Pro použití RTK jsou tedy ideální lety ve volném terénu a do dvou až tří kilometrů od pozemní stanice (Štroner a kol., 2020).

3.5.3 Post-Processing Kinematic (PPK)

Alternativní metodou k RTK je post processing. Tato kinematická technika opravuje přesnost geotagů až po zachycení a nahrání dat z bezpilotního prostředku. Data jsou zpracována v konkrétním software jako například RTKLIB (Parajuli, 2020).

Stejně jako u metody RTK je zde výhoda v úspoře času, jelikož není potřeba pokládat vlíčovací body. Ovšem celkově je v tomto případě úspora času nejvíce patrná, jelikož příprava RTK připojení na místě je také omezující. Snáze se také nastavuje základová stanice, protože není vyžadováno připojení přes bluetooth či kabel. Je také spolehlivější než RTK, kvůli své nezávislosti na síle signálu či informacích GNSS ze základové stanice (Famigiletti a kol., 2021). Umožňuje tím i větší flexibilitu za letu. Nevýhodou je u této varianty delší čas, který je potřebný pro následné zpracování údajů o poloze při letu. V pracovním postupu je také snadnější udělat chybu, což může následně zapříčinit georeferenční posun nebo nízkou přesnost v celkovém výstupu daného projektu (Ramzi a kol., 2020).

3.6 Algoritmy a přístupy pro generování bodových mračen

3.6.1 Structure from Motion

Touto nízkonákladovou metodou je možno vytvářet 3D modely objektů nebo povrchů z navzájem se překrývajících dvourozměrných snímků, které byly pořízeny z více míst a mají různou orientaci (Etner a Sofia, 2020). Jedná se o jednu ze zobrazovacích technik, které jsou založeny na odhadu trojrozměrné struktury z dvojrozměrných snímkových sekvencí. V různých formách je tato metoda známa

od roku 1979 (Ullman, 1997). Využívána pro aplikaci ovšem začala být až počátkem 21. století. Výhodou oproti konvenčním fotogrammetrickým metodám je v tomto případě automatizace výpočtu pozice a orientace kamery, která je umožněna skrz automatickou identifikaci společných bodů zájmu, které jsou získány ze souboru překrývajících se snímků. Metoda je efektivnější v případě pořízení fotografií se značným překryvem, a to ze všech směrů kolem daného objektu (Snavely, 2011).

Fotografie, které jsou použity jako vstup pro tuto metodu, mohou být pořízeny ze standartní kamery, čímž jsou značně sníženy náklady pro její provedení. Z tohoto důvodu je možno Structure from Motion označit jako nízkonákladovou techniku, kterou mohou být doplněny jiné 3D modelovací techniky, kupříkladu laserové skenování. Šimíček (2014) ve své práci popsal princip, jakým metoda funguje: Nejdříve je určena posloupnost pozic kamery (3D pohyb) a 3D struktura scény. Díky sledování množin bodových prvků u dané série snímků je možno odvodit, v jakém místě se kamera nacházela, když byl snímek pořízen, a jaká je poloha 3D bodů, jež byly zaznamenány. Structure from Motion následně vygeneruje 3D objekt s návazností na pozici kamer s odvozenou geometrií scény. Smyslem je tedy kombinace bodů z fotografií pořízených z různých míst tak, aby mohla proběhnout rekonstrukce struktury scény s ohledem na pohyb kamery.

3.6.2 Multi-View Stereo

Při hledání shody u dvojic snímků často dojde k zakrytí oblasti, kdy povrch sloužící pro modelaci není na obou snímcích kompletně viditelný. Mračno bodů je tedy následně neúplné a vyskytují se zde takzvané díry. Marčíš (2019) ve své práci zmiňuje, že nalezené shody také nemusí znamenat, že povrch objektu bude zrekonstruován přesně, jelikož neexistuje metoda, která by byla rezistentní vůči chybám párování při porovnávání pouze dvou sousedních snímků. Odstranění zákrytových oblastí a zvýšení spolehlivosti nalezených shod je možně dosáhnout přidáním dalších snímků z jiného stanoviska kamery. V tomto případě tedy hovoříme o technice Multi-View Stereo.

3.6.3 Semi-global matching (Semi-globální obrazová korelace)

Tato metoda slouží k trojrozměrné rekonstrukci modelu z dvojice kalibrovaných fotografií a je založena na hledání shodných pixelů u jednotlivých snímků. Jedná se o algoritmus, který kombinuje metody lokální a globální, přičemž dokáže

pro fotogrammetrickou tvorbu využít také neměřických snímků. Lokální metoda vyhodnocuje pouze své nejbližší okolí, kdežto globální metoda vyhodnocuje všechny pixely vstupujících obrazů (Hirschmuller, 2005).

Plzák (2016) ve své práci uvádí, že se jedná o způsob, jak udělat měřické snímky ze snímků neměřických. Dále zmiňuje, že algoritmy Multi-View Stereo a Structure from Motion byly odvozeny právě z metody Semi-globální obrazové korelace.

3.7 Využití bezpilotních systémů v konkrétních oblastech zemědělství a životního prostředí

Data získaná pomocí bezpilotních prostředků je možno využít v mnoha oblastech ochrany přírody či efektivního hospodaření s půdou. Jednou z oblastí je precizní zemědělství, kde je důležitým faktorem monitoring půdy. Použití UAV umožňuje pořizovat snímky konkrétních oblastí specifických plodin, které lze následně analyzovat a prakticky využít (Pechanec a kol., 2014). Přínosem technologie je rychlejší rozhodování, což umožňuje efektivnější aplikaci zemědělských vstupů a případnou podporu čtyř pilířů zemědělství, tedy uplatnění správných prostředků, na správném místě, ve správný čas a ve správném množství (Tsouros a kol., 2019). Nasbíraná data mohou pomoci určit informace týkající se půdních typů, půdních živin, půdní vlhkosti, topografických indexů povrchu a případně také aktuálního stavu plodin nebo odhadu výnosu (Pechanec a kol., 2014).

Další oblastí je monitoring vodních ekosystémů. Data získaná pomocí UAV poskytují přehledné časoprostorové pohledy a jejich integrace zpravidla vede k lepšímu pochopení ekologie vodních nádrží a kvality jejich vody. Odvětví dálkového průzkumu Země tímto získává stále větší povědomí o analýze vodních ploch. Bepilotní prostředky lze tedy konkrétně využít pro snímání indikátorů vodních ploch, jako je například průhlednost vody, z čehož lze odvodit nerozpuštěné částice, barevnou nerozpuštěnou organickou hmotu, koeficient difuzního útlumu či obecně zákal. Dále lze monitorovat také biotu, tedy fytoplankton, vegetace pod a nad hladinou a sinice. Indikovat je možno také teplotu vody či fenologii ledu (Dörnhöfer a Oppelt, 2016).

Bezpilotní prostředky jsou také využívány v oblasti monitorování ledovců a celkově polárních oblastí. Glaciologické studie založené na práci s daty z bezpilotních prostředků nabývají na oblibě díky výhodám oproti konvenčním platformám dálkového průzkumu (Bhardwaj a kol., 2016). Satelitní pozorování neumožňuje pracovat s dostatečně detailními daty, zatímco technologie založené na strukturách pohybu a detekci měření vzdálenosti založené na bezpilotních leteckých prostředcích způsobily revoluci v geovědním výzkumu, zejména v méně přístupných polárních oblastech (Li a kol., 2020). UAV jsou snadněji využitelné také kvůli možnosti střídání senzorů fungujících ve viditelných, infračervených a mikrovlnných vlnových délkách. Data s vysokým prostorovým rozlišením získaná z těchto senzorů přenášených bezpilotními prostředky jsou značným zlepšením oproti údajům získaným tradičním dálkovým průzkumem (Bhardwaj a kol., 2016).

Dalším možným využitím dronů v oblasti ochrany životního prostředí je monitoring fauny a flory. UAVs jsou využívány například ke sběru dat o populacích mořských ptáků a ploutvonožců v těžko dostupných antarktických oblastech. Implementace autopilotovaného prostředku umožňuje shromáždění vysoce kvalitního materiálu, který je následně využitelný například pro kvantitativní analýzu populací zmíněné fauny (Korczak-Abshire a kol., 2019). Uplatnění UAVs je samozřejmě také při studiích vyložené mořské fauny, kdy jsou pomocí nasbíraných dat odhadovány populační hustoty žraloků a rejnoků v ekosystémech korálových útesů. Tímto se ukazuje, že je možno produkovat důležitá data nezávislá na rybolovu, a to tedy zejména v mělkých vodních stanovištích (Kiszka a kol., 2016).

V případě flory jsou bezpilotní prostředky značným přínosem pro výzkum invazivních rostlin, které představují jednu z hlavních příčin ztráty biologické rozmanitosti skrz degradaci původních rostlinných druhů. Jsou sbírána data i v těžko přístupných horských a pobřežních oblastech, ze kterých je následně možno analyzovat parametry šíření těchto rostlin, což přispívá k efektivnějšímu boji s nimi (Wu a kol., 2019).

3.8 Podobné studie

Výzkumná činnost prováděna v posledních letech často využívá pro sběr potřebných dat dron od firmy DJI Phantom 4 RTK, kterým byla nasbírána data i pro tuto práci. Existují studie zabývající se výzkumem přesnosti tohoto dronu. Za zmínku stojí konkrétně dvě studie z roku 2019 a 2020, které porovnávají přesnosti právě georeferenčních metod GCPs a RTK.

3.8.1 „Measurement Accuracy of the DJI Phantom 4 RTK and Photogrammetry“

Zde byla srovnána přesnost georeferenčních metod GCPs a RTK. Bylo provedeno celkem 32 letů ve výšce 33 m nad pochozí střechou budovy, a to v režimu 2D i 3D, kdy každý z letů hodnotil vliv výšky letu, překrytí a počet snímků na výslednou přesnost. Nasbíraná data byla použita k výpočtu horizontální i vertikální přesnosti měřených bodů. Při pořizování a zpracování dat byl použit software balíček DroneDeploy. Primárním cílem studie bylo prokázat vyšší efektivitu a celkovou přesnost měření dronem DJI Phantom 4 RTK v režimu RTK oproti tradičním metodám snímání založeným na GPS.

Na pochozí střechu bylo umístěno celkem sedm vřícovacích bodů. Body byly umístěny na různé nadmořské výšky, zeměpisné šířky a délky, aby bylo možné co nejlépe zachytit různé scénáře. Mimoto byly na střechu umístěny další čtyři kontrolní body, kdy byla zaměřena vzdálenost mezi nimi. Poloha všech bodů byla následně zjištěna pomocí jednotky pro identifikaci polohy Trimble RTX GPS. Zaměřené GCP body měly průměrnou horizontální směrodatnou odchylku 0,24 centimetru a vertikální 0,49 cm. Jako GNSS přijímač byl použit Trimble Catalyst, který je snadno ovládán skrz jakékoliv Android zařízení a dosahuje přesnosti jeden až dva centimetry.

V případě metody RTK bylo v celkovém průměru dosaženo relativní vertikální přesnosti 2 cm a horizontální 1,2 cm. Ve srovnání s metodou vřícovacích bodů není tak značný rozdíl, jelikož zde bylo dosaženo relativní vertikální přesnosti 1,95 centimetru a horizontální 0,9 cm. Konečný rozdíl mezi oběma metodami byl v průměru 1,09 cm, což je ve výsledku 0,1 %. Průměrná odchylka pro RTK vyšla 3,65 cm, tedy 0,27 % rozdíl oproti skutečnosti. V případě použití GCPs se jednalo o 3 cm.

Pro porovnání 2D a 3D bylo pro každou z variant uskutečněno pět letů v režimu RTK. Průměrná chyba lineárního měření pro 2D let byla 3,57 cm, neboli 0,26 % a pro 3D se jednalo o 3,73 cm, tedy 0,28 %. Odchylna není tedy statisticky významná.

Závěrem lze říci, že pomocí dronu DJI Phantom 4 RTK čistě v režimu RTK můžeme dosáhnout průměrné relativní přesnosti okolo dvou centimetrů, ovšem pro zpřesnění výsledku se doporučuje použití minimálně jednoho až dvou vlíčovacích bodů (Mulakala, 2019).

3.8.2 „Evaluation of the Georeferencing Accuracy of a Photogrammetric Model Using a Quadcopter with Onboard GNSS RTK“

Tato studie má za cíl zhodnotit výsledky měření, kterých bylo dosaženo pomocí již zmíněné kvadrokoptéry DJI Phantom 4 RTK. Porovnány byly georeferenční metody RTK, GCPs a také jejich kombinace.

Pro pořízení snímků byly provedeny tři lety pro dvě území, a to městského a venkovského charakteru, spolu se třemi výpočty pro každý let. Pro experiment byly použity dvě zájmové oblasti o rozloze zhruba 90 000 metrů čtverečních. Předpokládaná výška letu byla 110 metrů, a to z důvodu získání celého obrazu plochy během jednoho letu, s očekávanou přesností měření GNSS RTK přibližně 0,03 metru horizontální a 0,04 metru ve vertikálním směru (Štroner a kol, 2020).

Santise a kolektiv (2014) ve své práci uvádí, že obecně dosažitelná přesnost horizontální 0,5 – 1 GSD (Ground Sample Distance) a vertikální 1,5 – 2 GSD odpovídá výšce letu přibližně 100 metrů a velikosti pixelu asi 0,03 metru.

Potřebné překrytí snímků bylo v tomto případě 60 % v obou směrech. Počet snímků byl vždy 400 na jeden let. GNSS RTK přijímač byl připojen k síti stálých referenčních stanic CZEPOS. Zaměření vlíčovacích bodů bylo provedeno pomocí GNSS RTK Trimble Geo XR přijímače s anténou Zephyr 2, připojené k CZEPOS. Dále byly použity dva typy kontrolních bodů. Jeden pro ověření horizontální přesnosti a druhý pro vertikální. Jelikož byly pro každou oblast provedeny tři lety, byly také vytvořeny tři sady měření zájmové oblasti pro varianty výpočtů.

Pro konečné vyhodnocení výsledků bylo nutné vzájemně porovnat výsledná mračna bodů z jednotlivých metod výpočtu. Směrodatná odchylka byla prakticky stejná pro všechny varianty. V průměru se jednalo o hodnotu 0,22 metru. Modely byly vzájemně posunuty pouze ve vertikálním směru.

Ze srovnání všech variant je zřejmé, že varianta RTK je vždy systematicky posunuta oproti GCP a kombinované variantě a v případě venkovského prostředí byl posun výrazně vyšší z důvodu nižší vhodnosti terénu pro zpracování Structure from Motion. V tomto případě se nejednalo o systematickou chybu, ale důvodem byla nedokonalá automatická optimalizace.

Při porovnání metod výpočtu jsou výsledky velmi podobné. Pouze u varianty RTK jsou opět výsledky pro venkovskou oblast horší než pro městskou. Jinak se standartní odchylky prakticky rovnají GSD a systematické chyby jsou ve srovnání s GDS zanedbatelné. Model ve variantě RTK nebyl deformován. Vertikálnímu posunu lze předejít zakomponováním vřícovacích bodů, které problém napravily ve všech případech a v některých při použití pouze jednoho. Příkladem toho byl jeden z letů ve venkovské oblasti se systematickým vertikálním posunem 0,14 metru, kdy při přidání jednoho GCP systematický vertikální posun klesl na 0,02 metru, čímž byl model umístěn víceméně správně.

Obecně u UAV vybavených metrickými kamerami, kde je vyšší úroveň kvality předkalibrace a ostatních nastavení, lze očekávat tvorbu kvalitnějších a přesnějších modelů i bez použití GCPs. Ovšem z důvodu rizika chyby je v každém případě doporučeno použití alespoň menšího počtu GCP.

Multikoptéry vybavené GNSS RTK, jejichž nižší cestovní rychlost a vyšší stabilita (ve srovnání s bezpilotními letouny s pevným křídlem) naznačuje vhodnější přímé zpracování získaných snímků bez potřeby GCP, což bylo hlavní hypotézou této studie. Výsledky však dokazují, že využití varianty RTK bez externího ověření je potenciaálně velmi nebezpečné, převážně díky možnému systematickému posunu celého mračna bodů ve vertikální složce. Horizontální složka byla v tomto případě prakticky nezměněna. "

Po hloubkovém srovnání výsledků a analyzování důvodu jejich rozdílů bylo zjištěno, že vertikální chyba se zvyšuje s klesající vhodností terénu pro zpracování Structure from Motion. Této chybě lze předejít použitím i malého počtu kontrolních bodů

nebo při použití optimální sestavy kalibračních parametrů pro nemetrickou kameru, které byly zpětně odvozeny od nejlepší varianty výpočtu. To vše značí, že při použití metrických kamer, které lze optimálně předkalibrovat, může být dosaženo vynikajících výsledků i bez použití vlíčovacích bodů. Dále je možno konstatovat, že při použití GCPs je horizontální a vertikální přesnost prakticky shodná s GSD, v tomto případě 0,3 metru. Nejlepšího modelu bylo dosaženo kombinací metod výpočtu při využití souřadnic vlíčovacích bodů a GNSS RTK (Štroner a kol, 2020).

4. Charakteristika zájmové krajiny a objektů

Objekty, které byly předmětem měření a následné digitalizace, se nachází u obce Milostovice u Opavy. Jedná se o dvě vojenská opevnění z období druhé světové války. Konkrétně jde o objekt těžkého opevnění OP-S 25 „U Trigonometru“ a v těsné blízkosti se nacházející menší objekt lehkého opevnění vz. 37 zvaný řopík (viz obrázek 1).



Obrázek 1: vojenské opevnění OP-S 25 (v pozadí) a vz.37 zvané řopík (v popředí)

4.1 Geografická poloha zájmového území

Linie stavebního úseku opevnění Opavy, která leží v Moravskoslezském kraji, se táhne severovýchodně až severozápadně v blízkosti města Opavy, v pásu hranice s nynějším Polskem. Zmíněná vojenská opevnění se z hlediska geomorfologie nachází v provincii Středoevropská nížina. Řádově nižší jednotkou je Slezská nížina. Jako geomorfologický celek je vymezena Poopavská nížina (Bína a Demek, 2012).

Pohraniční opevnění, které probíhá severně kolem města Opavy, je řazeno právě do Poopavské nížiny, která se nachází ve střední části Opavské pahorkatiny. Dominují zde pole, louky a podél řeky Opavy převážně břehové porosty (Demek a Mackovičín, 2006).

4.2 Vojenská opevnění

Opevnění OP-S 25 „U Trigonometru“ bylo postaveno jako první z objektů třetího stavebního podúseku Milostovice. Stavba spadala do kategorie odolnosti III., což značí tloušťku stropů 250 centimetrů, čelní stěny 275 centimetrů a stěn ostatních 125 centimetrů. Jedná se o dvouzvonový, oboustranný, dvoukřídový objekt. Betonáž proběhla v květnu roku 1938, kdy do připraveného bednění bylo vpraveno 1807 metrů krychlových betonu. Po necelém měsíci tuhnutí vykazoval pevnost v tlaku až 650 kg/cm^2 (Durčák a Gregar, 1998). Lehké opevnění vz. 37 zvané řopík vychází z úspěšně řešeného tvaru srubu těžkého opevnění. Tento řopík byl vybudován jako oboustranný objekt se zesílenými bočními stěnami (Aron a kol., 1998).

Oba zmíněné objekty jsou specifické svou kompozicí. Pro 3D modelaci jsou zajímavé především díky svému začlenění do terénu.

5. Metodika

5.1 Použité pomůcky

5.1.1 Dron DJI Phantom 4 RTK

Tento dron, určený primárně pro využití v zemědělství, geodézii, fotogrammetrii a objektů, vyšel ze staršího modelu Phantom 4 Pro V2. Kvadrokoptéra je vybavena RTK modulem, skrz který dokáže určit polohu s přesností až 3 centimetry horizontálně a 5 centimetrů vertikálně. Kapacita baterie dovolí dronu přibližně 30 minut ve vzduchu. Je osazen 20 megapixelovou kamerou s jednopalcovým CMOS senzorem. Díky funkci Operation Resumption se dokáže vrátit na stejné místo (například po výměně baterie). Ovladač je vybaven zobrazovacím zařízením, kde je nainstalován operační systém Android pro možnost provozu aplikace DJI MG (Kocourek a Řešátko, 2021).

5.1.2 GNSS přijímač Trimble R8

Tento přijímač je založen na technologii Trimble Maxwell. Přijímač umožňuje příjem signálu GPS L2C. Podporuje japonský QZSS, GLONASS, Galileo a BeiDou. Díky tomu lze sledovat více družic a tím dosahovat vyšší kvality měření. Snadnější zachycování a sledování signálu je možné skrz frekvenci GPS L5, která poskytne vyšší hladinu výkonu oproti ostatním frekvencím a využívá větší vlnové šířky, což umožní delší kódy. (Trimble ©2022). S přijímačem byl použit také záznamník TSC2.

5.1.3 Pozemní vlíčovací body

Jako GCP byly použity speciální čtvercové plachty o délce stran 50 cm. Plachty disponují černobílým šachovnicovým vzorem o čtyřech čtvercích. V jejich středu a rozích se nachází kroužky pro zjednodušení zaměření GNSS přijímačem a uchycení pomocí kovových kolíků.

5.2 Použitý Software

5.2.1 DJI Terra Pro Overseas Perpetual

Jedná se o mapovací software pro analýzu a vizualizaci fotogrammetrických dat. Má možnost pracovat s více než 8500 koordinačních systémů pro výstup souřadnic téměř v jakémkoliv formátu. Generuje 2D orthomozaiky a 3D modely v reálném čase

či s pomocí pozemních kontrolních bodů. Při práci s daty z dronu DJI Phantom 4 RTK generuje 3D bodové mračno také v reálném čase. Nabízí možnosti jako 2D a 3D měření pozic, vzdáleností a hloubek mas, či přidávání anotací a štítků do mapy (DJI ©2022).

5.2.2 CloudCompare v2.11.3 (Anoia)

CloudCompare je software pro zpracování 3D mračna bodů a trojúhelníkové povrchové sítě. Původně byl navržen k provádění srovnání dvou hustých 3D mračen bodů, která byla získána například pomocí laserového měření. Následně byl software rozšířen pro zpracování mračen bodů při použití mnoha pokročilých algoritmů, jako je registrace, výpočet statistik, interaktivní nebo automatická segmentace či vylepšení zobrazení (CloudCompare ©2022).

5.2.3. ArcMap 10.7.1

Jde o jednu z centrálních aplikací používaných v ArcGis Desktop. V prostředí tohoto software lze zobrazovat a prozkoumávat datové sady GIS pro konkrétní studijní oblast, kde je možno přiřazovat symboly a vytvářet rozvržení map pro tisk či publikaci. ArcMap je také aplikace, kterou je možno využít pro vytváření a úpravu datových sad. Představuje také geografické informace, jako je kolekce vrstev a dalších prvků v mapě. Mezi běžné mapové prvky patří datový rámeček obsahující mapové vrstvy pro daný rozsah, včetně měřítka, severky, popisků, legendy symbolů a tak dále (Esri ©2021).

5.3 Sběr dat

Potřebná fotogrammetrická data byla pořízena za pomoci dronu DJI Phantom 4 RTK. Pro každý objekt byly naplánovány a provedeny dva automatizované lety, jejichž trasy byly naplánovány přímo v terénu. Do prostoru na, a kolem objektů bylo umístěno celkem osm terčů v poměrně stejném rozmístění, kdy většina z nich byla při následném zpracování použita jako vličovací body. Každý z terčů byl zaměřen GNSS přijímačem Trimble R8, čímž byly zjištěny jejich souřadnice. Zaměřeny byly také některé významné body případně další zpřesnění. Tyto souřadnice jsou dále brány jako referenční pro jednotlivá srovnání konkrétních metod.

Jako první krok byla před samotným letem provedena kalibrace dronu. Na vysílači byla jako plánovací metoda zvolena 3D fotogrammetrie. Na obrazovce se zobrazila

ortofoto mapa s označenou polohou letu, kde bylo následně bodově ohraničeno předmětné území. Po zadání parametru výšky 30 m (GSD 0,82 cm/pixel) byly zobrazeny údaje jako rozloha vybraného území, předpokládaný čas letu, počet snímků, které budou pořízeny a rychlost letu. Poté bylo možno misi spustit.

Prvním letem bylo provedeno pouze GNSS měření a při druhém letu byla aktivována funkce pro výpočet polohy RTK. Pokud došlo k poklesu kapacity baterie na minimální hranici, dron se vrátil na počáteční pozici, baterie byla vyměněna a dron po vzletu pokračoval ve snímkování z místa přerušení. V případě náletu většího opevnění OP-S 25 bylo pro GNSS pořízeno 547 snímků a pro RTK 469. U řopíku se u GNSS jednalo o 175 snímků a u RTK o 187 snímků. Po provedení letů byla na SD kartu zapsána data ve formě fotografií a souborů nesoucích informace o jejich pozici. Tím bylo získáno vše potřebné pro následnou tvorbu mračen bodů a konečných 3D modelů.

Dále byl proveden poslední manuálně řízený let, při kterém byly pořízeny ukázkové fotografie, a to až z maximální možné letové výšky 120 metrů.

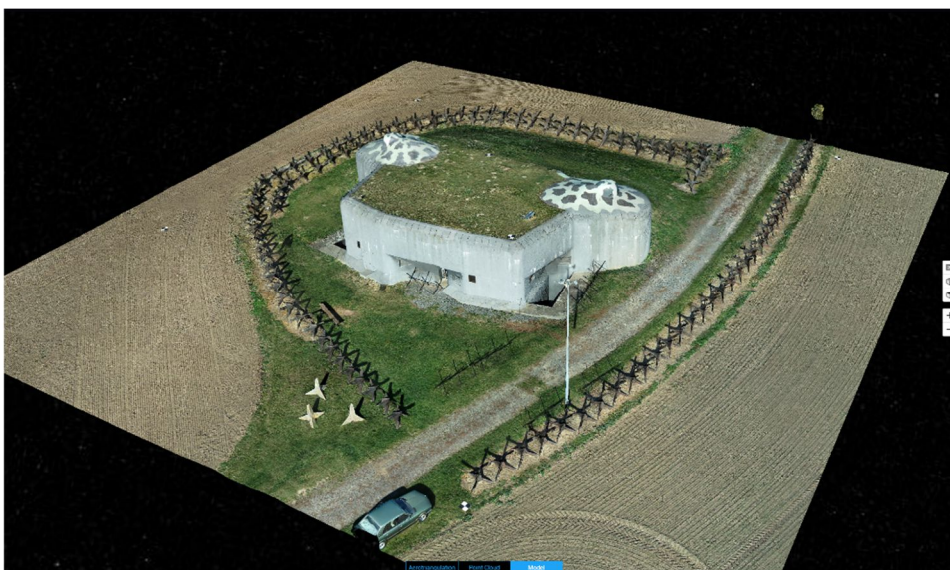
5.4 Tvorba výsledných modelů a mračen bodů

Tímto postupem bylo kladeno za cíl vytvořit čtyři bodová mračna a 3D modely pro každý z objektů. První model byl vytvořen za pomoci dat z čistě GNSS náletu, tedy získání polohy pouze ze satelitů. Dále se jednalo o GNSS, které bylo zpřesněno o vlíčovací body. Poté byla pro další model zpracována data z GNSS zpřesněna o výpočet RTK a jako poslední varianta byla využita kombinace RTK a vlíčovacích bodů. Mračna budou využita pro vzájemné porovnání, kdy jako reference bude brána nejpreciznější předpokládaná metoda RTK GCP. Z modelů pak budou zjištěny souřadnice konkrétních vlíčovacích a kontrolních bodů, které budou porovnány s body zaměřenými pomocí GPS. Pro tvorbu modelů a mračen bodů byl zvolen software DJI Terra Pro ve verzi Overseas perpetual. V programu byla založena nová zakázka s misí typu 3D model. Dále byla vložena data z konkrétního letu, tedy snímky a soubory s informacemi o jejich poloze (formáty .bin, .RINEX, .obs).

Poté se na podkladové mapě zobrazí geotagy jednotlivých snímků. Na boční liště byla nastavena mapová scéna (normal) a metoda počítání (standart). Vstupní data jsou v souřadnicovém systému WGS84 (World geodetic systém 1984), ovšem pro výstup byl zvolen souřadnicový systém S-JTSK/Krovak East North

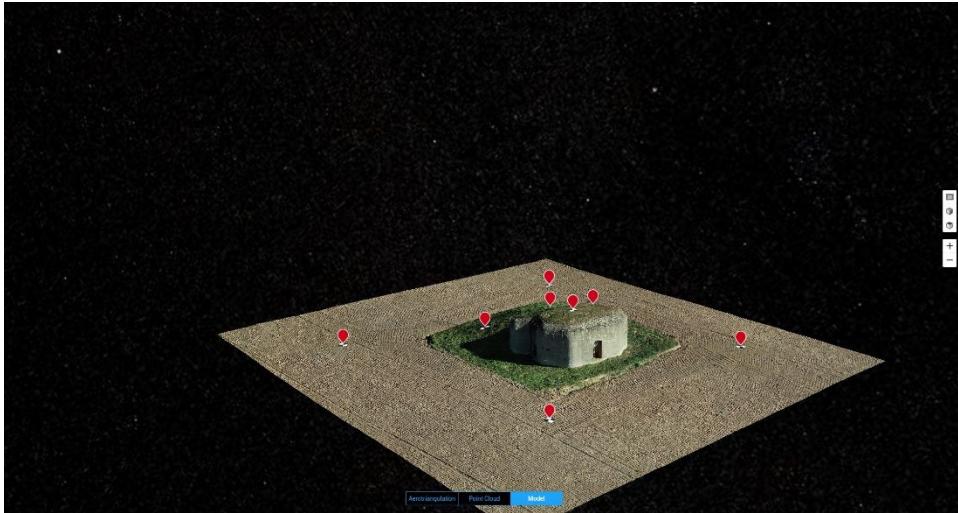
(Souřadnicový systém Jednotné trigonometrické sítě katastrální). V případě využití zpřesnění pomocí GCP je vybrán soubor nesoucí informace o jejich poloze. Dále se objeví zobrazení pozic kamer a spustí se aerotriangulace. Tímto je vytvořeno potřebné řídké bodové mračno. V případě potřeby byly nahrány GCPs, jejichž souřadnice jsou v minusových hodnotách, jelikož souřadnicový systém Křovák je nastaven na III. kvadrant. Následně jsou jednotlivé vlíčovací body georeferencovány na jednotlivé fotografie, čímž je zpřesněna jejich pozice. U každého z bodů je zobrazena reprojekční chyba a 3D bodová chyba, což je rozdíl mezi souřadnicemi vlíčovacího bodu a bodu kliku v projektu v pixelech a metrech. S každým dalším napasovaným bodem se tyto chyby zmenšují. Tento krok se potvrdí optimalizací a bodové mračno je zapasováno na upřesněné souřadnice vlíčovacích bodů.

Dle potřeby je mračno oříznuto na potřebné zájmové území z důvodu snížení času výpočtu modelu. Výstupní formát pro bodové mračno je zvolen .las a pro 3D model .obj. Následně proběhne výpočet, po jehož dokončení získáme husté bodové mračno a samotný 3D model včetně textur (viz obrázek 2).



Obrázek 2: vizualizace konečného 3D modelu objektu OP-S 25 v prostředí programu DJI Terra

Tímto způsobem byly vytvořeny čtyři bodová mračna 3D modely, každý pomocí jednoho způsobu georeference. Celkem tedy pro oba objekty osm mračen a modelů. Z modelů byly pomocí nástroje Measurement zjištěny souřadnice bodů potřebných k porovnání (viz obrázek 3), které byly vyexportovány v podobě textového souboru. Mračna budou využita pro vzájemné porovnání v programu CloudCompare.



Obrázek 3: znázornění výběru a zaměření souřadnic jednotlivých bodů k porovnání v prostředí programu DJI Terra

5.5 Porovnání mračen bodů

Pro tento postup byl zvolen již zmíněný software CloudCompare. Do programu byla nahrána veškerá bodová mračna, a to v defaultním nastavení a originálním souřadnicovém systému. Jako další krok byla všechna mračna oříznuta podle nejmenšího z nich, aby nebyl přesah jednotlivých mračen po porovnání zaznamenán jako rozdíl. Pomocí nástroje Compute cloud/cloud distance jsou porovnávána jednotlivá mračna mezi sebou, kdy jako referenční je bráno předpokládané nejpresnější mračno RTK GCP, se kterým jsou postupně porovnávána mračna ostatní. Rozsah hodnot odchýlení v metrech byl rozdělen do osmi tříd. Výsledkem porovnání je barevná vizualizace rozdílů, excelový soubor obsahující rozdělení počtu bodů do jednotlivých tříd dle rozsahu hodnot rozdílů a pak grafické znázornění poměru těchto hodnot. Tímto tedy bylo dosaženo obecných informací, jako celkový počet bodů mračna, maximální a minimální hodnoty odchylky a dopočten byl i procentuální poměr jednotlivých tříd.

5.6 Porovnání výsledných a referenčních souřadnic

Do souborů .csv byly vloženy zaměřené X a Y souřadnice bodů z jednotlivých modelů dle použitých metod georeference. K těmto souřadnicím byly přiřazeny referenční souřadnice bodů, které byly zaměřeny pomocí GNSS přijímače s průměrnou horizontální přesností 0,009 m a vertikální přesností 0,016 m. Tyto soubory byly následně jednotlivě nahrány do programu ArcMap, kde byl definován souřadnicový systém S-JTSK/Krovak East North a jednotlivé body byly vizualizovány. Pomocí nástroje XY to line byla vytvořena linie spojující naměřené body s těmi referenčními, čímž byla zjištěna vzdálenost přímočarého horizontálního odchýlení. Nástrojem Linear direction mean byla zjištěna hodnota Compass, tedy směr odchýlení ve stupních (0-360°).

5.7 Sumarizace výsledných hodnot

V excelovém soboru byl dle počtu bodů odchýlení bodových mračen dopočten procentuální poměr jednotlivých tříd. Bodové mračno, které bylo vytvořeno na základě nejpřesnější metody RTK GCP bylo bráno jako referenční. Tímto nám tedy vznikly hodnoty odchýlení pro metody GNSS, GNSS GCP a RTK. Získané hodnoty byly pro každý z objektů konečně sumarizovány do přehledné tabulky (tabulky 1 a 3).

Dále byly dopočteny rozdíly odchýlení jednotlivých bodů v horizontální a vertikální složce. Tyto hodnoty byly následně u každé z metod zprůměrovány a spolu s průměrem přímého horizontálního odchýlení a směru odchýlení byly sjednoceny do tabulek 2 a 4. Do těchto tabulek byla zaznamenána také dopočtená hodnota RMSE.

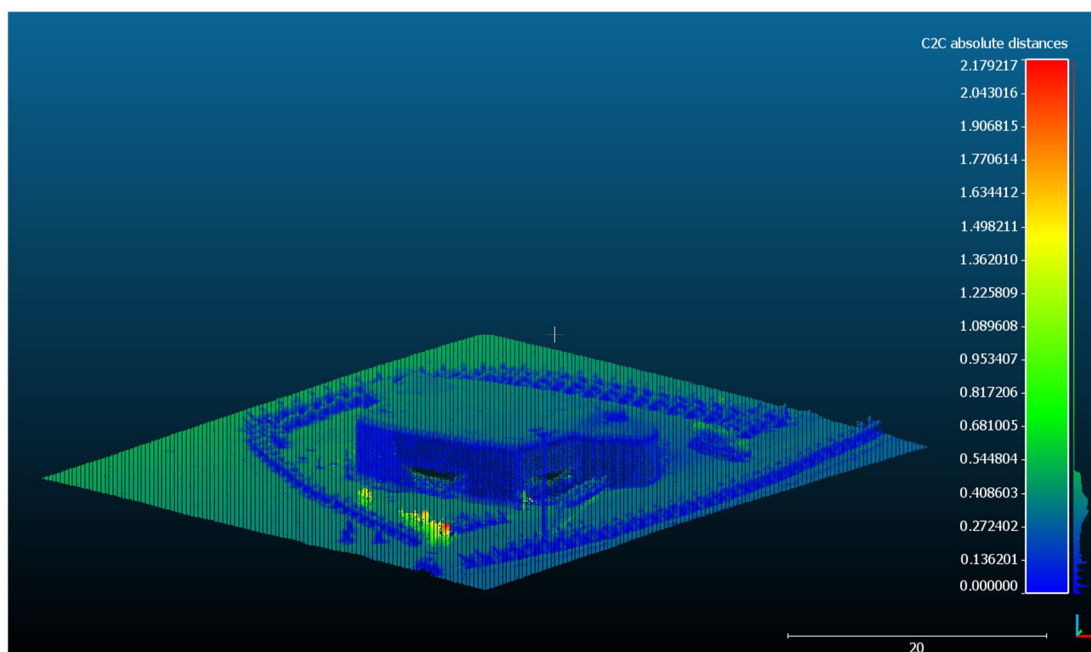
Veškeré naměřené hodnoty pro jednotlivé body a rozdíly mezi nimi jsou podrobně zaznamenány v tabulkách 15 – 12, které jsou uvedeny v příloze.

6. Výsledky

V této kapitole se nachází souhrnné konečné hodnoty pro oba zaměřené objekty. Pro každý z nich se jedná o barevnou vizualizaci odchýlení bodových mračen od referenčního bodového mračka vytvořeného pomocí metody RTK GCP, graf znázorňující rozdělení bodů mračka do osmi tříd dle míry odchýlení a konečná sumarizace zjištěných hodnot v podobě dvou tabulek.

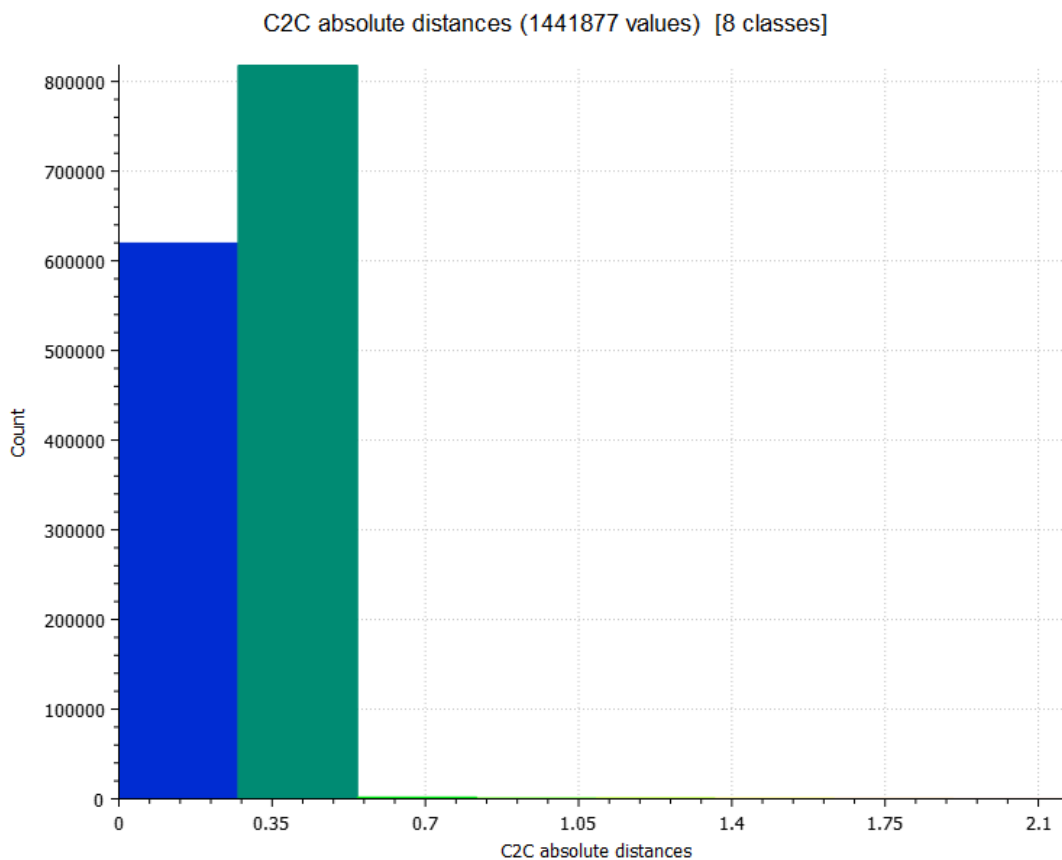
6.1 Měření objektu OP-S 25

Z modelu na obrázku 4 lze díky barevnému vyobrazení vyčíst rozdíl mezi bodovým mračnem vytvořeným na základě metody měření GNSS oproti referenčnímu bodovému mračnu RTK GCP. V pravé části se nachází barevná škála s rozpětím hodnot od 0 do 2,18 m. Odchýlení dosahovalo u většiny bodů maximální hodnoty 0,54 m tedy konkrétně v rozmezí 0 – 0,27 m se jednalo o necelých 43 % z celkového počtu bodů 1 441 877 a v rozmezí 0,28 – 0,54 m šlo o více než 56 %. Necelé 1 % z bodů zastupují hodnoty v rozmezí 0,55 – 2,18 m. Toto zanedbatelné procento tvoří pohyblivé prvky, jako jsou v tomto případě lidé pohybující se kolem objektu v době měření. Průměrná odchylka celého bodového mračka je 0,216 m.



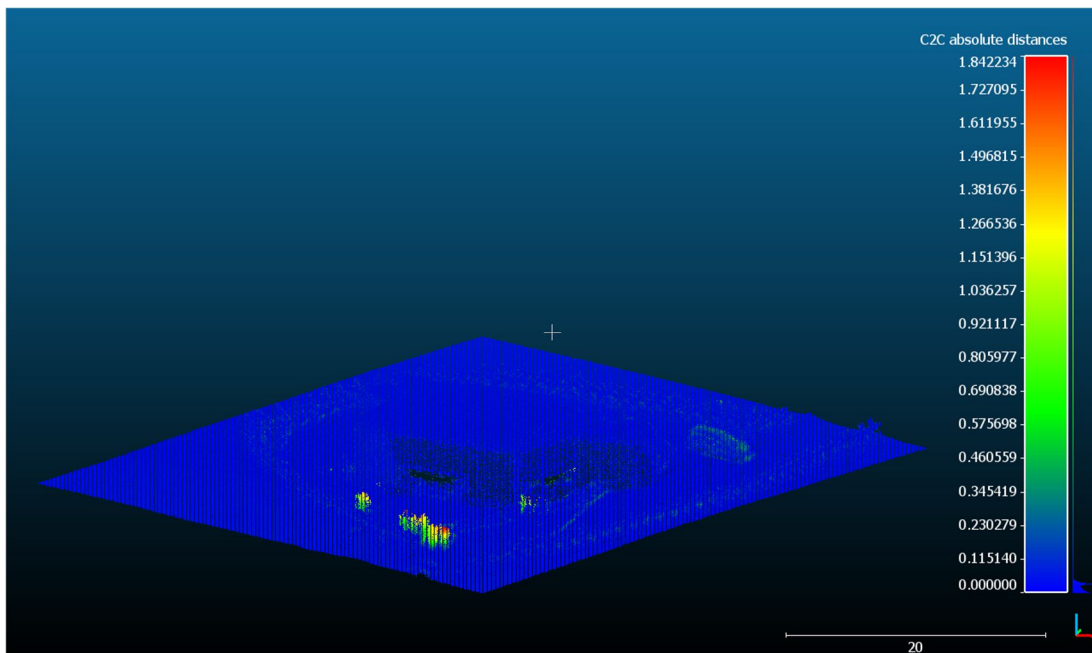
Obrázek 4: vizualizace odchýlení bodového mračka GNSS oproti referenčnímu RTK GCP v prostředí programu CloudCompare

Z grafického znázornění na obrázku 5 je patrná dominance prvních dvou z celkového počtu osmi tříd, tedy hodnot odchýlení 0 – 0,27 m a 0,28 – 0,54 m.



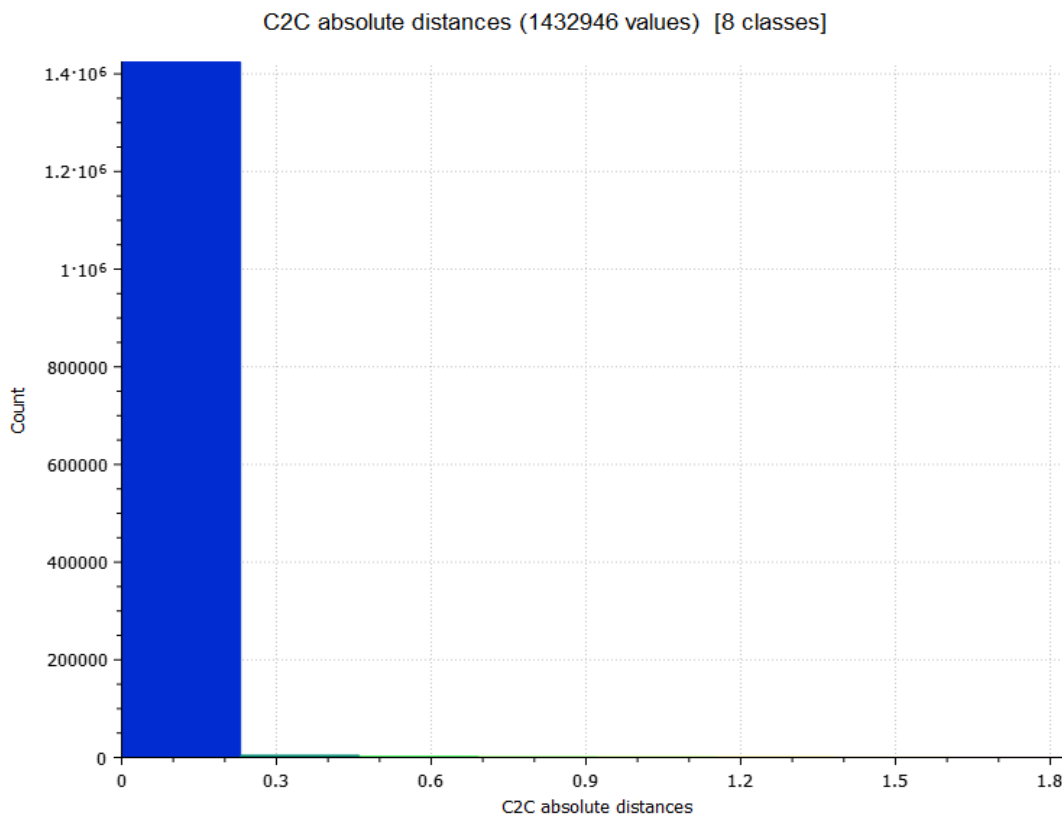
Obrázek 5: grafické znázornění odchýlení bodů mračka GNSS od RTK GCP dle počtu bodů k míře odchýlení

Z bodového mračka metody zaměření GNSS zpřesněné o vlíčovací body, vyobrazeného na obrázku 6, je na první pohled znatelná vyšší přesnost oproti samotnému GNSS měření. V tomto případě se jedná o 99,4 % zastoupení hodnot v rozmezí 0 – 0,23 m z celkového počtu bodů 1 432 946. Z barevné stupnice nacházející se po pravé straně je patrné, že většinová míra odchýlení dosahuje hodnot menších než 0,1 m. Zbylé necelé jedno procento, jak je i vidět, tvoří opět pohyblivá složka vyskytující se na místě v době měření. Maximální odchylka je zde 1,84 m, což odpovídá výšce člověka. V tomto případě je průměrné celkové odchýlení 0,004 m.



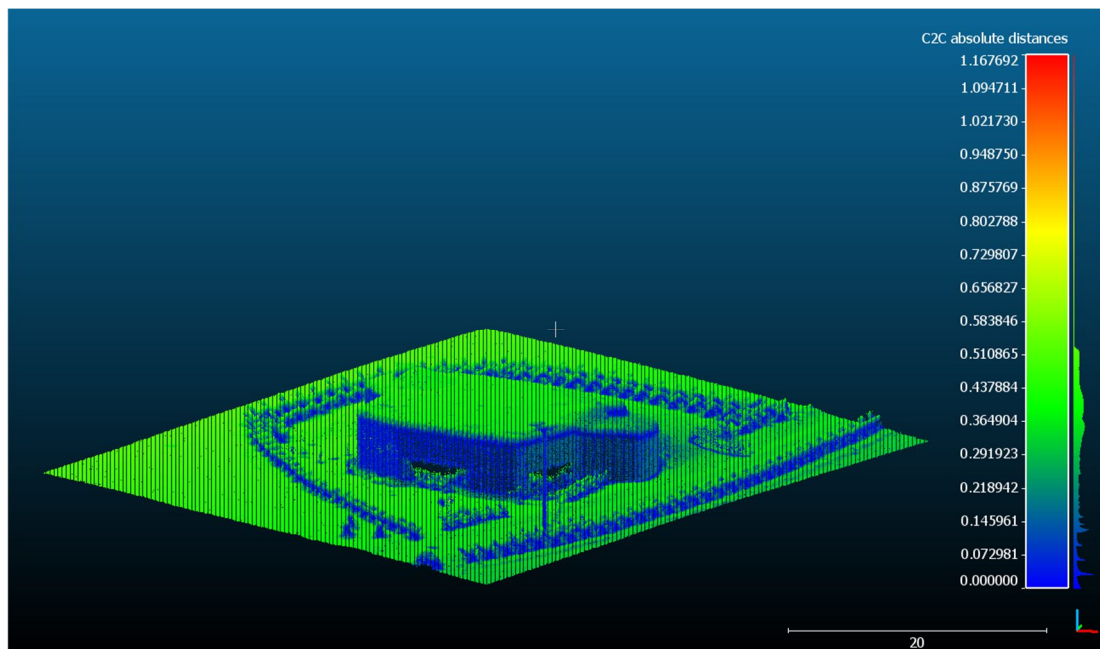
Obrázek 6: vizualizace odchýlení bodového mračka GNSS GCP oproti referenčnímu RTK GCP v prostředí programu CloudCompare

Graf na obrázku 7 jasně ukazuje většinové zastoupení první třídy, tedy bodů odchýlených v rozmezí 0 – 0,23 m. Oproti grafu na obrázku 5 je zřejmé značné zpřesnění.

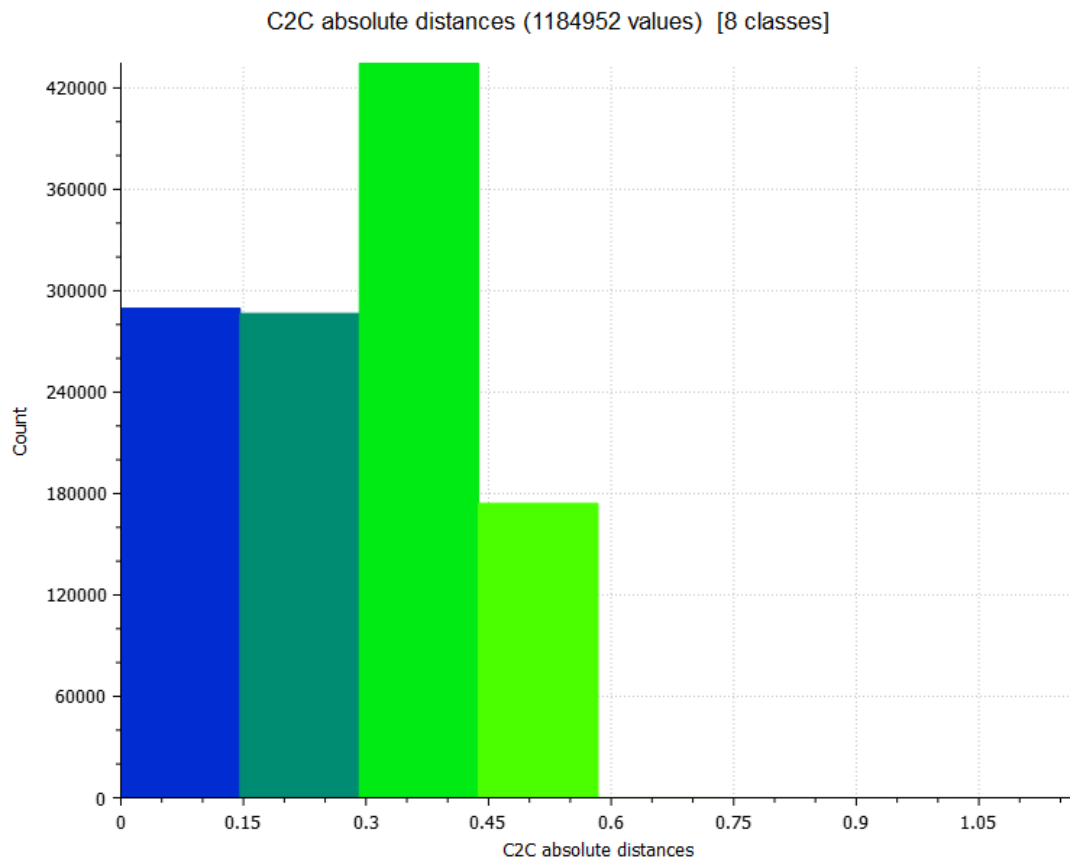


Obrázek 7: grafické znázornění odchýlení bodů mračka GNSS GCP od RTK GCP dle počtu bodů k míře odchýlení

Metoda RTK, tedy určování polohy za pomoci satelitů a připojení na síť referenčních stanic od poskytovatele CZEPOS pro získávání korekcí, dosahuje dle obrázku 8 na první pohled srovnatelných hodnot s metodou GNSS. Odchýlení bodů v 99,9 % případů dosahuje hodnoty maximálně 0,58 m. Tedy konkrétně z celkového počtu 1 184 952 bodů je 24,4 % odchýleno v rozmezí 0 – 0,14 m, 24,2 % v rozmezí 0,15 – 0,28 m, 37,7 % v rozmezí 0,29 – 0,43 a 14,7 % je odchýleno v rozmezí 0,44 – 0,58 m. Tento poměr je čitelný také z grafu na obrázku 9. Celkové průměrné odchýlení je zde 0,213 m.



Obrázek 8: vizualizace odchýlení bodového mračka RTK oproti referenčnímu RTK GCP v prostředí programu CloudCompare



Obrázek 9: grafické znázornění odchýlení bodů mračka RTK od RTK GCP dle počtu bodů k míře odchýlení

Ze srovnání bodových mraček vytvořených na základě určování polohy pomocí GNSS, GNSS GCP a RTK v tabulce 1, lze jako nejpřesnější z metod vyhodnotit měření GNSS zpřesněné o vlíčovací body. Je tedy patrné, že georeference na souřadnice vlíčovacích bodů značně zpřesní pozice bodů, kde se pak ve většinou pohybujeme v hodnotách odchýlení do 0,1 m. Metody GNSS a RTK jsou v tomto případě minimálně rozdílné a odchýlení dosahuje hodnot až 0,58 m, což v případě výpočtu v reálném čase je bráno jako velmi nepřesná hodnota. Ve všech třech případech se vyskytovaly body s odchylkou vyšší než 1 m, ovšem jednalo se o setiny procenta z celkového počtu bodů a jak bylo již zmíněno, tvořila jej pohyblivá složka nacházející se v blízkosti objektu v době měření.

Tabulka 1: shrnutí hodnot odchýlení dle tříd a jejich procentuální zastoupení pro jednotlivé metody

	GNSS		GNSS GCP		RTK	
	Rozmezí odchylky bodů [m]	Procentuální poměr [%]	Rozmezí odchylky bodů [m]	Procentuální poměr [%]	Rozmezí odchylky bodů [m]	Procentuální poměr [%]
1.	0 – 0,27	42,979	0 – 0,23	99,388	0 – 0,14	24,438
2.	0,28 – 0,54	56,729	0,24 – 0,46	0,308	0,15 – 0,28	24,182
3.	0,55 – 0,81	0,132	0,47 – 0,69	0,119	0,29 – 0,43	36,668
4.	0,82 – 1,08	0,052	0,70 – 0,92	0,067	0,44 – 0,58	14,702
5.	1,09 – 1,36	0,058	0,93 – 1,15	0,057	0,59 – 0,73	0,007
6.	1,37 – 1,63	0,031	1,16 – 1,38	0,045	0,74 – 0,87	0,001
7.	1,64 – 1,91	0,014	1,39 – 1,61	0,012	0,88 – 1,02	0,001
8.	1,92 – 2,18	0,005	1,62 – 1,84	0,004	1,03 – 1,16	0,001

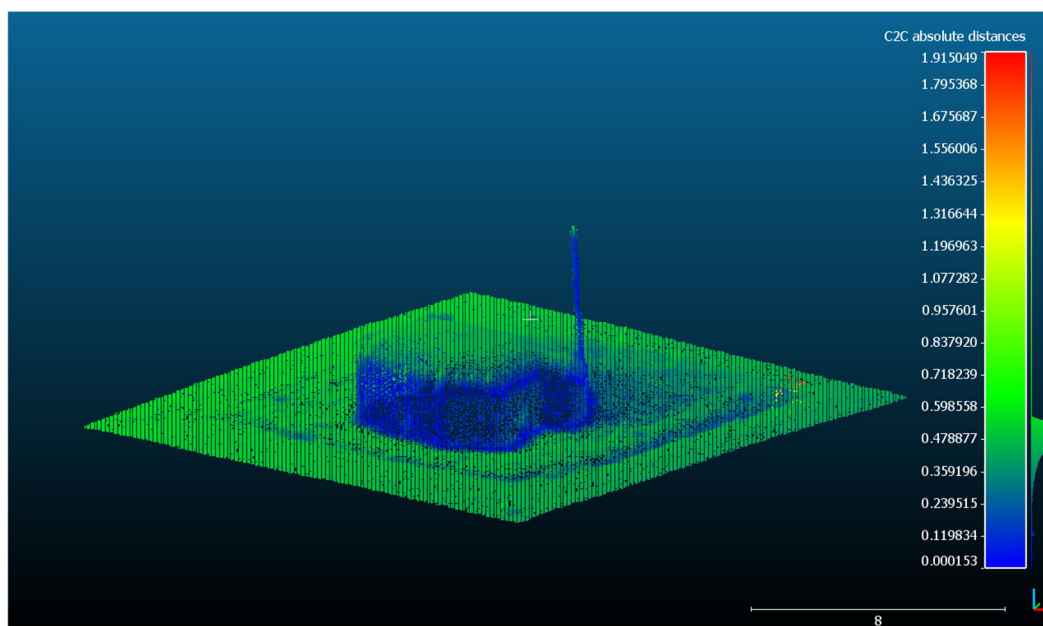
Tabulka 2 nám poskytuje porovnání všech čtyř metod skrz souhrn již konkrétních hodnot. Čísla byla získána porovnáním souřadnic zaměřených bodů pomocí GPS (s průměrnou horizontální přesností 0,009 m a vertikální 0,016 m) a souřadnic shodných bodů získaným měřením v modelech vytvořených pomocí jednotlivých georeferenčních metod. Hodnoty bodů každé z metod byly pro výsledné zhodnocení zprůměrovány. Veškeré hodnoty konkrétních zaměřených bodů se nachází v příloze 10.1. V tabulce 2 jsou tedy porovnány atributy jako je přímočará horizontální odchylka, směr odchýlení, odchylka na osách X, Y a Z a také hodnoty RMSE pro každou ze zmíněných os. Z výčtu výsledných hodnot je zřejmá podobnost dvojice metod GNSS a RTK, kde se v obou případech horizontální odchylka pohybuje okolo 0,2 m a vertikální 0,5 m. Stejně tak RMSE dosahují téměř shodných hodnot. Dvojice metod GNSS GCP a RTK GCP jsou si rovněž velmi podobné. Zde se pohybujeme u horizontální odchylky v hodnotách okolo 0,07 m a vertikální 0,1 m. V horizontální složce je nejpřesnější metoda RTK zpřesněná o vlíčovací body, ovšem ve vertikální složce je oproti GNSS GCP méně přesná o 0,033 m.

Tabulka 2: souhrn míry a směru odchýlení, včetně RMSE pro jednotlivé metody

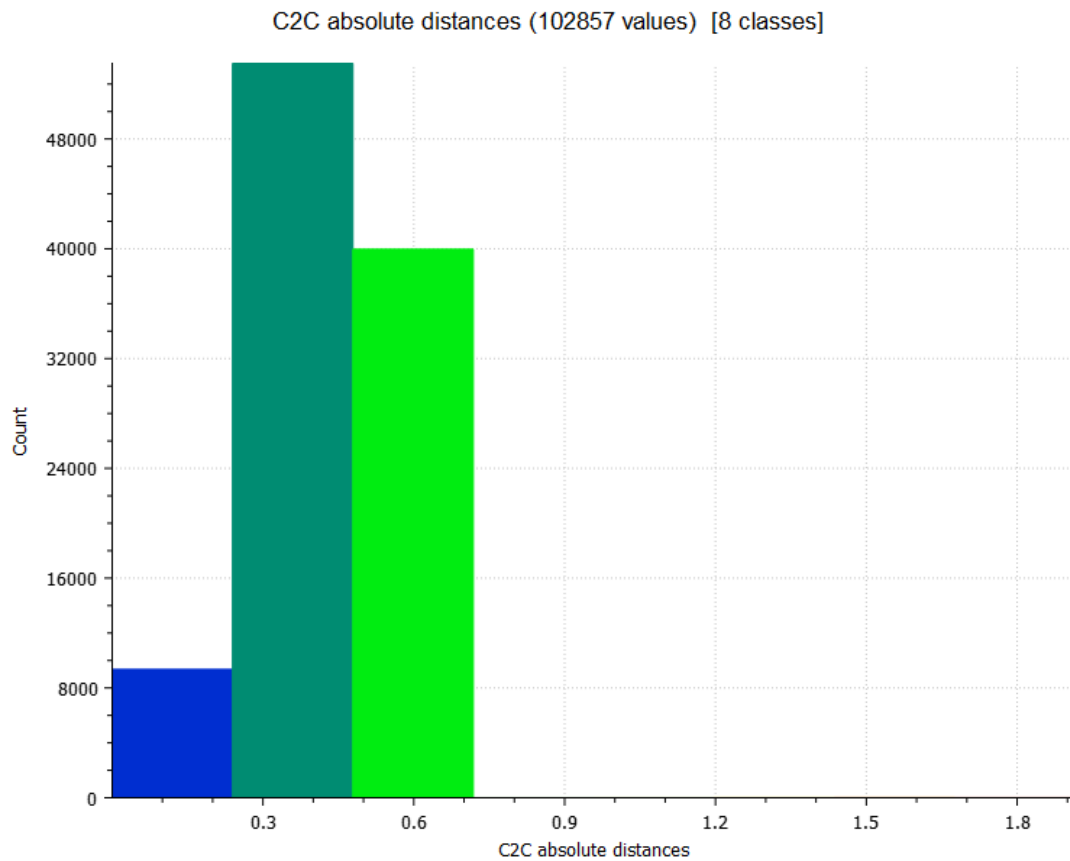
	GNSS	GNSS GCP	RTK	RTK GCP
∅ přímočará horizontální odchylka [m]	0,218	0,076	0,235	0,073
∅ směr odchýlení [°]	291,121	302,037	293,098	290,149
∅ odchylka na ose X [m]	0,202	0,064	0,216	0,07
∅ odchylka na ose Y [m]	0,078	0,039	0,092	0,028
∅ odchylka na ose Z [m]	0,493	0,089	0,518	0,122
RMSE – X	0,203	0,066	0,217	0,07
RMSE – Y	0,08	0,042	0,094	0,028
RMSE – Z	0,494	0,104	0,518	0,122

6.2 Měření objektu vz. 37 řopík

V případě vyhodnocení výsledků porovnání bodových mračen vojenského objektu zvaného řopík se pohybujeme v poměrně podobných hodnotách jako v případě objektu OP-S 25. V prvním případě srovnání bodového mračna GNSS opět s referenčním mračnem RTK GCP, jak je znatelné z obrázků 10 a 11, je z celkového počtu 102 857 bodů zastoupeno 9 % s odchylkou v rozmezí 0 – 0,24 m, 52 % s odchylkou 0,25 – 0,48 m a 38,8 % bodů je odchýleno v rozmezí 0,49 – 0,72 m. Zbylé necelé procento opět tvoří pohyblivá složka s maximální hodnotou 1,91 m. Průměrná odchylka zde dosahuje hodnoty 0,399 m.

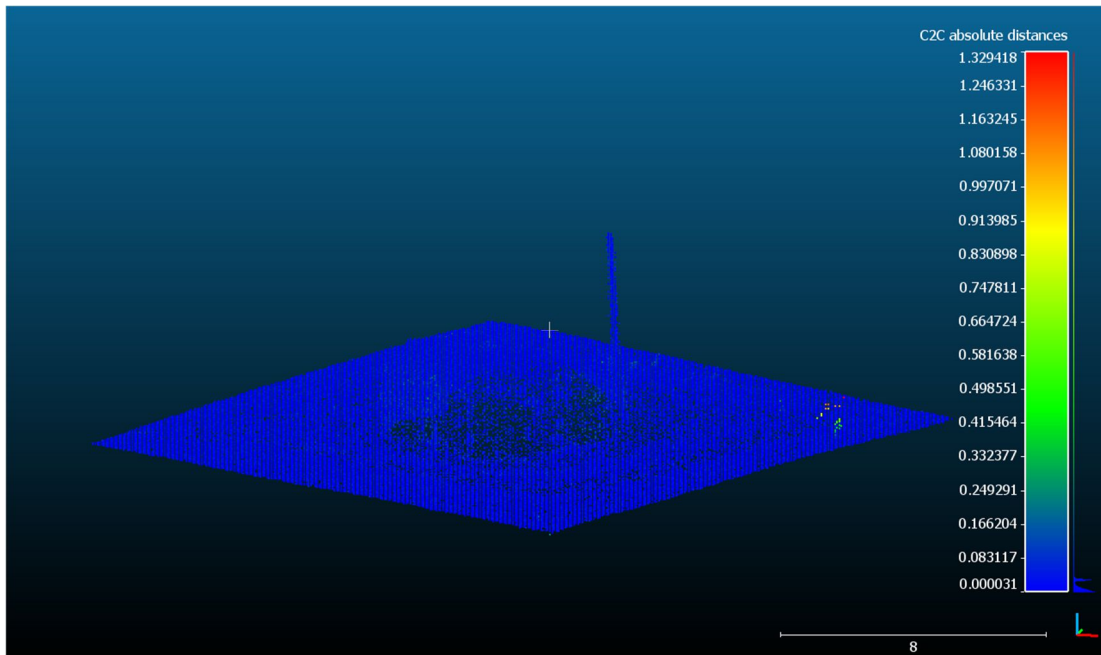


Obrázek 10: vizualizace odchýlení bodového mračna GNSS oproti referenčnímu RTK GCP v prostředí programu CloudCompare

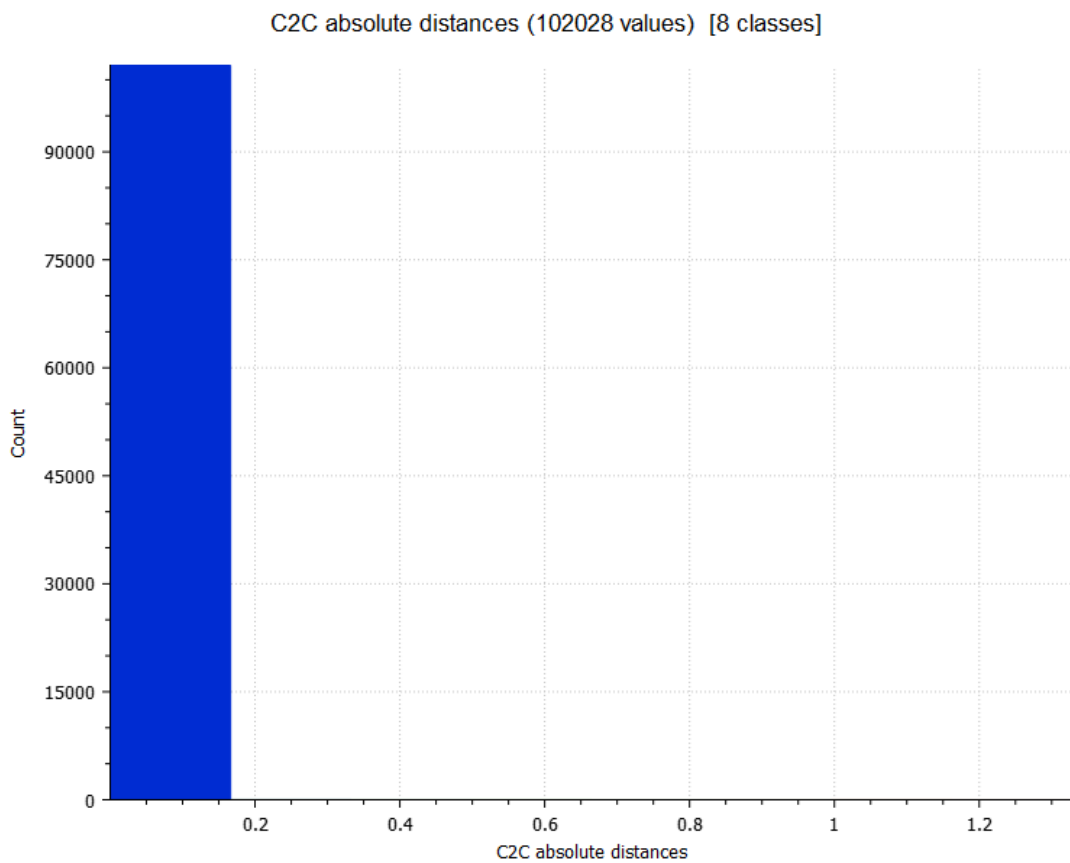


Obrázek 11: grafické znázornění odchýlení bodů mračka GNSS od RTK GCP dle počtu bodů k míře odchýlení

Bodové mračno metody GNSS zpřesněné o vlíčovací body je opět z těchto tří metod nej přesnější. Jak značí obrázky 12 a 13, z celkového počtu 102 028 bodů je 99,97 % odchýleno v rozmezí 0 – 0,16 m. Barevná škála na obrázku 12 vypovídá o faktu, že z tohoto rozmezí většina bodů dosahuje odchýlení blížící se těsně k nule a celkový průměr odchýlení zde činí 0,003 m

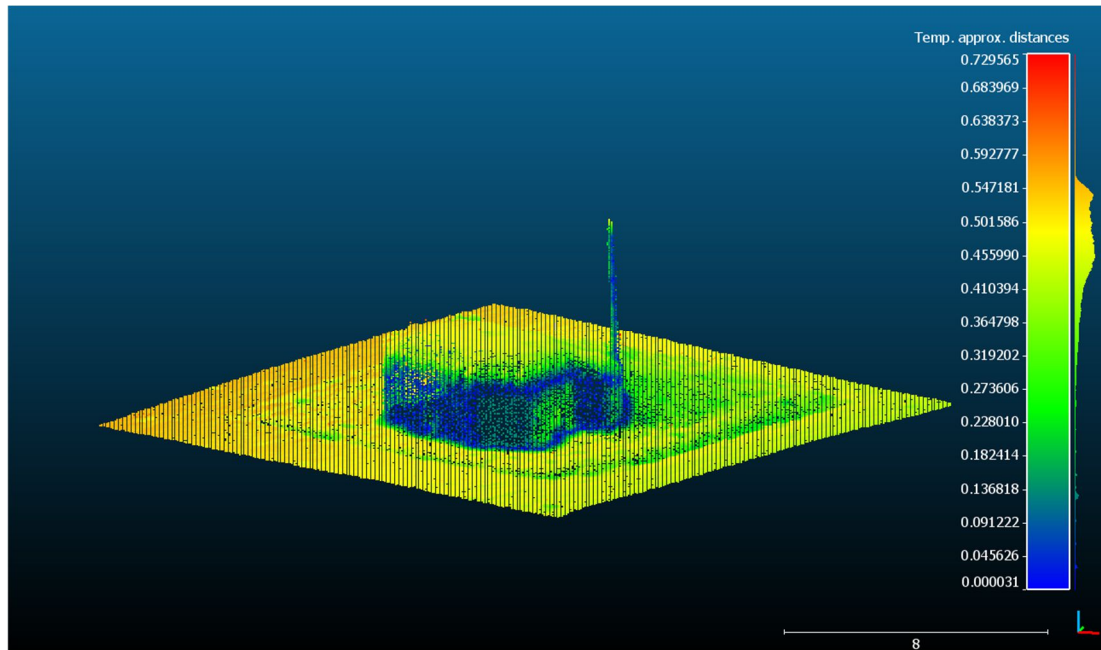


Obrázek 12: vizualizace odchýlení bodového mračka GNSS GCP oproti referenčnímu RTK GCP v prostředí programu CloudCompare

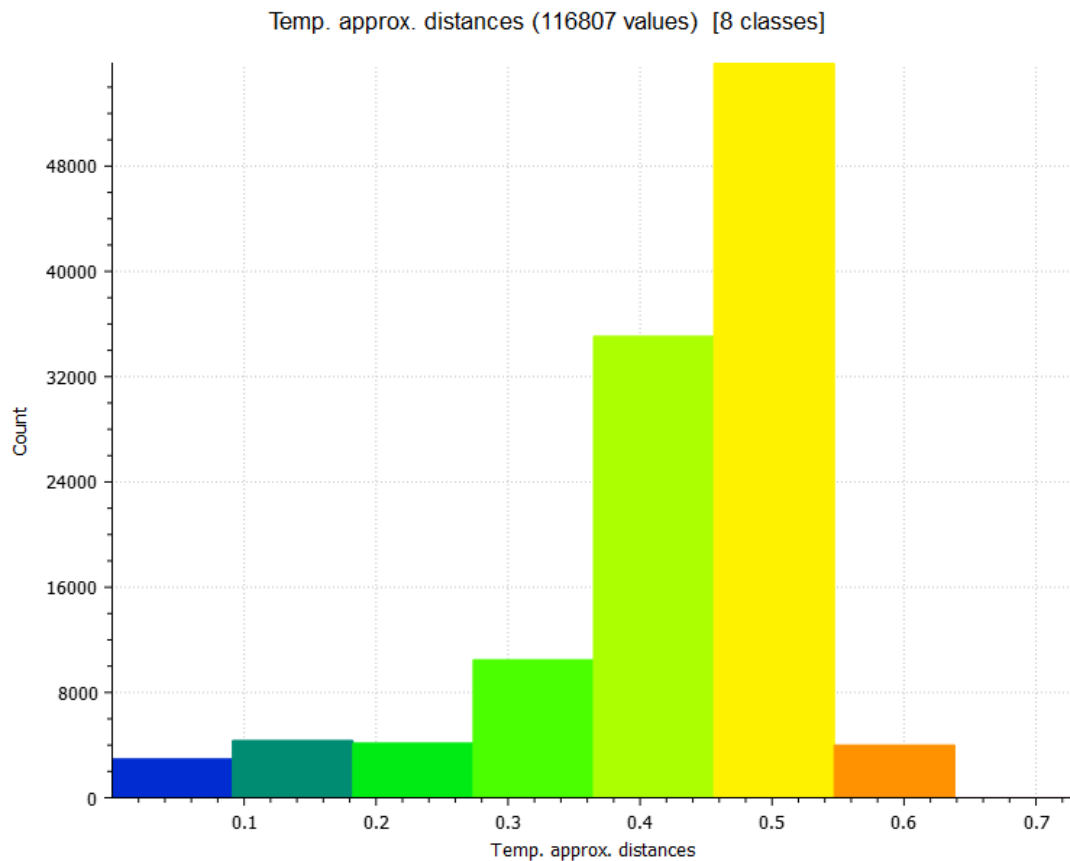


Obrázek 13: grafické znázornění odchýlení bodů mračka GNSS GCP od RTK GCP dle počtu bodů k míře odchýlení

V případě bodového mračka metody RTK, čítající celkem 116 807 bodů, jsou majoritními složkami třídy 5 a 6, které tvoří 30 % bodů s odchylkou v rozmezí 0,37 – 0,45 m a 47,8 % bodů s odchylkou 0,46 – 0,55. Maximální odchýlení je v tomto případě 0,73 m a průměrné 0,401 m. Barevnou vizualizaci pozorujeme na obrázku 14 a grafické znázornění poměru počtu bodů k rozsahu odchýlení na obrázku 15.



Obrázek 14: vizualizace odchýlení bodového mračka RTK oproti referenčnímu RTK GCP v prostředí programu CloudCompare



Obrázek 15: grafické znázornění odchýlení bodů mračka RTK od RTK GCP dle počtu bodů k míře odchýlení

Stejně tak jako u objektu OP-S 25 lze v tomto případě z tabulky 3 vyhodnotit jako nej přesnější metodu GNSS GCP, a to z důvodu upřesnění právě vlíčovacímí body. Bodová mračka vytvořená na základě metod GNSS a RTK jsou si opět velmi podobná a odchýlení se v průměru pohybuje okolo 0,5 m. Vyšší hodnoty vyskytující se u každé z metod jsou opět tvořeny pohyblivou složkou a tvoří zanedbatelnou část v řádu setin procenta.

Tabulka 3: shrnutí hodnot odchýlení dle tříd a jejich procentuální zastoupení pro jednotlivé metody

	GNSS		GNSS GCP		RTK	
	Rozmezí odchylky bodů [m]	Procentuální poměr [%]	Rozmezí odchylky bodů [m]	Procentuální poměr [%]	Rozmezí odchylky bodů [m]	Procentuální poměr [%]
1.	0 – 0,24	9,094	0 – 0,16	99,967	0 – 0,08	2,521
2.	0,25 – 0,48	52,018	0,17 – 0,33	0,011	0,09 – 0,18	3,726
3.	0,49 – 0,72	38,856	0,34 – 0,48	0,004	0,19 – 0,27	3,552
4.	0,73 – 0,96	0,003	0,49 – 0,66	0,006	0,28 – 0,36	8,978
5.	0,97 – 1,18	0,004	0,67 – 0,83	0,003	0,37 – 0,45	30,023
6.	1,19 – 1,43	0,008	0,84 – 0,98	0,002	0,46 – 0,55	47,774
7.	1,44 – 1,67	0,012	0,99 – 1,16	0,005	0,56 – 0,64	3,423
8.	1,68 – 1,91	0,005	1,17 – 1,32	0,002	0,65 – 0,73	0,003

Výsledné konečné srovnání všech čtyř metod pomocí rozdílů mezi naměřenými souřadnicemi bodů z jednotlivých výsledných modelů a reálných souřadnic získaných měření GNSS přijímačem je uvedeno v tabulce 4. Rozdíly polohy zaměřených souřadnic jednotlivých bodů jsou podrobněji uvedeny v příloze 10.2. Dvojice metod GNSS a RTK dosahují rovněž podobných hodnot, tedy odchylky horizontální složky 0,2 m a složky vertikální 0,5 m. Stejně tak je zřejmá i podobnost hodnot RMSE. Druhá dvojice metod využívající vlíčovacích bodů je značně přesnější, a dosahuje hodnot odchýlení v horizontální složce 0,03 m a vertikální 0,05.

Tabulka 4: souhrn míry a směru odchýlení, včetně RMSE pro jednotlivé metody

	GNSS	GNSS GCP	RTK	RTK GCP
Ø přímočará horizontální odchylka [m]	0,239	0,026	0,246	0,03
Ø směr odchýlení [°]	293,52	287,715	292,611	254,077
Ø odchylka na ose X [m]	0,219	0,018	0,227	0,022
Ø odchylka na ose Y [m]	0,095	0,017	0,094	0,018
Ø odchylka na ose Z [m]	0,528	0,045	0,0517	0,045
RMSE – X	0,219	0,02	0,227	0,025
RMSE – Y	0,095	0,019	0,094	0,02
RMSE – Z	0,528	0,05	0,517	0,052

6.3 Porovnání výsledků měření objektů

Při porovnání veškerých výsledných hodnot pro oba zájmové objekty lze dojít k závěru, že bylo dosaženo poměrně podobných hodnot mezi kýženými metodami georeferencování. V případě rozdílů zde hovoříme o jednotkách centimetrů. Nepatrně nižší přesnosti dosahují pouze bodová mračna menšího objektu, tedy řopíku. Postup pro rozmístění vlíčovacích bodů, jednotlivé nálety i pro tvorbu výsledných mračen a modelů byl u obou projektů stejný, což se prakticky potvrdilo. K vyššímu odchýlení dochází v každém případě ve vertikální složce oproti složce horizontální.

Udávaná přesnost v případě určování polohy v reálném čase s připojením na síť referenčních stanic pro získání korekcí je pro automatizovaný let 0,1 m v obou složkách, čemuž naměřené hodnoty neodpovídají. Při využití souřadnic vlíčovacích bodů je udávaná přesnost 2–5 cm. Této přesnosti bylo dosaženo v případě měření řopíku. U objektu OP-S 25 byla průměrná hodnota překročena v horizontální složce o 2 cm a vertikální o 5 cm.

Katastrální vyhláška č. 357/2013 Sb. předepisuje přesnost měření pro využití v geodézii +/- 0,14 m. S ohledem na tuto skutečnost lze tedy získané hodnoty za využití georeferenčních metod s vlíčovacími body považovat za uspokojivé a praxi využitelné.

7. Diskuse

V této práci byly mezi sebou porovnány výsledné hodnoty čtyř georeferenčních metod, přičemž byla brána v potaz jejich předpokládaná přesnost. Hodnoty získané určování polohy pouze ze satelitů, tedy metodou GNSS se v praxi využívají spíše okrajově. Výsledné hodnoty RMSE v případě této metody značí vyšší přesnost ve srovnání s výsledky práce Padró a kol. (2019), konkrétně pro X 0,219 v porovnání s 0,937, Y 0,095 oproti 0,499 a pro Z 0,528 ku 4,209. V naprosté většině případů se počítá s následným upřesněním skrz zaměřené souřadnice vlíčovacích bodů. Po georeferencování na vlíčovací body je zpravidla dosaženo předpokládané přesnosti okolo 2–5 cm, což bylo také v případě měření menšího z objektů potvrzeno.

Smyslem metody určování polohy ze satelitů a zpřesnění za připojení k síti referenčních stanic pro korekce v reálném čase, tedy metody RTK, má být dosažení hodnot odchylek blížících úrovni jako při použití GCP. Tímto má být zvýšena efektivita práce geodetů, ale také jejich bezpečnost, jelikož odpadají náležitosti s rozmístováním vlíčovacích bodů. V tomto případě tomu tak nebylo, jelikož hodnoty odchylky horizontální složky dosahovaly v průměru pro obě měření 0,2 m a složky vertikální 0,5 m. Toto měření lze zhodnotit jako velmi nepřesné.

Za dosažením této nepřesnosti může v tomto případě stát převod ze světových souřadnic, tedy konkrétně ze souřadnicového systému WGS84 na v České republice využívaný S-JTSK/Krovak East North. Souřadnicový systém je přepočítán a zde může dojít k chybě. Problematikou převodů mezi těmito konkrétními souřadnicovými systémy se ve své práci zabývá například Sütti (1998), popřípadě Ježek (2009), kteří definují různé metody zmíněných převodů a jejich vliv na následnou přesnost. Tento problém tedy lze považovat za obecný.

V této práci již zmíněné studii, kde byla hodnocena přesnost dronu DJI Phantom 4 RTK za použití metod RTK a GCP, bylo pro obě varianty dosaženo nepatrných rozdílů ve výsledcích (Mulakala, 2020). Za zmínku ovšem stojí, že se jedná o zahraniční studii a v tomto případě tedy souřadnicový systém nebyl převeden. Štroner a kol. (2021) ve své práci zmiňují, že v případě měření v režimu RTK dochází k systematickému vertikálnímu posunu oproti variantám, které využívají vlíčovacích bodů. Tyto závěry byly potvrzeny také v případě mé práce.

Z výsledků je také patrné, že v případě zpřesnění metody GNSS vlíčovacemi body bylo dosaženo srovnatelných hodnot odchylek jako u varianty RTK zpřesněné o vlíčovací body. U obou variant byly modely georeferencovány na stejné souřadnice stejných bodů, přičemž bylo následně dosaženo minimálně velmi podobných výsledných hodnot přesnosti. Celkové odchýlení těchto obou GCP metod dosahovalo nejnižších hodnot, načež lze konstatovat, že se jedná o nejpřesnější možné zaměření. Štroner a kol. (2021), ale také Padró a kol. (2019) po zhodnocení výsledků svých prací doporučují pro získání co nejpřesnějších hodnot měření použití alespoň několika vlíčovacích bodů. S tímto závěrem se shodují také výsledky mé práce, jelikož jak bylo již řečeno, odchylky při použití GCP jsou značně menší oproti variantám měření na základě získání polohy ze satelitů, tedy GNSS, popřípadě také RTK.

Rozdíly mezi hodnotami odchýlení v případě srovnání výsledků měření jednotlivých objektů metodami s použitím vlíčovacích bodů mohou být způsobeny právě těmito zaměřenými body. V úvahu může být bráno jejich rozmístění, které v případě této studie bylo u obou objektů v poměru prakticky shodné. Rozdílem v rozmístění GCP je ovšem vzdálenost mezi nimi. Rozmístění stejného počtu bodů na menším prostoru může mít jinou vypovídající hodnotu oproti rozprostření na prostoru větším. Vymětalíková (2018) ve své práci uvádí, že pro získání validních fotogrammetrických hodnot je zapotřebí alespoň pěti vlíčovacích bodů. Tento počet byl samozřejmě dosažen, ovšem s rostoucím počtem použitých vlíčovacích bodů by se snižovala míra odchýlení, a tedy i rozdíly v hodnotách přesnosti mezi oběma zaměřenými objekty. V tabulkách 6 a 8 jsou uvedeny rozdíly mezi referenčními souřadnicemi a porovnávanými souřadnicemi, které spadají pod metody GNSS GCP a RTK GCP pro měření menšího z objektů, tedy řopíku. Zde je možno pozorovat odchýlení na osách X a Y v kladných, ale i záporných hodnotách. U varianty RTK GCP se vyskytuje toto kladné i záporné odchýlení také na ose Z. To značí, že model nebyl pouze systematicky odchýlen jako u ostatních variant, ale byl také mírně deformován. Této chybě by se dalo také předejít za podmínky, že by bylo použito více vlíčovacích bodů pro následné zpřesnění.

8. Závěr a přínos práce

V této práci byla porovnána přesnost naměřených dat dvou vojenských objektů, pomocí čtyř georeferenčních metod. Pro sběr dat bylo využito dronu DJI Phantom 4 RTK, který disponuje modulem pro korekci polohových dat z referenčních stanic v reálném čase. Jednalo se o metody určení polohy pouze ze satelitů GNSS, dále pak o stejnou metodu, ovšem dopřesněnu o souřadnice zaměřených pozemních vlícovacích bodů, tedy GNSS GCP. Třetí z georeferenčních metod spočívala v určení polohy ze satelitů GNSS za korekce pomocí referenčních stanic CZEPOS v reálném čase, která byla značena jako RTK. Poslední metoda pracovala s daty RTK dopřesněnými o vlícovací body, tedy RTK GCP.

Metoda GNSS dosahovala značného odchýlení od referenčních souřadnic a výsledné hodnoty v porovnání s předpokládanými geodetickými standardy nebyly uspokojivé. Při upřesnění této metody o pozemní vlícovací body došlo ke značnému zvýšení přesnosti, kdy se hodnoty odchylky pohybovaly v jednotkách centimetrů. Překvapivě nepřesná byla také metoda RTK, kde výsledné hodnoty dosahovaly podobných odchylek jako v případě metody GNSS. Metoda RTK GCP dosáhla podobně přesných výsledků jako metoda GNSS GCP. Obecně u všech metod dosahovala vertikální složka vyšších hodnot odchýlení oproti složce horizontální, což je tedy všeobecný problém.

Využívání bezpilotních leteckých prostředků pouze v režimu RTK by v případě dosažení potřebné přesnosti značně zefektivnilo postup měření. Výsledky, kterých bylo touto prací dosaženo, však doporučují využít při měření také pozemní vlícovací body. V případě GCPs se sice jedná o nejstarší, tedy již tradiční georeferenční metodu, ovšem lze konstatovat, že jde o nejlepší způsob dosažení té nejvyšší možné přesnosti.

Tato práce může být podnětem pro výzkum vlivu rozmístění vlícovacích bodů v různých vzdálenostech na výslednou přesnost. Zajímavých hodnot pro srovnání by mohlo být také dosaženo v případě, že by data z měření v režimu RTK zůstala zachována ve světovém souřadnicovém systému. Tímto by byl definován vliv převodu mezi souřadnicovými systémy na konečnou přesnost.

9. Zdroje

9.1 Internetové zdroje

1. ArcGIS Desktop, © 2021: What is ArcMap? (online) [cit. 2022.03.24],
Dostupné z: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/map/main/what-is-arcmap-.html>
2. Cibulka Miloš, © 2018: Fotogrammetrie a laserové skenování (online) [cit. 2022.02.22], Dostupné z:
http://uhulag.mendelu.cz/files/pagesdata/cz/geodezie/geodezie_2018/fotogrammetrie.pdf.
3. CloudCompare, © 2022: Introduction to CloudCompare (online) [cit. 2022.03.24], Dostupné z: <https://www.cloudcompare.org/>
4. DJI, © 2022: DJI terra Make the World Your Digital Asset (online) [cit. 2022.03.20], Dostupné z: <https://www.dji.com/cz/dji-terra>.
5. Engineeringnotes, © 2022: Definition and Methods (online) [cit. 2022.03.11],
Dostupné z: <https://www.engineeringnotes.com/surveying/tacheometric-survey/tacheometry-definition-and-methods-tacheometric-survey-surveying/14282>.
6. European Union Aviation Safety Agency, ©2020: How high can I fly my drone? (online) [cit.2022.02.11], Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/faq/116465>.
7. EUSPA, © 2021: EUSPA, the European Union Agency for the Space Programme: The start of a new era for EU Space (online) [cit. 2022.02.18],
Dostupné z: <https://galileognss.eu/euspa-the-european-union-agency-for-the-space-programme-the-start-of-a-new-era-for-eu-space/>.
8. Gibbons media & Research LLC, © 2014: Engineering solutions from the Global Navigation Satellites System Community (online) [cit. 2022.01.30],
Dostupné z: <http://www.insidegnss.com/Engineering-solutions-from-the-Global-Navigation-Satellites-System-Community/>.
9. Josef Průša, © 2018: Fotogrammetrie – 3D skenování s použitím fotoaparátu či mobilu (online) [cit. 2022.02.20], Dostupné z:

<https://josefprusa.cz/fotogrammetrie-3d-skenovani-s-pouzitim-fotoaparatu-ci-mobilu/>.

10. Land of Drones, © 2022: Land of Drones – služby v oblasti bezpilotních letounů – dronů – video (online) [cit. 2022.02.16], Dostupné z: <http://landofdrones.com/snimkovani>.
11. Ministerstvo obrany a armády České republiky, © 2022: Senzory a prostředky přenosu dat pro bezpilotní prostředky | Ministerstvo obrany. (online) [cit. 2022.03.15], Dostupné z: <https://www.army.cz/scripts/detail.php?id=1391>.
12. NovAtel, © 2022: Global navigation satellite systems (GNSS) (online) [cit. 2022.02.23], Dostupné z: <http://www.naic.edu/~phil/rfi/NovAtelPosterGPSworld.pdf>.
13. NovAtel, © 2022: GPS & GNSS Equipment, Products & Solutions (online) [cit. 2022.02.12], Dostupné z: <https://novatel.com/an-introduction-to-gnss/chapter-3-satellite-systems/beidou>.
14. O energetice, © 2021: Belgičtí vědci vyvinuli autonomní dron pro monitorování jaderné radiace (online) [cit. 2022.03.09], Dostupné z: <https://oenergetice.cz/technologie/belgii-vyvinuli-zkonstruovali-dron-monitorovani-jaderne-radiace>.
15. Sensefly, © 2022: GCPs vs RTK vs PPK: When to Use What and Why (online) [cit.2022.02.10], Dostupné z: https://www.sensefly.com/blog/gcps-rtk-ppk-when-whatwhy/?fbclid=IwAR1jTjRw3wbU5LNwQ6adFkfOyBrJ_9u0PhzO42S0YiKfED5pe9UiuDajKbY.
16. Trimble, © 2022: Trimble R8s integrated GNSS System (online) [cit. 2022.03.02], Dostupné z: <https://geospatial.trimble.com/products-and-solutions/trimble-r8s>.

9.2 Bakalářské a diplomové práce

17. Gábrlík P., 2020: Aerial enviromental mapping in reconnaissance robotics. Vysoké učení technické v Brně, Faculty of electrical engineering and communication, 46 s. (disertační práce) „nepublikováno“.
18. Gartner, B., 2020: UAV fotogrammetrie a metody obrazové analýzy v polním pokusnictví. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, Olomouc. 87 s. (diplomová práce). „nepublikováno“.
19. Hlaváč, A., 2017: Využití dromů pro letecké snímkování. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta dopravní, Praha. 212s. (diplomová práce). „nepublikováno“.
20. Miřijovský, J., 2013: Fotogrammetrický přístup při sběru geodat pomocí bezpilotních leteckých zařízení. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 35 s. (disertační práce). „nepublikováno“.
21. Plzák J., 2016: Moderní dokumentační metody archeologických faktů. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta filozofická, 249 s. (disertační práce) „nepublikováno“.
22. Řehák, M., 2012: Využití bezpilotních prostředků ve fotogrametrii. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha 68 s. (diplomová práce). „nepublikováno“. Dep.
23. Šimíček M., 2012: Neměřické kamery při fotogrammetrickém studiu památkových objektů. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 47 s. (bakalářská práce). „nepublikováno“.
24. Šimíček M., 2014: Implementace metody strucutre from motion do UAV fotogrammetrie. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 77 s. (diplomová práce) „nepublikováno“.
25. Vymětalíková Š., 2018: Vliv rozmístění vlíčovacích a vázacích bodů na přesnost aerotriangulace. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta, 76 s. (diplomová práce) „nepublikováno“.

9.3 Odborné knihy

26. Aber J. S., Marzoff I., Ries B., 2010: Small-Format Aerial Photography. Elsevier Science, 268 s.
27. Aron L., 1998: Československé opevnění 1935–1938. Fortprint, Dvůr Králové nad Labem, 194 s.
28. Bína J., Demek J., 2012: Z nížin do hor: Geomorfologické jednotky České republiky. Academia, Praha, 343 s.
29. Böhm J., 2002: Fotogrammetrie. Vydavatelství VŠB – TUO, Ostrava, 16 s.
30. Eisenbeiss H., 2009: UAV Photogrammetry. ETH Zürich, Zürich, 237 s.
31. Förstner W., Wrobel B.P., 2016: Photogrammetric Computer Vision. Springer, Berlin, 816 s.
32. Hanzl V., 2006: FOTOGRAMMETRIE: Teoretické základy fotogrammetrie. Vydavatelství ČVUT, Brno, 101 s.
33. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E., 2007: GNSS–global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. Springer Science & Business Media, Graz, 518 s.
34. Kaplan E. D., Hegarty C., 2017: Understanding GPS/Gnss: Principles and Applications. Artech House Publishers, London, 1064 s.
35. Kocourek J., Řešátko J., 2021: Drony: praktická příručka pro majitele dronů DJI. Telink, Praha. 183 s.
36. Pavelka K., 2003: Fotogrammetrie 10. Vydavatelství ČVUT, Praha, 194 s.
37. Pavelka K., 2009: Fotogrammetrie 1. Vydavatelství ČVUT, Praha, 200 s.
38. Schenk T., 2005: Introduction to Photogrammetry. Academia, Columbus, 95 s.
39. Tsach S., Tatievsky A., London L., 2010: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Encyclopedia of Aerospace Engineering, Chichester, 1-15 s.
40. Urban R., 2015: Geodetické práce při měření posunů a deformací stavebních objektů. České vysoké učení technické, Praha, 225 s.

9.4 Články v odborném periodiku

41. Bemis S. P., Micklethwaite S., Turner D., James M. R., Akciz S., Thiele S. T., Bangash H. A., 2014: Ground-based and UAV-Based photogrammetry: A multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology. *Journal of Structural Geology* Volume 69. S. 163–178.
42. Bento M., 2008: Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *InsideGNSS*. S. 54-61.
43. Bhardwaj A., Sam L., Akanksha Martín-Torres F. J., Kumar R. 2016: UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. *Remote Sensing of Environment* Volume 175. S. 196–204.
44. Bikram P., 2020: Performance analysis of different positioning modes in RTKLIB Software. *Masters in Cartography & Geographical Information Engineering*. S. 1-11.
45. Blaha M., Eisenbeiss H., Grimm D., Limpach P., 2012: Direct Georeferencing of UAVs. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. S. 131–136.
46. Dawoud S., 2012 GNSS principles and comparison. *Potsdam University*. S. 1-10.
47. Dörnhöfer K., Oppelt N., 2016: Remote sensing for lake research and monitoring – Recent advances. *Ecological Indicators* Volume 64. S. 105–122.
48. Eker Remzi., Alkan E., Aydin A., 2020: A comparative analysis of UAV-RTK and UAV-PPK methods in mapping different surface types. *European Journal of Forest Engineering*, Volume 7. S. 12-25.
49. Elloumi M., Dhaou R., Escrig B., Idoudi H., Saidane, L. A.. 2018: Monitoring road traffic with a UAV-based system. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. S. 1-6.
50. Eltner A., Sofia G., 2020: Structure from motion photogrammetric technique. *Developments in Earth Surface Processes* Volume 23. S. 1-24.

51. Famiglietti N. A., Cecere G., Grasso C., Memmolo A., Vicari A., 2021: A Test on the Potential of a Low Cost Unmanned Aerial Vehicle RTK/PPK Solution for Precision Positioning. *Sensors* Volume 21. S. 1-15.
52. Gini R., Pagliari D., Passoni D., Pinto L., Sona G., Dosso P., 2013: UAV photogrammetry: blocks triangulation comparison. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* S. 157–162.
53. He F., Zhou T., Xiong W., Hasheminnasab S., Habib A., 2018: Automated Aerial Triangulation for UAV-Based Mapping. *Remote Sensing* Volume 10. S. 1-35.
54. Hirschmuller H., 2005: Accurate and Efficient Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. *IEEE* Volume 2. S. 807-814.
55. Hugemann W., 2010: Correcting Lens Distortions in Digital Photographs. *EVU*. S. 1-12.
56. Jensen A. N., Jensen M., 2020: A Research Platform for Drone Assisted Firefighting with AR Path Visualisations. *ACM*. S. 11.
57. Jeong Y., Nister D., Steedly D., Szeliski R., In-So Kweon., 2012: Pushing the Envelope of Modern Methods for Bundle Adjustment. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* Volume 34. S. 1605–1617.
58. Ježek Jan, 2009: Precise transformation between S-JTSK and ETRS89 (WGS-84) in GIS. *Geoinformatics*, S.1-7.
59. Kiszka J.J., Mourier J., Gastrich K., Heithaus M.R., 2016: Using unmanned aerial vehicles (UAVs) to investigate shark and ray densities in a shallow coral lagoon. *Mar Ecol Prog Ser* Voluem 560. S. 237-242.
60. Klauser F., 2021: Police Drones and the Air: Towards a Volumetric Geopolitics of Security, 2021. *Swiss Political Science Review* Volume 27. S. 158–169.
61. Klouček T., Komárek J., Lagner O., Fogl M., Gdulová K., 2019: Detekce napadení lesních porostů pomocí bezpilotních leteckých prostředků. *Česká zemědělská univerzita v Praze*. S. 1-66.

62. Komárek J., Vávra M., 2019: Drony v environmentální praxi. Ochrana přírody - Péče o přírodu a krajinu. S. 14-17.
63. Koreczak-Abshire M., Zmarz A., Rodzewicz M., Kycko M., Karsznia I., Chwedorzewska K. J., 2018: Study of fauna population changes on Penguin Island and Turret Point Oasis (King George Island, Antarctica) using an unmanned aerial vehicle. *Polar Biology* Volume 42. S. 217-24.
64. Li T., Zhang B., Xiao W., Cheng X., Li Z., Zhao J., 2020: UAV-based Photogrammetry and LiDAR for the Characterization of Ice Morphology Evolution. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. S. 4188-4199.
65. Liu X., Bu L., Bu F., Huo H., 2021: Concentric circle grids for camera calibration with considering lens distortion. *Optics and Lasers in Engineering* Volume 140. S. 1-9.
66. Madura T. I., Gull T. R., Owocki S. P., Groh J. H., Okazaki A. T., Russell C. M. P. 2012: Constraining the absolute orientation of η Carinae's binary orbit: a 3D dynamical model for the broad [Fe iii] emission. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* Volume 420. S. 2064–2086.
67. Mallet X., Maynard P., Meuwly D., Roux C., Seckiner D., 2018: Forensic image analysis – CCTV distortion and artefacts. *Forensic Science International* Volume 285. S. 77-85.
68. Martínez-Carricondo P., Agüera-Vega F., Carvajal-Ramírez F., Mesas-Carrascosa F.-J., García-Ferrer A., Pérez-Porras F.-J. 2018: Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* Volume 72, S. 1–10.
69. Minařík R., Langhammer J., 2016: Use of multispectral UAV photogrammetry for detection and tracking of forest disturbance dynamics. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. S. 711–718.

70. Moeckel T., Dayanada S., Nidamanuri R. R., Nautiyal S., Hanumaiah N., Buerkert A., Wachendorf M., 2018: Estimation of Vegetable Crop Parameter by Multi-temporal UAV-Borne Images. *Remote Sensing Volume 10*. S. 1-18.
71. Mulakala J., 2019: Measurement accuracy of the DJI Phantom 4 RTK & photogrammetry. *DroneDeploy*. S. 1-18.
72. Nikolakopoulos K.G., Soura K., Koukouvelas I. K., Argyropoulos N. G., 2017: UAV vs classical aerial photogrammetry for archaeological studies. *Journal of Archaeological Science: Reports Volume 14*. S. 758-773.
73. Padró J.-C., Muñoz F.-J., Planas J., Pons X., 2019: Comparison of four UAV georeferencing methods for environmental monitoring purposes focusing on the combined use with airborne and satellite remote sensing platforms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Volume 75*. S. 130–140.
74. Pechanec V., Vávra A., Machar I., 2014: Využití UAV technologie pro získávání dat v precizním zemědělství na příkladu ploch s cukrovou řepou. *Listy cukrovarnické a řepařské Volume 130*. S. 162-165.
75. Przybilla H. J., Baumker M., Luhmann T., Hastedt H., Eilers M., 2020: Interaction between direct georeferencing, control point configuration and camera self-calibration for RTK-based UAV photogrammetry. *ISPRS and Spatial Information Sciences Volume 43*. S. 485-492.
76. Santise M., Fornari M., Forlani G., Roncella R., 2014: Evaluation of DEM generation accuracy from UAS imagery. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. Volume 5*. S. 529–536.
77. Sestras P., Bilašco S., Rošca S., Dudic B., Hysa A., Spalević V., 2021: Geodetic and UAV Monitoring in the Sustainable Management of Shallow Landslides and Erosion of a Susceptible Urban Environment. *Remote Sensing Volume 13*. S. 1-385.
78. Sivabalaselvamani D., Selvakarthi D., Rahunathan L., Gayathri G., Baskar M. M., 2021: Survey on Improving Health Care System by Implementing an Air Ambulance System with the Support of Drones. *2021 5th International*

Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). S. 878-883.

79. Snavely K., 2011: Scene reconstruction and visualization from Internet photo collections. *IPSN Transactions on Computer Vision and Applications* 3. S. 44-66.
80. Stumpf A., Malet J.P., Allemand P., Pierrot-Deseilligny M., Skupinski G., 2015: Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology* Volume 231. S. 130-145.
81. Sütty Juraj, 1998: Accuracy and reliability of plane networks transformed from WGS84 into S-JTSK. *Acta Montanistica Slovaca*, Volume 3. S. 439-443.
82. Štroner M., Urban R., Reindl T., Seidl J., Brouček J., 2020: Evaluation of the Georeferencing Accuracy of a Photogrammetric Model Using a Quadcopter with Onboard GNSS RTK. *Sensors* Volume 20. S. 1-18.
83. Tsouros D. C., Bibi S., Sarigiannidis P. G., 2019: A Review on UAV-Based Applications for Precision Agriculture. *Information* Volume 10. S. 1-349.
84. Ullman S., 1979: The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B*. S. 405-426.
85. Vacca A., Onishi H., 2017: Drones: military weapons, surveillance or mapping tools for environmental monitoring? The need for legal framework is required. *Transportation Research Procedia* Volume 25. S. 51–62.
86. Wu Z., Ni M., Hu Z., Wang J., Li Q., Wu G., 2019: Mapping invasive plant with UAV-derived 3D mesh model in mountain area—A case study in Shenzhen Coast, China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* Volume 77, S. 129–139.
87. Zhang C., Walters D., Kovacs J.M., 2014: Applications of Low Altitude Remote Sensing in Agriculture upon Farmers' Requests— A Case Study in Northeastern Ontario, Canada. *PLoS ONE* Volume 9. S. 1-10.
88. Ziobro J., 2011: Integrated sensor orientation – ground control points for a large-block aerotriangulation. *Geoinformation Issues* Volume 3. S. 37-49.

10. Přílohy

Tabulky 2 a 4 nacházející se v kapitole 6. Výsledky shrnují směry odchýlení a průměrné hodnoty, kterých bylo dosaženo pomocí jednotlivých metod georeferencování. Tyto hodnoty byly získány zprůměrováním odchylek všech zaměřených bodů pro každou metodu. V příloze se nachází celkem osm tabulek, kde v každé z nich je obsažena hodnota přímočaré odchylky, směru odchýlení a odchylky na ose X, Y a Z, a to pro každý ze zaměřených bodů.

10.1 OP-S 25

Tabulky 5, 6, 7 a 8 nám představují hodnoty odchylek a směru odchýlení jednotlivých bodů zaměřených v konečných 3D modelech vzniklých pomocí metod GNSS, GNSS GCP, RTK a RTK GCP. V tomto případě se jednalo o modely většího z vojenských objektů, tedy opevnění OP-S 25 „U Trigonometru“.

10.1.1 GNSS

Tabulka 5: míra odchýlení jednotlivých zaměřených bodů pro metodu GNSS

bod	přímočará odchylka [m]	směr odchýlení [°]	odchylka na ose X [m]	odchylka na ose Y [m]	odchylka na ose Z [m]
1	0,201	286,180	0,193	-0,056	0,489
2	0,239	286,011	0,230	-0,066	0,488
3	0,220	293,301	0,202	-0,087	0,458
4	0,223	287,461	0,213	-0,067	0,521
5	0,227	293,629	0,208	-0,091	0,459
6	0,189	291,125	0,176	-0,068	0,498
7	0,207	288,610	0,196	-0,066	0,520
8	0,232	292,810	0,214	-0,090	0,494
9	0,222	300,964	0,190	-0,114	0,518

10.1.2 GNSS GCP

Tabulka 6: míra odchýlení jednotlivých zaměřených bodů pro metodu GNSS GCP

bod	přímočará odchylka [m]	směr odchýlení [°]	odchylka na ose X [m]	odchylka na ose Y [m]	odchylka na ose Z [m]
1	0,042	325,561	0,024	-0,035	0,157
2	0,059	286,607	0,057	-0,017	0,002
3	0,081	309,987	0,062	-0,052	0,033
4	0,086	292,671	0,079	-0,033	0,132
5	0,087	304,237	0,072	-0,049	0,133
6	0,074	283,285	0,072	-0,017	0,101
7	0,084	306,733	0,067	-0,05	0,119
8	0,099	307,216	0,079	-0,06	0,037

10.1.3 RTK

Tabulka 7: míra odchýlení jednotlivých zaměřených bodů pro metodu RTK

bod	přímočará odchylka [m]	směr odchýlení [°]	odchylka na ose X [m]	odchylka na ose Y [m]	odchylka na ose Z [m]
1	0,240	303,094	0,201	-0,131	0,532
2	0,201	293,760	0,184	-0,081	0,522
3	0,213	288,605	0,202	-0,068	0,52
4	0,262	287,745	0,25	-0,08	0,515
5	0,238	288,587	0,226	-0,076	0,551
6	0,248	294,501	0,226	-0,103	0,52
7	0,228	289,704	0,215	-0,077	0,535
8	0,250	295,641	0,225	-0,108	0,481
9	0,237	296,241	0,213	-0,105	0,483

10.1.4 RTK GCP

Tabulka 8: míra odchýlení jednotlivých zaměřených bodů pro metodu RTK GCP

bod	přímočará odchylka [m]	směr odchýlení [°]	odchylka na ose X [m]	odchylka na ose Y [m]	odchylka na ose Z [m]
1	0,039	284,744	0,038	-0,01	0,19
2	0,071	283,055	0,069	-0,016	0,011
3	0,075	303,056	0,063	-0,041	0,012
4	0,050	298,610	0,044	-0,024	0,181
5	0,087	285,313	0,084	-0,023	0,128
6	0,091	286,032	0,087	-0,025	0,143
7	0,075	280,713	0,074	-0,014	0,107
8	0,099	299,673	0,086	-0,049	0,036

10.2 Řopík

Tabulky 9, 10, 11 a 12 nám rovněž představují hodnoty odchylek a směru odchýlení jednotlivých bodů zaměřených v konečných 3D modelech vzniklých pomocí metod GNSS, GNSS GCP, RTK a RTK GCP. V tomto případě se jednalo o modely menšího z vojenských objektů, tedy opevnění vz. 37 zvané řopík.

10.2.1 GNSS

Tabulka 9: míra odchýlení jednotlivých zaměřených bodů pro metodu GNSS

bod	přímočará odchylka [m]	směr odchýlení [°]	odchylka na ose X [m]	odchylka na ose Y [m]	odchylka na ose Z [m]
1	0,229	289,385	0,216	-0,076	0,538
2	0,263	290,020	0,247	-0,09	0,512
3	0,247	294,905	0,224	-0,104	0,546
4	0,239	293,451	0,219	-0,095	0,54
5	0,242	294,444	0,22	-0,1	0,515
6	0,237	297,973	0,209	-0,111	0,521
7	0,220	294,466	0,2	-0,091	0,524

10.2.2 GNSS GCP

Tabulka 10: míra odchýlení jednotlivých zaměřených bodů pro metodu GNSS GCP

bod	přímočará odchylka [m]	směr odchýlení [°]	odchylka na ose X [m]	odchylka na ose Y [m]	odchylka na ose Z [m]
1	0,014	158,962	-0,005	0,013	0,076
2	0,032	257,276	0,031	0,007	-0,018
3	0,046	321,147	0,029	-0,036	0,045
4	0,013	351,254	0,002	-0,013	0,074
5	0,027	304,287	0,022	-0,015	0,044
6	0,022	300,069	0,019	-0,011	-0,014
7	0,027	321,009	0,017	-0,021	-0,046

10.2.3 RTK

Tabulka 11: míra odchýlení jednotlivých zaměřených bodů pro metodu RTK

bod	přímočará odchylka [m]	směr odchýlení [°]	odchylka na ose X [m]	odchylka na ose Y [m]	odchylka na ose Z [m]
1	0,247	297,499	0,219	-0,114	0,52
2	0,227	294,986	0,206	-0,096	0,52
3	0,235	289,670	0,221	-0,079	0,535
4	0,264	288,983	0,25	-0,086	0,513
5	0,258	292,791	0,238	-0,1	0,544
6	0,245	290,802	0,229	-0,087	0,539
7	0,247	292,620	0,228	-0,095	0,517
8	0,245	293,536	0,225	-0,098	0,449

10.2.4 RTK GCP

Tabulka 12: míra odchýlení jednotlivých zaměřených bodů pro metodu RTK GCP

bod	přímočará odchylka [m]	směr odchýlení [°]	odchylka na ose X [m]	odchylka na ose Y [m]	odchylka na ose Z [m]
1	0,009	147,994	-0,005	0,008	0,072
2	0,037	262,303	0,037	0,005	-0,027
3	0,045	321,340	0,028	-0,035	-0,006
4	0,033	287,878	0,031	-0,01	0,035
5	0,047	315	0,033	-0,033	0,039
6	0,019	327,994	0,01	-0,016	0,072
7	0,032	303,690	0,027	-0,018	-0,019
8	0,033	313,781	0,024	-0,023	-0,056