



Master Thesis
im Rahmen des Universitätslehrganges
„Geographical Information Science & Systems (UNIGIS MSc)“
am Interfakultären Fachbereich für GeoInformatik (Z_GIS) der Paris
Lodron-Universität Salzburg

zum Thema

Vor- und Nachteile integrierter Georeferenzierung bei sUAV-Bildflügen

vorgelegt von

Dr. Dirk Koller
104865, UNIGIS MSc Jahrgang 2017

Betreuer/in:
Assoc. Prof. Dr. Gudrun Wallentin

Zur Erlangung des Grades
„Master of Science (Geographical Information Science & Systems) – MSc(GIS)“

Nidderau, 29.2.2020

Danksagung

Vielen Dank an Pix4D für die Bereitstellung einer zeitlich begrenzten Vollversion von Pix4Dmapper, die für die photogrammetrische Auswertung eingesetzt wurde.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, diese Master Thesis ohne fremde Hilfe und ohne Verwendung anderer als der angeführten Quellen angefertigt zu haben, und dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen hat.

Alle Ausführungen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß übernommen wurden, sind entsprechend gekennzeichnet.

Nidderau, den 29.2.2020

Dr. Dirk Koller

Zusammenfassung

UAV-Bilddaten werden derzeit überwiegend indirekt mithilfe von Passpunkten georeferenziert. Die direkte Georeferenzierung, bei der mittels On-Board-RTK-GNSS und optimalerweise einer IMU die Georeferenzierung ohne Betreten des überflogenen Areals durchgeführt werden kann, wird seit wenigen Jahren auch für sUAVs angeboten. Die Kombination beider Verfahren, die integrierte Georeferenzierung, findet dagegen bisher kaum Verwendung.

Bei der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchung wurden sowohl Passpunkte am Boden, als auch, mithilfe von RTK-GNSS, die exakten Fotopositionen in der Luft erfasst. Die anschließende Auswertung mit Pix4Dmapper, einmal mit und einmal ohne die Bildpositionen, zeigt, dass die zusätzlichen Koordinaten eine genauere Messung, insbesondere der Höhe ermöglichen. Hier sind die Fehler an Kontrollpunkten um etwa ein Drittel kleiner als bei Rechnungen ohne die Fotopositionen.

Die höhere Genauigkeit wird allerdings noch mit einem hohen Preis, und, zumindest beim hier verwendeten Verfahren, einer steilen Lernkurve und einigem zeitlichen Mehraufwand erkauft. Ob sich der Aufwand lohnt, hängt von den Projektparametern und den Vorgaben des Auftraggebers ab. Oft lässt sich eine höhere Qualität auch durch Variationen des Verfahrens wie Kreuzbefliegung oder Befliegung in verschiedenen Höhen günstiger und mit weniger Aufwand erreichen.

Erschwingliche GNSS-Mehrfrequenzempfänger, kostengünstige aber genaue IMUs sowie die Echtzeitkorrektur der Daten lassen allerdings noch Raum für Verbesserungen, die der Methode zu größerer Verbreitung verhelfen könnten.

Abstract

UAV image data are currently geo-referenced mainly indirectly, using control points. Direct geo-referencing, where on-board RTK-GNSS and ideally an IMU can be used to perform geo-referencing without entering the overflowed area, has also been offered for sUAVs for a few years now. In contrast, the combination of both methods, integrated georeferencing, has hardly been used so far. In the course of the investigation carried out in this work, control points on the ground and, with the help of RTK-GNSS, the exact photo positions in the air were recorded. The subsequent evaluation with Pix4Dmapper, once with and once without the image positions, shows that the additional coordinates allow a more precise measurement, especially of the altitude. Here the errors at control points are about one third smaller than in calculations without the photo positions. But the higher accuracy is still bought with a high price and, at least in the case of the procedure used here, a steep learning curve and some additional time expenditure. Whether the effort is worth it depends on the project parameters and the specifications of the client. Often a higher quality can also be achieved more cost-effectively and with less effort by varying the procedure such as cross-flying or flying at different heights. Affordable GNSS multi-frequency receivers, inexpensive but accurate IMUs and real-time correction of the data, however, leave room for improvements that could help the method to become more widespread.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation für diese Arbeit	1
1.2 Grundlagen und aktueller Stand der Forschung	3
1.2.1 Vermessung mit Unmanned Aerial Vehicles	3
1.2.2 Georeferenzierung von UAV-Bilddaten	6
1.2.3 RTK-GNSS	9
1.3 Fragestellung dieser Arbeit	11
2 Methodische Vorgehensweise	13
2.1 Ausrüstung	13
2.1.1 UAV	13
2.1.2 Bodenkontrollstation	16
2.1.3 Nutzlast: RTK-GNSS und Kamera	17
2.1.4 RTK-GNSS-Roverstab	18
2.2 Planung und Vorbereitung der Flugroute	22
2.3 Auslegen und Einmessen von Pass- und Kontrollpunkten	24
2.4 Durchführung der Befliegung	24
2.5 Korrektur der erfassten Fotopositionen im Post Processing	26
2.6 Auswertung der Daten mit und ohne Fotopositionen	30
3 Ergebnisse	32
3.1 Geokoordinaten der Pass- und Kontrollpunkte	32
3.2 Geokoordinaten der Fotos	33

3.3	Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung mit Pix4Dmapper . . .	37
4	Diskussion	47
4.1	Genauigkeit der Messung	47
4.2	Zeitbedarf	50
4.3	Know-how	50
4.4	Preis	51
5	Schlussfolgerung und Ausblick	52
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	52
5.2	Ausblicke und weitere Fortführung der Arbeit	53
6	Anhang	59

Abbildungsverzeichnis

1.1	Real Time Kinematic-Verfahren (RTK)	10
1.2	Post Processing Kinematic-Verfahren (PPK)	11
2.1	Schematische Darstellung des UAV mit Funkfernsteuerung	15
2.2	UAV	15
2.3	Funkfernsteuerung mit Empfänger (links) und integriertem Handy	16
2.4	Schematische Darstellung der Telemetrie	17
2.5	Schematische Darstellung der RTK-GNSS-Lösung mit Kamera	18
2.6	Abgeschirmtes Reach RTK-Modul mit Kamera und Antenne	18
2.7	Schematische Darstellung von UAV und Fernsteuerung	20
2.8	GNSS-Antennenstab mit Receiver und Libelle	21
2.9	NTRIP Client	21
2.10	Mapit	21
2.11	Befliegungsraster	23
2.12	Wegpunkte	24
2.13	Selbstgebauter GCP	25
2.14	RINEX-Konvertierung mit RTKCONV	26
2.15	Optionen in RTKCONV	27
2.16	Bestellen der Korrekturdaten bei SAPOS	28
2.17	Einstellungen für RTKPOST	29
2.18	Teil der Datei mit den korrigierten Positionen	29
2.19	Postprocessing-Workflow	30
3.1	Karte mit Pass- und Kontrollpunkten	33
3.2	Geflogene Route	33
3.3	Anzahl der gültigen Satelliten während der Befliegung	34
3.4	Luftaufnahmen	35
3.5	RTKPLOT-Groundtrack (Grün = RTK-Fix, Gelb = Float)	37
3.6	Pix4D-Kartenansicht	38

3.7	2D Keypoint Matches (links ohne, rechts mit Bildpositionen)	40
3.8	Orthofoto und DSM (ohne Bildpositionen)	41
3.9	Orthofoto und DSM (mit Bildpositionen)	41
3.10	Positionen von GCPs und Fotos (nur rechts) in der Aufsicht	42
3.11	Überlappung (links ohne, rechts mit Bildpositionen)	43

Tabellenverzeichnis

2.1	Einstellungen des Reach RTK-Modul	19
2.2	Einstellungen der Kamera	19
2.3	Einstellungen in QGroundControl	22
2.4	Einstellungen für RTKPOST	28
3.1	Geokoordinaten der Pass- und Kontrollpunkte	32
3.2	Geokoordinaten der Bilder	36
3.3	Zusammenfassende Ergebnisse	38
3.4	Ergebnisse des Pix4Dmapper-Quality Checks	39
3.5	Ungenauigkeiten der Kameraposition und -orientierung ohne Bildpositionen	44
3.6	Ungenauigkeiten der Kameraposition und -orientierung mit Bildpositionen	44
3.7	Details Bündelblockausgleichung	44
3.8	Fehler der Passpunkte ohne Bildpositionen	45
3.9	Fehler der Passpunkte mit Bildpositionen	45
3.10	Fehler des Kontrollpunkts ohne Bildpositionen	46
3.11	Fehler des Kontrollpunkts mit Bildpositionen	46

Abkürzungsverzeichnis

A-GPS	Assisted GPS
CP	Check Point
DGM	Digitales Geländemodell
DSM	Digital Surface Model
DGPS	Differential Global Positioning System
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EXIF	Exchangeable Image File Format
GBAS	Ground Based Augmentation System
GCP	Ground Control Point
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSD	Ground Sampling Distance
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
KML	Keyhole Markup Language
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems
NTRIP	Networked Transport of RTCM via Internet Protocol
PPK	Post Processing Kinetics
PPP	Precise Point Positioning
RC	Remote Control
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinetics
SBAS	Satellite Based Augmentation Systems
SFM	Structure from Motion
SNR	Signal to Noise Ratio
sUAV	Small Unmanned Aerial Vehicle

UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UAS	Unamned Aerial System
WAAS	Wide-Area Augmentation Service

1 Einleitung

1.1 Motivation für diese Arbeit

In vielen Vermessungsbüros gehört neben klassischen Werkzeugen wie Tachymeter oder Theodolit inzwischen auch ein *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, umgangssprachlich auch als *Drohne* bezeichnet, zur Ausrüstung. Laut einer Marktstudie des *Verband Unbemannte Luftfahrt* zur kommerziellen Nutzung von Drohnen¹ ist die Vermessung mit 79 Prozent der deutlich überwiegende Anwendungszweck in der kommerziellen Verwendung. Das Fluggerät kommt immer dann zum Einsatz, wenn größere Flächen vermessen werden müssen oder Sekundärprodukte wie Orthofotos benötigt werden. Die dazu meist verwendeten Multikopter sind vergleichsweise leicht zu steuern und in allen Preisklassen erhältlich. Schon mit Geräten aus dem gehobenen Consumer-Segment lassen sich qualitativ hochwertige Aufnahmen anfertigen.

Der in diesen einfachen Geräten verbaute Global Navigation Satellite System (GNSS)-Empfänger entspricht den in Smartphones verbauten Modellen und hat eine Genauigkeit von lediglich 5-10 Metern. Es sind in erster Linie Naturphänomene in Iono- und Troposphäre wie zum Beispiel die Sonnenaktivität, die eine genauere Positionsbestimmung verhindern. Die Empfänger eignen sich deshalb nicht ohne Weiteres für eine Georeferenzierung des Bildmaterials auf Vermessungsniveau.

Zur Lösung dieses Problems existieren mehrere Ansätze. Das bekannteste Verfahren ist die *indirekte Georeferenzierung*. Dabei werden vor der Befliegung im Feld Passpunkte ausgelegt, mit herkömmlichen Methoden exakt eingemessen und bei der Befliegung mitfotografiert. Die Punkte werden danach in einer Photogrammetriesoftware wie *Pix4Dmapper* (*Pix4Dmapper* 2020) oder *Agisoft Metashape* (*Metashape* 2020) auf den Fotos markiert und mit ihren Koordinaten versehen. Die Software berechnet schließlich mithilfe photogrammetrischer Methoden die exakte Position der Kamera zum Auslösezeitpunkt.

¹https://www.verband-unbemannte-luftfahrt.de/wp-content/uploads/2019/02/190212_VUL-Marktstudie_Analyse-des-deutschen-Drohnenmarktes.pdf (Letzter Zugriff: 26.2.2020)

In den letzten Jahren hat ein zweites Verfahren, die *direkte Georeferenzierung*, an Bedeutung gewonnen. Bei diesem Verfahren werden mittels RTK-GNSS die exakten Auslösepositionen bestimmt und für die Berechnung verwendet. Das Verfahren kommt meist dann zum Einsatz, wenn das überflogene Gebiet schwer zugänglich und das Einmessen von Passpunkten dadurch schwierig oder gar unmöglich ist.

Gewicht und Preis der für RTK-Messungen erforderlichen Empfänger mit Rohdatenausgabe sind in den letzten Jahren stark gefallen. Das in der Arbeit eingesetzte Modul *Reach* des Unternehmens *Emlid* (*Emlid* 2020) kostete 2019 etwa 300 Euro. Mit dem Softwarepaket *RTKLIB* steht zudem eine bewährte und frei verfügbare Lösung zur Korrektur der gemessenen Daten zur Verfügung. Die dafür benötigten Referenzdaten sind in Deutschland flächendeckend und in einigen Bundesländern dank SAPOS, dem Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessungen, sogar kostenlos erhältlich. RTK-Messungen mit UAVs sind also durchaus erschwinglich geworden und nicht länger eine Domäne der flugzeuggetragenen Systeme.

Moderne Photogrammetrielösungen wie die oben genannten gestatten die gleichzeitige Angabe von am Boden eingemessenen Passpunkten und der Kamerapositionen zur Zeit der Bilderfassung in der Luft. Beide Arten von Koordinaten gehen in die Rechnung ein, es handelt sich also um eine Kombination von indirekter und direkter Georeferenzierung. Zusätzliche Daten sollten sich in Form von Qualitätsverbesserungen bei der Bündelblockausgleichung und damit in einer höheren Genauigkeit des berechneten Modells auswirken.

Womöglich können durch das zusätzliche, exakte Erfassen der Bildpositionen mittels RTK in Zukunft aufwändige Messungen mit Tachymeter und Theodolit entfallen. Denkbar ist auch, dass nur noch eine minimale Anzahl an Passpunkten eingemessen werden muss und die Luftpositionen die restlichen Informationen liefern. Vermessungsbüros, aber auch viele andere Branchen, die auf exakte Geodaten angewiesen sind (zum Beispiel Archäologen, die Funde, Befunde und Grabungsflächen einmessen), könnten dadurch Zeit und Kosten einsparen.

Das zusätzliche Erfassen der Bildpositionen bringt aber auch Nachteile mit sich, etwa mehr Aufwand und höhere Kosten in der Anschaffung der Hardware. Gegebenenfalls müssen Mitarbeiter in der Verwendung des RTK-Systems geschult werden. Auch sind Auswirkungen des RTK-Systems in Bezug auf die Fehleranfälligkeit des UAVs denkbar.

Der Themenkomplex birgt also noch offene Fragen. Das Interesse an Multikoptern, der RTK-Technologie und der damit möglichen Untersuchung einiger der genannten Aspekte veranlassten mich zur Erstellung dieser Arbeit.

1.2 Grundlagen und aktueller Stand der Forschung

1.2.1 Vermessung mit Unmanned Aerial Vehicles

Luftaufnahmen zum Zweck der photogrammetrischen Verarbeitung werden seit den 1930er Jahren mithilfe von Flugzeugen angefertigt. Der US-Amerikaner Talbert Abrams entwickelte mit dem *Abrams P-1 Explorer* das erste Flugzeug, das speziell für die Erfassung von Luftaufnahmen konstruiert war. Das Digitalmagazin *The American Surveyor* würdigt in der Dezemberausgabe 2015 diesen Pionier der Luftbildfotografie².

Ein typisches Set-up aus heutiger Zeit besteht aus einem Kleinflugzeug, beispielsweise einer Cessna, einer metrisch stabilen Großformatkamera sowie einer Inertial Measurement Unit (IMU), die die äußere Orientierung, also Lage und Position der Kamera in Bezug auf den Aufnahmegegenstand, erfasst. Die Methode ist bewährt, bringt aber auch Nachteile mit sich. Neben den hohen Kosten und dem hohen organisatorischen Aufwand (Start- und Landeerlaubnis, Anflugzeit, Berücksichtigung der Wetterverhältnisse) gilt es auch qualitative Einschränkungen zu berücksichtigen. So erschwert die rechtlich einzuhaltende Mindestflughöhe von 150 Metern Vermessungen mit sehr hohen Bodenaufösungen. Zudem lässt sich ein Flugzeug aufgrund der hohen Fluggeschwindigkeit nicht immer einfach über dem zu erfassenden Objekt platzieren. Die Methode eignet sich eher für große Flächen und nicht so sehr für Detailaufnahmen, etwa einer Baustelle.

Erste Versuche, funkferngesteuerte Flugmodelle zu geodätischen Vermessungen einzusetzen, gehen auf das Ende der 70er Jahre zurück. Przybilla und Wester-Ebbinghaus führten photogrammetrische Untersuchungen mit Starrflüglern und Helikoptern, also Modellflugzeugen im klassischen Sinne, auf einem Modellflugplatz durch (Przybilla 1979). Gewicht und Abmessungen des seinerzeit verwendeten Fluggeräts sind im Vergleich zu dem in dieser Arbeit eingesetzten Multikopter imposant und der Einsatz solch eines schweren Fluggeräts außerhalb von Modellflugplätzen würde heute einigen bürokratischen Aufwand mit sich bringen. Schon damals konnte aber gezeigt werden, dass sich die Befliegung mit Modellflugzeugen wirtschaftlich rechnet. Die Anschaffungskosten für Flugzeug und Kamera entsprachen den Kosten von gerade einmal drei herkömmlich durchgeführten Bildflügen. Allerdings vermerken Przybilla und Wester-Ebbinghaus auch, dass die „exakte Navigation eines ferngelenkten Flugkörpers [...] ganz erhebliche Schwierigkeiten“ bereitet und „die Beurteilung der Fluposition nach Augenmaß zu überraschenden Fehleinschätzungen führt“ (Przybilla 1979, S. 140). Die manuelle Steuerung derartiger

²Penry, Jerry: „The Father of Aerial Photogrammetry“, unter http://archive.amerisurv.com/PDF/TheAmericanSurveyor_Penry-TalbertAbrams_December2015.pdf (Letzter Zugriff: 13.1.2020)

Flugmodelle ist – auch heute noch – komplex und erfordert sehr viel Übung. Ein breiter Einsatz, beispielsweise in Vermessungsbüros, war vorerst nicht denkbar.

Dies änderte sich zu Beginn des neuen Jahrtausends. Verschiedene technische Innovationen, teils Folge der Smartphoneentwicklung, erlaubten die Weiterentwicklung der beschriebenen Versuche zu einer einfach einsetzbaren und kostengünstigen Methode.

Entwicklungen in der Sensorik

Inertialsensoren wie Beschleunigungssensoren (Accelerometer) und Drehratensensoren (Gyroskop) werden schon lange zur Bestimmung der Orientierung von Flugzeugen, Raketen oder Schiffen genutzt. Die Kombination der Sensoren in einem Bauteil wird als Inertial Measurement Unit bezeichnet. In modernen IMUs finden sich zusätzlich zu den genannten Bauteilen meist noch ein Barometer zur Höhenmessung und ein Magnetometer zur Bestimmung der Himmelsrichtungen.

Frühe Implementierungen der Bauteile zeichneten sich durch hohes Gewicht und einen hohen Preis aus. Die modernen Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)-Sensoren sind nicht ganz so leistungsfähig, dafür aber winzig, leicht, billig und sie verbrauchen nur wenig Strom (El-Sheimy 2009). Die Bauteile haben in vielen Alltagsgegenständen wie Uhren, Smartphones oder Fotoapparaten Verwendung gefunden – und sie ermöglichten in Verbindung mit leistungsfähigen Mikrocontrollern die Konstruktion von Mehrflüglern (Multikoptern), die deutlich einfacher als herkömmliche Flugmodelle zu steuern sind. Einen Überblick über die verschiedenen inertialen Systeme findet man in dem Artikel *Hybride Navigationssysteme für Navigation, Regelung und direkte Georeferenzierung* (Bäumker 2013).

Ähnliche Betrachtungen gelten für GNSS-Empfänger. Frühe GPS-Empfänger wie der Macrometer V-1000 aus dem Jahr 1982 hatten die Ausmaße eines Kühlschranks und waren sehr teuer. Die Genauigkeit des Geräts betrug mehrere Meter in Breite, Länge und Höhe (Bock u. a. 1984). Moderne GNSS-Empfänger mit vergleichbaren, wenn nicht besseren, Leistungsmerkmalen stecken inzwischen in jedem Smartphone und kosten nur wenige Euro.

Wie die zuvor besprochenen Inertialsensoren verbessert die zusätzliche Verfügbarkeit von leichten und bezahlbaren On-Board-GNSS-Empfängern das Flugverhalten von Flugmodellen deutlich. Ein Wegwehen des Fluggeräts kann durch Berücksichtigung der Position korrigiert werden. Außerdem gestattet GNSS das autonome Abfliegen von Wegpunkten und ermöglicht damit reproduzierbare und dokumentierte Flugpläne. Fehleinschätzungen der Flugposition gehören somit der Vergangenheit an.

Aufgrund der genannten Entwicklungen spricht man - zumindest im wissenschaftlichen und kommerziellen Einsatz - nicht mehr von Flugmodellen, sondern von *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)* und versteht darunter unbesetzte, wiederbenutzbare motorisierte Fluggeräte (Blyenburgh 1999). Kleinere Fluggeräte mit einem Gewicht unter 10 Kilogramm werden auch als *Small Unmanned Aerial Vehicle (sUAV)* bezeichnet. Ebenfalls gebräuchlich ist die Bezeichnung *Unmanned Aerial System (UAS)*, die neben dem Fluggerät weitere Komponenten wie Bodenstation, Fernsteuerung und Software beinhaltet. Pajeres gibt in dem Beitrag *Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles* Pajeres (2015) einen ausführlichen Überblick über die zahlreichen Einsatzmöglichkeiten von UAVs in der Fernerkundung.

Systemkameras

Kamerasysteme für UAVs werden - anders als in der klassischen Luftbildphotogrammetrie - meist nicht speziell für ihren Einsatz konzipiert und gebaut. Stattdessen kommen Produkte aus dem Consumer-Segment zum Einsatz.

Es lassen sich für Kamera und Optik zur Verwendung in UAV-Bildflügen folgende Voraussetzungen definieren (Cramer und Leinss 2016):

- geringes Gesamtgewicht
- möglichst große Fläche des Bildsensors
- stabile Verarbeitung des Objektivs, keine beweglichen Teile
- Festbrennweiten-Weitwinkelobjektiv

Einige dieser Anforderungen widersprechen sich und wie in vielen Bereichen der Fotografie muss zwischen Bildqualität auf der einen und Gewicht und Preis der Ausrüstung auf der anderen Seite abgewogen werden. Für die Vermessung mit UAVs sind deshalb Systemkameras sehr beliebt. Die relativ neue Gattung ist zwischen den günstigen und leichten Kompakt- oder Actionkameras und den teuren und schweren Spiegelreflexkameras angesiedelt. Das Gewicht einer Systemkamera beträgt wenige hundert Gramm, der Sensor, meist APS-C mit einer Fläche von $22 \times 12 \text{ mm}^2$, ist hinreichend groß und es stehen Wechselobjektive zur Verfügung. Die Bildqualität gängiger Systemkameras ist nicht allzu weit von der einer Spiegelreflexkamera entfernt. Dass im Vergleich zu einer solchen der Spiegel fehlt, ist kein Nachteil, da ohnehin kein menschlicher Beobachter durch die Linse schaut und bewegliche und damit fehleranfällige Bauteile vermieden werden.

Photogrammetrie-Software

Auch im Bereich der Photogrammetrie-Software wurden in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht. Es sind sowohl kommerzielle Produkte wie *Pix4Dmapper* und *Metashape* als auch Open Source Produkte wie *Visual SFM* (*VisualSFM* 2020) entwickelt worden, die sich mit (vermeintlich) wenig Fachwissen bedienen lassen und beeindruckende Ergebnisse liefern. Ein Nachteil dieser Systeme mit hoher Automatisierung ist allerdings die Tatsache, dass „die Angaben zur Bewertung der Qualität einer Berechnung auf das Notwendigste / Einfachste reduziert“ sind, wie Przybilla im Beitrag *Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen* bemängelt (Przybilla u. a. 2015, S. 46).

Entwicklungen in der Leistungsfähigkeit und im Preis von Prozessoren und Grafikkarten sowie die parallele Verarbeitung auf mehreren Kernen führten zu einer deutlichen Reduzierung der Rechenzeiten. Selbst ohne eigene Hardware lassen sich inzwischen photogrammetrische Auswertungen durchführen: Verschiedene Anbieter bieten die Berechnung in der Cloud an. Die Daten, sprich Fotos, werden auf Server des Anbieters hochgeladen und dort von leistungsfähigen High-End Rechnern in die gewünschten digitalen Endprodukte wie Orthofotos, Digitale Geländemodelle oder 3D-Modelle weiterverarbeitet.

1.2.2 Georeferenzierung von UAV-Bilddaten

Unter Georeferenzierung versteht man das Zuweisen von räumlichen Informationen zu einem Datensatz. Durch diesen Vorgang lassen sich Daten wie Punktwolken, Oberflächen oder, im Fall der vorliegenden Arbeit, Fotos in ein geodätisches Referenzsystem einpassen. Geometrische Verzerrungen, wie sie im Datensatz durch die fotografische Zentralprojektion und durch Höhenunterschiede des Geländes stets enthalten sind, werden dabei durch die verwendete Software beseitigt. Der Prozess der Georeferenzierung lässt sich in die Teilschritte Sensororientierung und Orthofotoerstellung unterteilen. Die Sensororientierung, bei der die Parameter der äußeren Orientierung ermittelt werden, lässt sich auf verschiedene Weisen durchführen, so dass auch von verschiedenen Arten der Georeferenzierung gesprochen werden kann.

Indirekte Georeferenzierung

Klassischerweise werden UAV-Bilddaten mithilfe von Passpunkten (Ground Control Points, GCPs) georeferenziert. Dabei werden bestehende oder eigens zu diesem Zwe-

cke ausgelegte Punkte auf dem Boden in einer Auswertesoftware identifiziert und mit im Zielkoordinatensystem ausgemessenen Koordinaten versehen. Die Software korrigiert mittels photogrammetrischer Methoden wie Aerotriangulation und Bündelblockausgleichung die enthaltenen Verzerrungen und passt die Daten in ein geodätisches Referenzsystem ein. Die Anzahl und Position der Passpunkte hat dabei sowohl einen wichtigen Einfluss auf die Position des Bildverbands, als auch auf die von der Photogrammetriesoftware automatisch durchgeführte Kamerakalibrierung.

Die indirekte Georeferenzierung ist eine bewährte und erprobte Methode und auch heute noch das dominierende Verfahren zur Georeferenzierung von UAV-Aufnahmen. Das Einmessen von Passpunkten ist allerdings bei größeren Untersuchungsgebieten aufwendig und unter bestimmten Gegebenheiten schlicht nicht möglich. Als Beispiel seien hier schwer erreichbare Regionen wie zum Beispiel Wälder, Gebirgstäler, steile Klippen oder Katastrophengebiete genannt.

Direkte Georeferenzierung

Aus den aufgeführten Gründen wird bei Bildflügen mit Kleinflugzeugen ein alternatives Verfahren, die direkte Georeferenzierung, präferiert. Bei dieser Methode wird mithilfe von GNSS-Koordinaten und den bereits genannten Sensoren (Drehratensensor, Beschleunigungssensor, Magnetometer, Barometer) die Position und die Orientierung der Kamera zum Zeitpunkt der Aufnahme bestimmt und mit diesen Daten eine Georeferenzierung ganz ohne Betreten des Zielgebiets durchgeführt. Neben den Parametern der äußeren Orientierung - Lage und Position der Kamera - sind hier in der Regel auch die Parameter der inneren Orientierung bekannt, es kommt also eine metrisch stabile Kamera zum Einsatz.

Bei der Vermessung mit UAVs stellt sich die Situation anders dar. Moderne UAVs enthalten zur Stabilisation der Lage grundsätzlich die genannten Sensoren, jedoch nicht in einer für die geodätische Auswertung erforderlichen Genauigkeit. Die geringere Flughöhe von UAVs erlaubt wegen des kleineren Abstands zum untersuchten Gegenstand zwar prinzipiell größere Abweichungen in der Ausrichtungsgenauigkeit, dafür müssen die Sensoren aber wegen des vergleichsweise unruhigen Flugverhaltens schneller reagieren. Den Erfordernissen entsprechende Systeme waren bisher zu schwer und, mit Blick auf die höhere Absturzwahrscheinlichkeit, auch zu teuer für ein UAV. So ist etwa das Inertial Navigation System (INS) *VN-300* von Vectornav mit 0,3 Grad Genauigkeit in der Orientierung mit einem Preis von 5.000 Euro auf der Webseite des Herstellers gelistet (*VectorNav* 2020). Die natürlich nicht wirklich vergleichbare IMU *MPU-9250*, die in vie-

len UAVs zur Steuerung verbaut ist, erhält man im Elektronikhandel für fünf Euro. Sie bietet lediglich 2-10 Grad Orientierungsgenauigkeit. Die Sensoren sind mit der Einführung der MEMS-Technologie deutlich kleiner und leichter geworden, hohe Genauigkeit ist hier aber (vorerst) immer noch gleichzusetzen mit einem hohen Preis.

Ein weiterer Unterschied betrifft die Kameras. In UAVs kommen, wie bereits erläutert, meist keine Kameras mit langzeitstabiler innerer Orientierung, sondern günstige Systemkameras zum Einsatz. Sie müssen vor dem Einsatz oder im Rahmen der Auswertung simultan kalibriert werden.

Dass die direkte Georeferenzierung dennoch auch bei der Vermessung mit UAVs eine zunehmende Rolle spielt, liegt an der Verfügbarkeit von günstigen Real Time Kinetics (RTK) GNSS-Systemen, die im folgenden Abschnitt ausführlicher diskutiert werden. Die Genauigkeit dieser Systeme liegt im Zentimeterbereich und erfüllt damit die hohen Anforderungen der direkten Georeferenzierung.

Da aus den geschilderten Gründen bei der direkten Georeferenzierung mit UAVs somit lediglich meist die Position (und nicht die Orientierung der Kamera) bekannt ist, findet man zur Unterscheidung in der Literatur auch die Bezeichnung *partielle direkte Georeferenzierung* für das Verfahren (Przybilla 2016).

Integrierte Georeferenzierung

Die integrierte Sensororientierung „ist eine Kombination aus direkter und indirekter Sensororientierung“ (Kraus 2012, S. 312). Es werden zur Auswertung also sowohl eingemessene Passpunkte am Boden als auch die zum Auslösezeitpunkt bestimmte GNSS-Position in der Luft herangezogen. Die Bündelblockausgleichung unterscheidet nicht zwischen den beiden Arten von Passpunkten, „die Aufnahmepositionen, an denen die Bilder erfasst werden [...] können als Luftpasspunkte verstanden werden“ (Christian Heipke, Freedon und Rummel 2017, S. 57). Somit stehen letztlich deutlich mehr und besser verteilte Passpunkte zur Verfügung, die sich, bei entsprechender Genauigkeit, positiv auf das Ergebnis der Berechnung auswirken sollten.

Zur Jahrtausendwende wurden Untersuchungen durchgeführt, die sich mit der Frage befassten, welche Auswirkungen das Erfassen von Boden- und Luftpasspunkten auf die Genauigkeit photogrammetrischer Auswertungen hat. Die *Europäische Organisation für experimentelle photogrammetrische Untersuchungen (OEEPE)* hat ein Testszenario definiert, um die Ergebnisse verschiedener Arbeitsgruppen vergleichen zu können (C. Heipke u. a. 2000). In den Ergebnissen zum Test wird der integrierten Sensororientierung im Vergleich zur direkten Sensororientierung eine verbesserte Genauigkeit im Bildraum und

teilweise auch im Objektraum bescheinigt (Christian Heipke, Jacobsen und Wegmann 2001). Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Kamer, Eugster und Nebiker (2013, S. 507) bei der Untersuchung von luft- und bodengestützten Stereobilddaten: „Die systematischen Fehleranteile der direkten Georeferenzierung konnten mit beiden Lösungsstrategien, d.h. sowohl Strategie A mit Einbezug von Passpunkten aus Luftbildern als auch Strategie B mit Einbezug von terrestrisch bestimmten Passpunkten, deutlich reduziert werden“. Da diese Ergebnisse mit flugzeuggetragenen Systemen und unter Einbeziehung von IMU-Daten bzw. Stereobildern erzielt wurden, können sie hier aber nicht wirklich als Referenz dienen.

Frühe Untersuchungen mit UAVs gehen auf das Jahr 2012 zurück (Rieke u. a. 2012). Rieke skizziert die Integration von RTK und einem UAV sowie die zur Auswertung erforderliche Datenverarbeitung. Er arbeitete hier allerdings noch mit Ground Based Augmentation System (GBAS), der an einem Kontrollpunkt gemessene Fehler betrug deshalb etwa 90 Zentimeter. Der Ausblick auf die 1-3 Zentimeter, die sich mit RTK erreichen lassen, wird hier aber schon gegeben.

Ergebnisse mit hoher Genauigkeit wurden 2016 von Gerke und Przybilla im Beitrag *Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns* zusammengefasst (Gerke und Przybilla 2016). Die – allerdings mit einem Starrflügler und On-Board-Zwei-Frequenz-RTK-Empfänger – durchgeführten Versuche deuten auf eine signifikante Verbesserung der absoluten Blockorientierung bei reduzierten Blockdeformationen hin, erkennbar an kleineren RMS-Werten von Kontrollpunktpositionen im Fall der zusätzlichen RTK-Bildpositionen.

Interessant ist auch der recht neue Beitrag *GNSS-Assisted Integrated Sensor Orientation with Sensor Pre-Calibration for Accurate Corridor Mapping* (Zhou u. a. 2018). Der Schwerpunkt liegt hier eher auf der Kamerakalibrierung, die Datenkorrektur im PPK-Verfahren mit RTKLIB ähnelt aber dem in dieser Arbeit verwendeten Ansatz.

1.2.3 RTK-GNSS

Codebasierte Ein-Frequenz-GPS- bzw. GNSS-Daten wie man sie derzeit mit einem gängigen Smartphone ermitteln kann besitzen lediglich eine Genauigkeit von fünf bis zehn Metern. Grund dafür sind in erster Linie Naturphänomene in Iono- und Troposphäre wie zum Beispiel die Sonnenaktivität. Aber auch die Reflexion von Signalen an Untergrund, Häusern und Bäumen spielt eine Rolle. In den letzten Jahren wurden verschiedene Methoden zur Erhöhung der Positionsgenauigkeit entwickelt, bei denen meist Korrektursignale in die Berechnung miteinbezogen werden. Als Beispiel seien hier Wide-Area

Augmentation Service (WAAS) mit 2-5 Metern Genauigkeit, Assisted GPS (A-GPS) mit 2-5 Metern Genauigkeit, Precise Point Positioning (PPP) mit 0,2-0,5 Metern Genauigkeit und Differential Global Positioning System (DGPS) mit 0,02-0,05 Metern Genauigkeit genannt (Toth und Jutzi 2017).

Das leistungsfähigste Verfahren nennt sich RTK-GNSS und bietet Lagegenauigkeiten von ein bis zwei Zentimetern. Die hohe Genauigkeit wird hierbei durch die Verwendung trägerphasenbasierter, differenzieller GNSS-Empfänger erreicht. Bei diesen Systemen werden an Stelle der normalerweise verwendeten Codephase mit Zeitstempel die übertragenden Radiowellen zur Ermittlung der Entfernung zu den Satelliten verwendet (Mader 1986). Die Auflösung der dabei auftretenden Phasenmehrdeutigkeiten zur sogenannten RTK-Fix-Position ist ein komplexer mathematischer Vorgang, der eine Spezialsoftware wie zum Beispiel RTKLIB (*RTKLIB* 2020) erfordert. Gelingt die Auflösung nicht, spricht man von einer Float-Position. Grund dafür könnten eine ungenügende Anzahl von Satelliten oder zu schwache Signale sein.

Die ermittelte Position des Rover wird beim RTK-Verfahren mithilfe der Daten einer Basisstation korrigiert. Die Position der Basisstation ist bekannt, somit kann der aktuell auftretende Fehler berechnet und bis zu einer gewissen Entfernung auf den Rover übertragen werden. Diese Entfernung wird *Baseline* genannt und sollte bei Verwendung von Einfrequenzempfängern maximal zehn Kilometer betragen. Neben echten physischen Referenzstationen gestatten einige Anbieter auch das Berechnen von *virtuellen Referenzstationen* an einem beliebigen Punkt.

Die Berechnung der Position kann entweder in Echtzeit (RTK = Real Time Kinematic) oder im Post Processing-Verfahren erfolgen. Im erstgenannten Fall werden die Korrekturdaten kontinuierlich mithilfe des NTRIP-Protokolls über das Internet oder per Funkstrecke von der Basis auf den Rover übertragen. Abbildung 1.1 verdeutlicht das Verfahren.

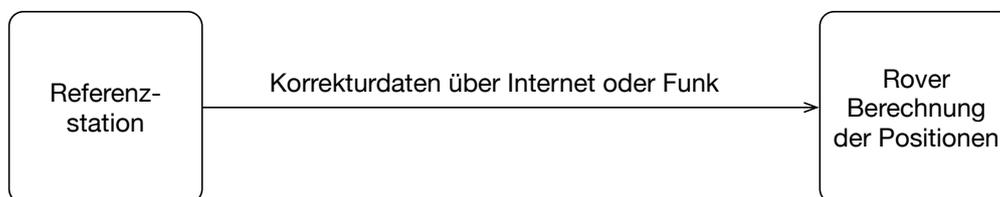


Abbildung 1.1: Real Time Kinematic-Verfahren (RTK)

Beim technisch einfacheren Post Processing-Verfahren werden die Daten im Nachgang

der Messung mit den Daten einer Referenzstation korrigiert (Abbildung 1.2).

Wenn keine Echtzeitkorrektur (wie zum Beispiel für die zentimetergenaue Steuerung eines UAVs) benötigt wird, ist das PPK-Verfahren zu bevorzugen, da hier auftretende Lücken in der Datenversorgung keine Probleme bereiten.

Da in beiden Fällen trägerphasenbasierte Empfänger und Korrekturdaten verwendet werden, wird die Bezeichnung *RTK* oft übergreifend für die Methode benutzt – unabhängig davon ob die Daten in Echtzeit oder im Nachgang korrigiert werden.

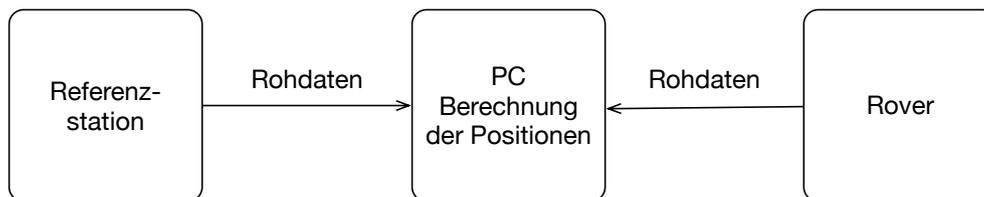


Abbildung 1.2: Post Processing Kinematic-Verfahren (PPK)

Voraussetzung für eine erfolgreiche Positionsbestimmung sind die Daten von mindestens vier Satelliten mit verwertbarer Signalstärke. Während man vor einigen Jahren günstige Zeiten mit hoher Satellitenabdeckung für eine Messung berücksichtigen musste, stehen inzwischen mit den neuen Satellitennavigationssystemen *GLONASS* und *Galileo* jederzeit genug Satelliten zur Verfügung.

1.3 Fragestellung dieser Arbeit

Wie im vorangehenden Kapitel dargestellt, findet man in der Literatur derzeit noch nicht allzu viele Informationen über die Auswirkungen des zusätzlichen Erfassens der Kamerapositionen zu den meist obligatorischen Passpunkten, sprich die integrierte Georeferenzierung mit UAVs. Przybillas mit einem Starrflügler durchgeführte Untersuchungen sind am ehesten vergleichbar; sie deuten auf eine Erhöhung der Genauigkeit hin.

Deshalb soll im Rahmen dieser Arbeit, nun mithilfe eines Multikopters, untersucht werden, welche Vor- und Nachteile das zusätzliche, exakte Erfassen der Kamerapositionen mittels RTK-GNSS bei sUAV-Bildflügen mit sich bringt. Es sollen dabei in erster Linie die Auswirkungen auf die geometrische Genauigkeit und die Zuverlässigkeit von Koordinaten, aber auch für den praktischen Einsatz relevante Größen wie der zeitliche Mehraufwand und zusätzlich anfallende Kosten betrachtet werden.

Im Einzelnen sind dazu folgende Schritte notwendig:

- Planung und Vorbereitung der Flugroute (Kapitel 2.2)
- Auslegen und Einmessen von Pass- und Kontrollpunkten (Kapitel 2.3)
- Durchführung der Befliegung (Kapitel 2.4)
- Korrektur der erfassten Fotopositionen im Post Processing (Kapitel 2.5)
- Auswertung der Daten mit und ohne Fotopositionen (Kapitel 2.6)

2 Methodische Vorgehensweise

2.1 Ausrüstung

Bei dem verwendeten UAV handelt es sich um einen im Eigenbau erstellten Hexakopter mit einer Spannweite von 65 Zentimetern und einem Gewicht von 2600 Gramm (inkl. Akku, ohne Nutzlast).

Kommerzielle Systeme zur direkten Georeferenzierung sind ab etwa 8.000 Euro erhältlich. Der Einsatz eines solchen Fluggeräts wurde aus finanziellen Gründen verworfen. Es sei hier aber darauf hingewiesen, dass die in dieser Arbeit geschilderte Datenerfassung grundsätzlich auch mit einem im Handel erhältlichen Ready to fly-Multikopter erfolgen kann, sofern dieser in der Lage ist, die erforderliche Nutzlast bestehend aus Kamera, Objektiv und RTK-Modul und -Antenne (in Summe ca. 600 Gramm) zu tragen. Hobbydrohnen wie die beliebte DJI Phantom scheiden damit aus, Enterprise Modelle wie zum Beispiel die DJI Matrice 100 sind aber durchaus eine Alternative zum aufwendigen und fehleranfälligen Eigenbau.

Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten des UAV und des RTK-Systems beschrieben.

2.1.1 UAV

Flugcontroller

Herzstück des UAV ist der Flugcontroller *Pixhawk 2 Cube*, eine Implementierung des offenen Hardware-Projekts *Pixhawk* (*Pixhawk* 2020). Bei *Pixhawk* handelt es sich um ein ehemaliges Forschungsprojekt der ETH Zürich, das inzwischen Industriemaßstäbe setzt und die Grundlage für zahlreiche kommerzielle Produkte bildet. Als Beispiel seien die Multikopter der Firma *YUNEEC* (*YUNEEC* 2020) genannt.

Die hier verwendete Variante *Pixhawk Cube* zeichnet sich dadurch aus, dass die enthaltenen 29 MEMS-Sensoren (Beschleunigungs-Sensoren, Gyroskope, Magnetometer, Barometer) getrennt vom Trägerboard vibrationsentkoppelt in einer würfelförmigen IMU

(*Cube*) verbaut sind. Ziel dieser Konstruktion ist es, Interferenzen und andere gegenseitige Beeinflussungen der Sensoren auszuschließen. Zudem ermöglicht eine Temperaturkontrolle mit aktiver Heizung im Cube den Einsatz bei Temperaturen unter null Grad (das gilt nur für den Flugcontroller, Befliegungen bei Minusgraden stellen auch für den Rest des Aufbaus und den Piloten eine besondere Herausforderung dar).

Pixhawk unterstützt verschiedene Firmwares, im UAV-Kontext auch als *Flight Stack* bezeichnet. Für diese Arbeit wurde *PX4* in der Version 1.9.2 verwendet (*PX4* 2019). *PX4* ist ebenfalls ursprünglich ein Projekt der ETH Zürich, das inzwischen Teil der Dronecode-Foundation (*Dronecode* 2020) ist. Näheres dazu findet sich im Artikel von Meier, Honegger und Pollefeys (2015).

GNSS

Bei dem verwendeten GNSS, das lediglich für die Steuerung des Kopters genutzt wird und bei der Georeferenzierung keine Rolle spielt, handelt es sich um das *Here*-Modul von *HEX Technology*, in dem ein *u-blox M8N*-Empfänger seinen Dienst verrichtet.

Rahmen und Landegestell

Rahmen (Flame Wheel F550 Centerplate), Regler (E600, 20A Opto), Motoren (E600 3508) und Rotorblätter sind dem Komponentensortiment der Firma DJI entnommen. Das Landegestell *Aerocraft F550* mit der Erweiterung *Vibration Dampening Kit* entkoppelt die mit einem L-Winkel befestigte Kamera vor Vibrationen durch Rotoren und Motoren.

Funkfernsteuerung

Als Funkfernsteuerung kommt die *FrSky Taranis X9D Plus* sowie ein dazu passender, am UAV befestigter, Empfänger vom Typ *FrSky X8R* zur Anwendung. Die Funkfernsteuerung dient lediglich als Fallback im Notfall sowie zur Durchführung einer kontrollierteren Landung bei unebenem Gelände. Die eigentliche Befliegung erfolgt automatisch.

In Abbildung 2.1 ist schematisch der Aufbau des UAV mit Funkfernsteuerung dargestellt. Ein Foto des UAV ist in Abbildung 2.2 zu sehen.

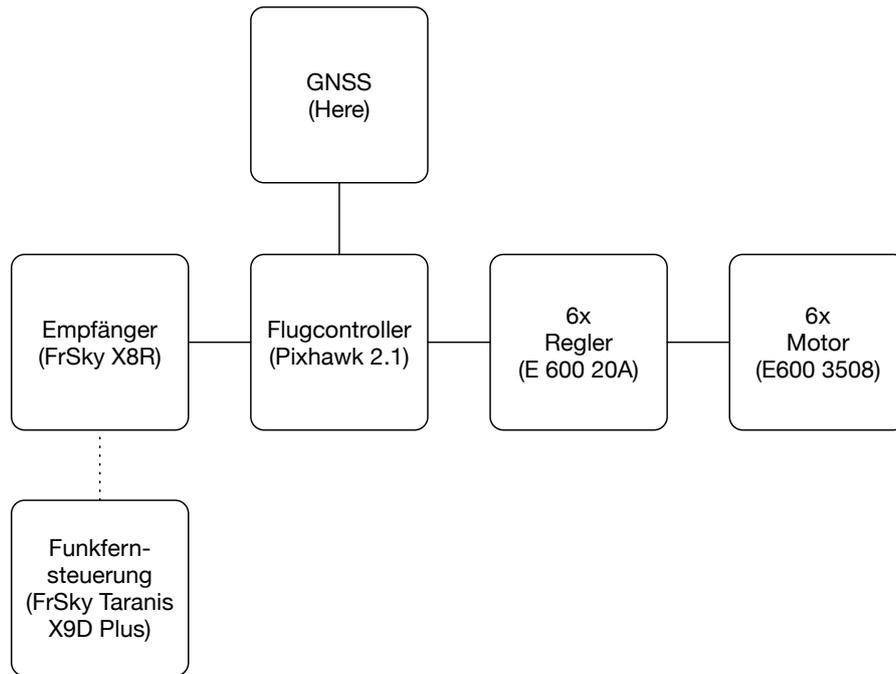


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des UAV mit Funkfernsteuerung



Abbildung 2.2: UAV

2.1.2 Bodenk Kontrollstation

Mithilfe der Bodenstation wird die Mission geplant, auf den Flugcontroller übertragen und das UAV während des Fluges überwacht. In dieser Arbeit wird dafür *QGroundControl* (*QGroundControl* 2019) verwendet, das in der Android-Version auf einem HTC U11 Life-Smartphone ausgeführt wird. Das Smartphone ist via USB OTG mit einem 433 MHz-Sender verbunden, der mit einem am UAV befestigten Empfänger über das *Micro Air Vehicle Communication Protokoll* (*MAVLink* 2020) kommuniziert. Abbildung 2.3 zeigt ein Foto der Fernsteuerung mit integriertem Smartphone und dem seitlich angebrachten Empfänger. Der Aufbau ist in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt

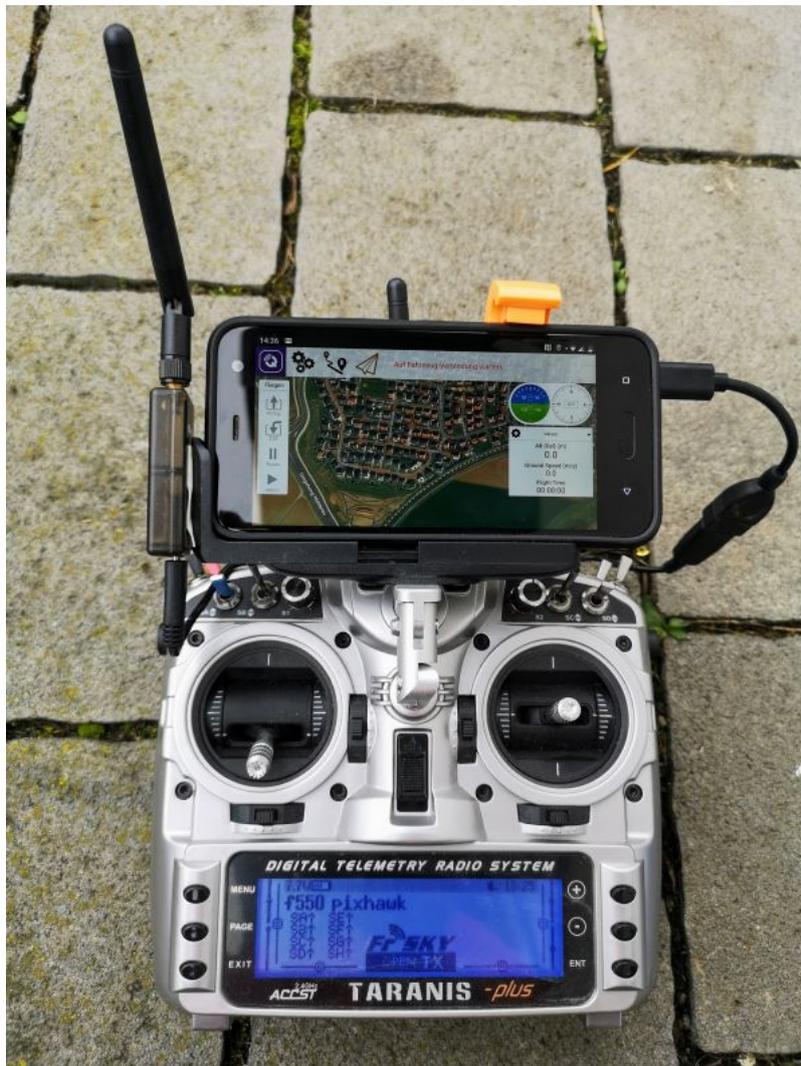


Abbildung 2.3: Funkfernsteuerung mit Empfänger (links) und integriertem Handy

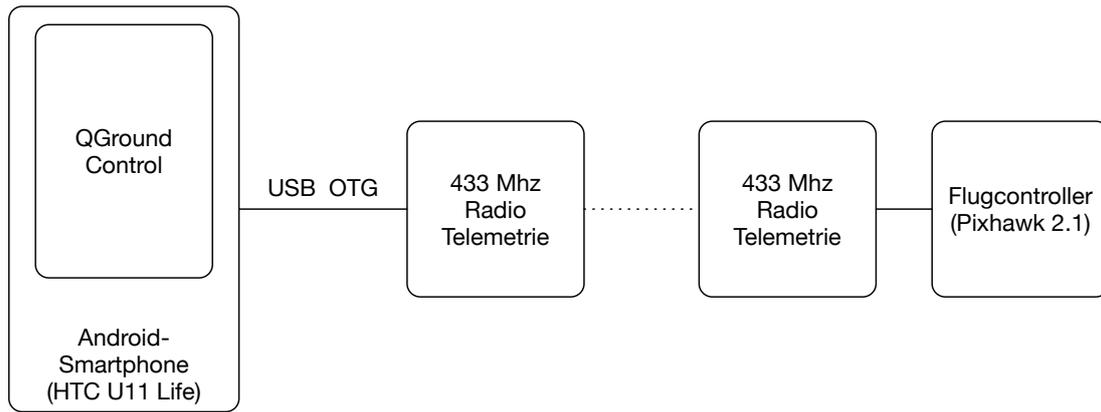


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung der Telemetrie

QGroundControl ist auch für Desktop-Rechner unter verschiedenen Betriebssystemen (Windows, Linux, macOS) erhältlich, die Planung der Route lässt sich somit auch bequem an einem größeren Display durchführen.

2.1.3 Nutzlast: RTK-GNSS und Kamera

Die eigentliche Nutzlast besteht aus einem *Emlid Reach* RTK-GNSS-Modul das mit dem Blitzschuh einer Systemkamera (Sony Alpha 6000 mit Weitwinkelobjektiv Sony 16 mm) verbunden ist. Reach arbeitet mit dem ublox Empfänger NEO M8T, mit dem sich die Trägerphase des L1-Bands auswerten lässt und somit die Bestimmung von Positionen im Zentimeterbereich möglich ist. Das RTK-Modul erfasst beim Auslösen des Blitzimpulses die Position zu einem Foto und speichert diese in einer Logdatei. Die Korrektur der Position erfolgt im Postprocessing (PPK). Die Lösung ist in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt. Abbildung 2.6 zeigt RTK-Modul, Antenne (mit abschirmender Grundplatte) und Kamera.

Um Interferenzen zu vermeiden, wird der GNSS-Empfänger möglichst weit weg von den Motoren des UAV angebracht und mit Aluminiumfolie umwickelt. Als Antenne dient eine *Tallysman TW4721*, die, durch eine Metallplatte gegen Reflexionen abgeschirmt, auf einem Mast am UAV befestigt wird. Tabelle 2.1 zeigt die Einstellungen für das RTK-GNSS-Modul auf dem UAV. Die Auswahl der Satellitensysteme basiert auf einer Empfehlung des Herstellers für UAV-Flüge.

Die Kamera wird mit den Einstellungen in Tabelle 2.2 betrieben (ausgehend von den Werkseinstellungen).

Abbildung 2.7 zeigt alle besprochenen Komponenten im Zusammenspiel. Um die Darstellung übersichtlich zu halten, wurde die Stromversorgung nicht aufgenommen.

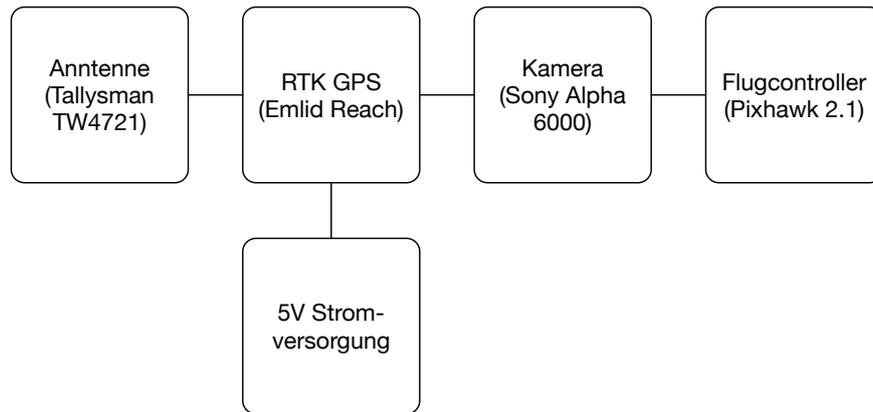


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der RTK-GNSS-Lösung mit Kamera



Abbildung 2.6: Abgeschirmtes Reach RTK-Modul mit Kamera und Antenne

2.1.4 RTK-GNSS-Roverstab

Zur Einmessung der Pass- und Kontrollpunkte kommt ein leistungsstarker Zweifrequenzempfänger (u-blox ZED F9P) zum Einsatz. Er ist mit einer GNSS-Antenne (TW3710 von Tallysman) auf einem ausziehbaren Antennenstab mit Dosenlibelle befestigt (Abbildung 2.8).

Der GNSS-Empfänger ist über Bluetooth mit einem Smartphone verbunden, auf dem

Tabelle 2.1: Einstellungen des Reach RTK-Modul

Einstellung	Wert
Positioning mode	Single
GNSS select	GPS, GLONASS, QZSS
Update rate	5 Hz
GPS AR mode	Continuos
GLONASS AR mode	On
Elevation mask angle	15
SNR mask	35
Max acceleration	1m/s ²
Raw data logging	UBX
Camera Trigger	On

Tabelle 2.2: Einstellungen der Kamera

Einstellung	Wert
Programm	Blendenpriorität (A)
Blende	8
Fokusmodus	Manueller Fokus
Fokusdistanz	unendlich

die App *NTRIP Client for Android* (*NTRIP Client* 2019) läuft (Abbildung 2.9).

Die App bezieht NTRIP-Korrekturdaten vom Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (SAPOS) und reicht diese an den GNSS-Empfänger weiter. Der Empfänger führt eigenständig die RTK-Berechnung durch und liefert das Ergebnis an den NTRIP-Client zurück. Über die Option *Allow external GPS data to be used by other Android Apps* werden die berechneten RTK-Koordinaten anderen Apps auf dem mobilen Gerät zur Verfügung gestellt. Sie ersetzen somit die durch den internen Smartphone-GNSS-Empfänger ermittelten, ungenauen Koordinaten. Zur Erfassung der Positionen wird schließlich die App *Mapit GIS* (*mapitGIS* 2019) genutzt. Mit ihrer Hilfe lassen sich Positionen komfortabel einmessen und mit Namen versehen. Ein Screenshot ist in Abbildung 2.10 wiedergegeben.

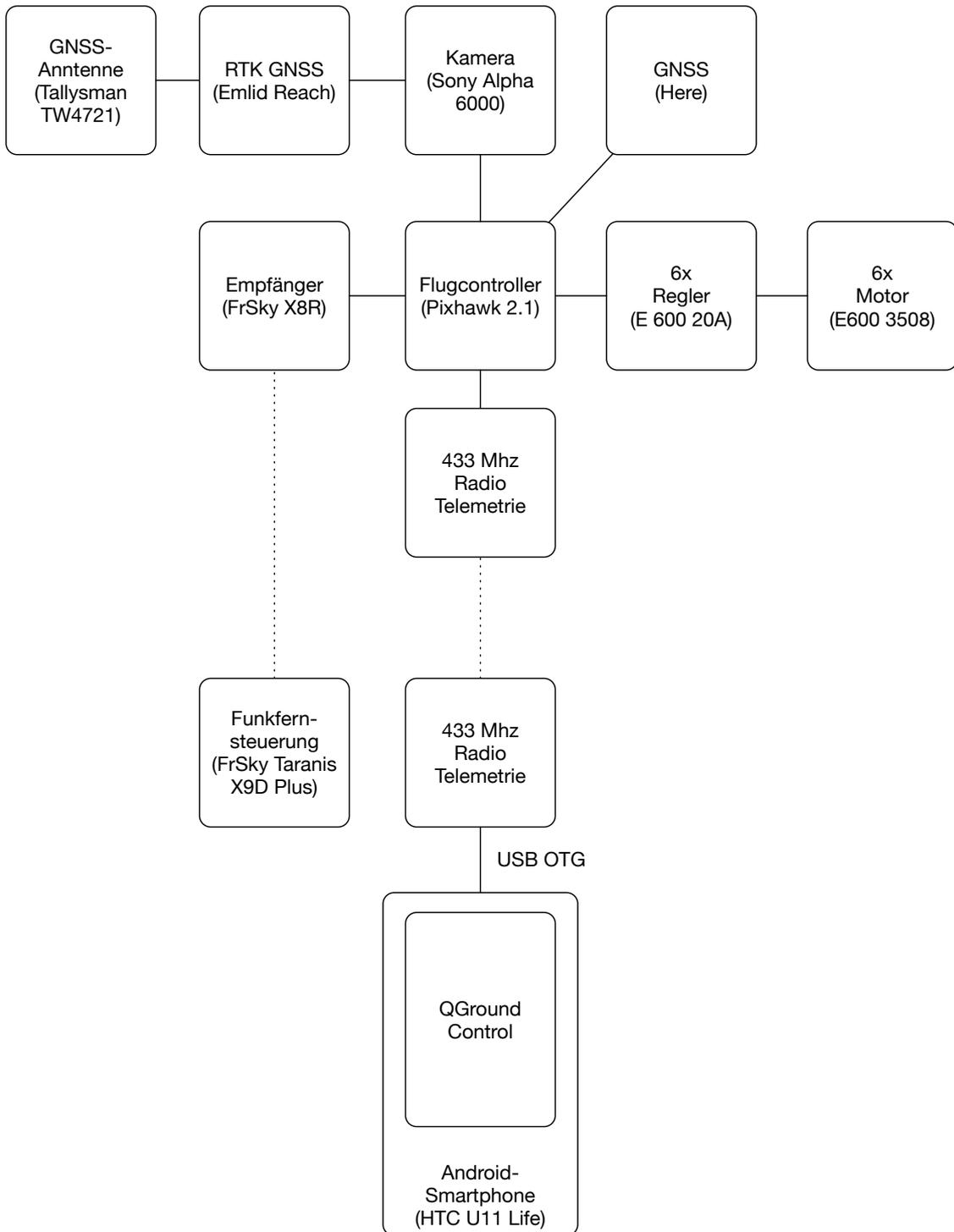


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung von UAV und Fernsteuerung



Abbildung 2.8: GNSS-Antennenstab mit Receiver und Libelle



Abbildung 2.9: NTRIP Client

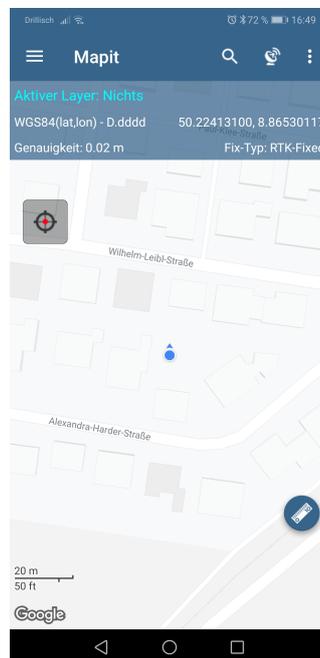


Abbildung 2.10: Mapit

2.2 Planung und Vorbereitung der Flugroute

Als Versuchsfläche für die Befliegung wurde eine relative flache und in westlicher Richtung leicht abschüssige Obstwiese in der Nähe von Nidderau bei Frankfurt ausgewählt. Geringe Variationen in der Höhe sind durch die vorhandenen Bäume gegeben. Eine bebaute Fläche hätte sicherlich zu interessanteren 3D-Modellen geführt, schied aber aus rechtlichen und sicherheitstechnischen Erwägungen aus. Für die Beantwortung der wissenschaftlichen Fragestellung ist das Terrain ohne Bedeutung.

Die Planung der Mission erfolgt auf einem PC mithilfe der Software *QGroundControl*. Die Software ermöglicht im Planungsmodus das Positionieren von Rastern über einem zu untersuchenden Gebiet. QGroundControl generiert aus Form und Lage des Rasters dann eine optimierte Flugroute aus parallelen Flugstreifen (siehe Abbildung 2.11). Die Flugroute wird in einzelne Wegpunkte untergliedert, die das UAV ansteuert und gegebenenfalls eine Aktion, beispielsweise das Auslösen eines Fotos, ausführt (siehe Abbildung 2.12).

Für die automatische Befliegung wurden die in Tabelle 2.3 angegebenen Parameter gesetzt.

Tabelle 2.3: Einstellungen in QGroundControl

Einstellung	Wert
Waypoint alt	50 meters
Flight speed	4.0 m/s
Mode	Survey
Return to Launch	true
Camera	Sony a6000 16mm
Orientation	Landscape
Front overlap	70
Side overlap	30
Hover and capture image	true
Turnaround distance	20m
Refly at 90 degree offset	true
Altitude	50m

Die gewählte Flughöhe von 50 Metern führt bei der verwendeten Kamera zu einer Ground Sampling Distance (GSD) von einem Zentimeter pro Pixel. Um die Genauigkeit der Vermessung, insbesondere in z-Richtung, zu erhöhen, wird das Gebiet orthogonal

ein zweites Mal beflogen (*Refly at 90 degree offset*). Die Fotos werden stets im Schwebflug (*Hover and capture image*) angefertigt, damit die Kamera zum Zeitpunkt der Auslösung möglichst im 90 Grad-Winkel über dem zu fotografierenden Untergrund positioniert ist und Bewegungsunschärfe vermieden wird. Vordere und seitliche Überlappung betragen 70 bzw. 30 Prozent, dadurch wird eine vollständige fotografische Abdeckung des Untersuchungsgebiets gewährleistet. Wie Abbildung 2.12 zu entnehmen ist, beträgt die Flugdauer für die geplanten 499 Meter 4:51 Minuten. Die Dauer wird durch das Schweben über der Fotoposition etwas gestreckt und liegt am Rande dessen, was der Kopter mit der erforderlichen Beladung leisten kann.

Vor Beginn der Befliegung wird die Mission über eine USB-Verbindung auf den Flugcontroller übertragen.

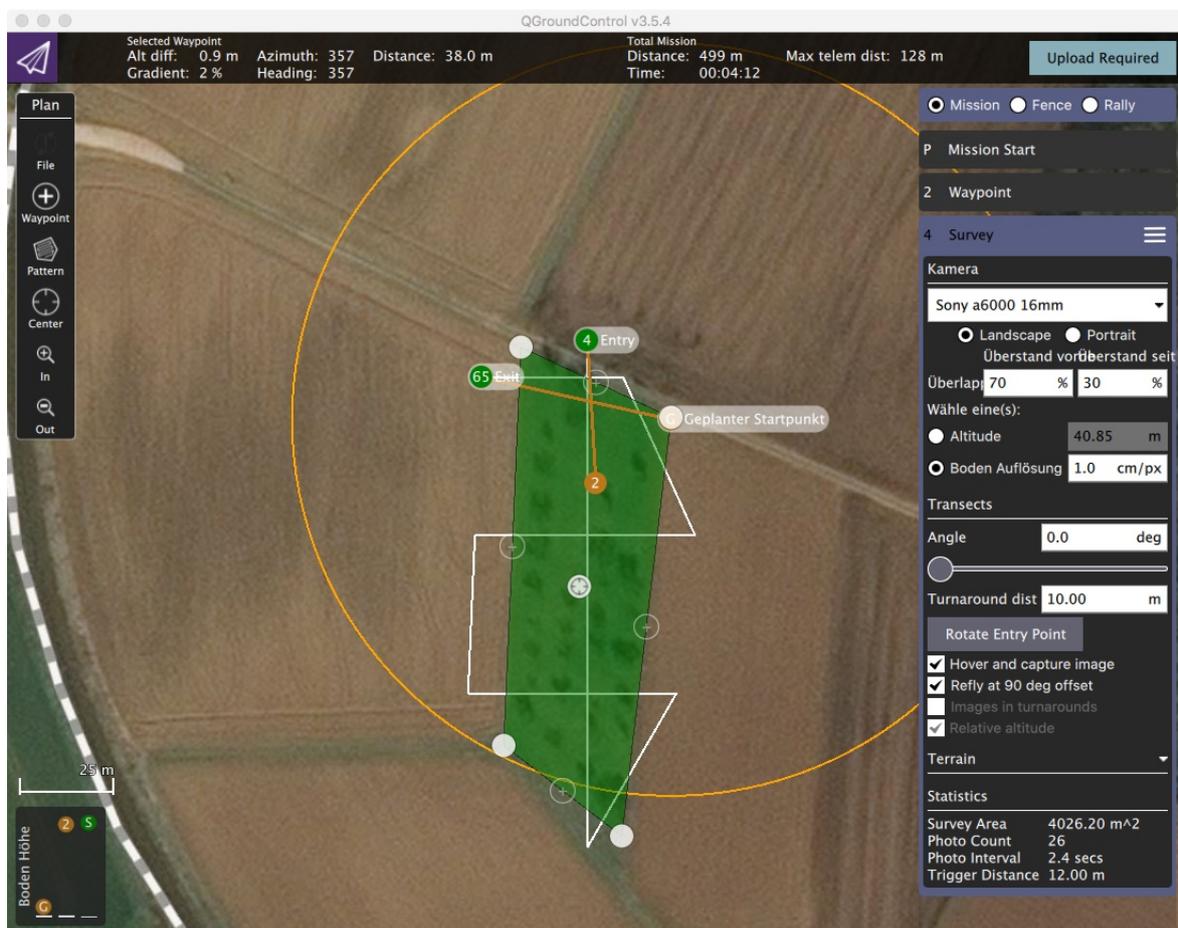


Abbildung 2.11: Befliegungsraster

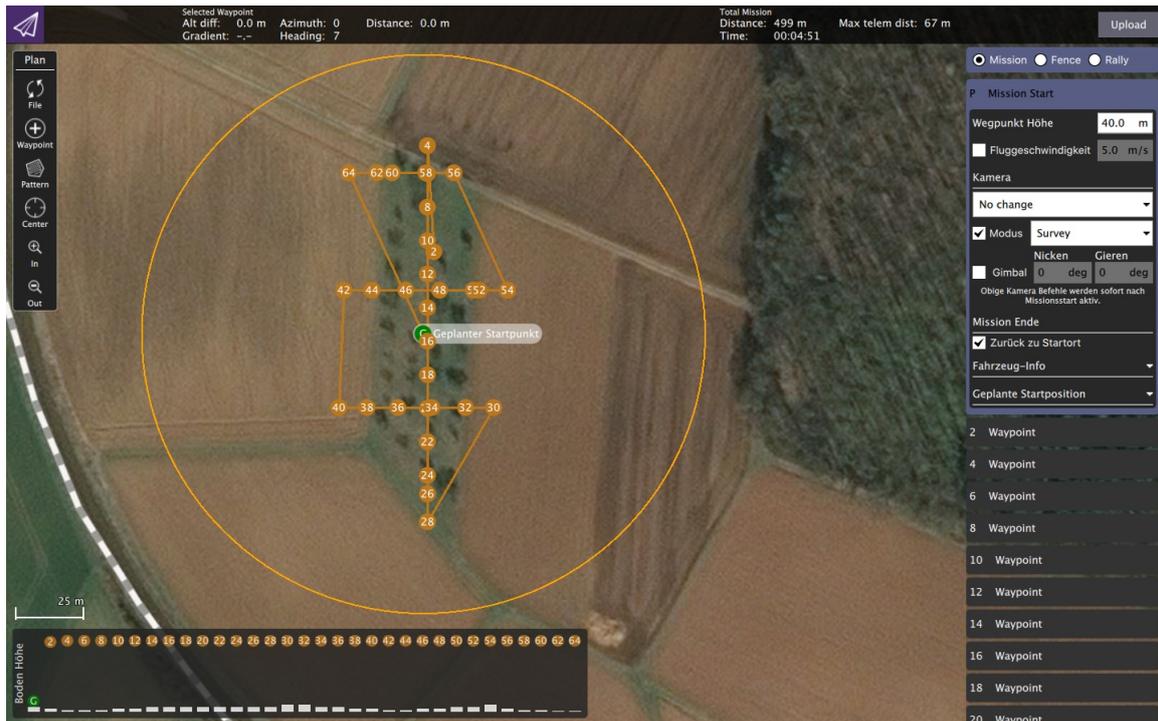


Abbildung 2.12: Wegpunkte

2.3 Auslegen und Einmessen von Pass- und Kontrollpunkten

Vor der Befliegung werden auf dem Versuchsgelände selbstgebaute GCPs verteilt und mit langen Nägeln im Erdreich fixiert (siehe Abbildung 2.13).

Für die Georeferenzierung werden zwischen fünf und acht gleichmäßig verteilte Passpunkte benötigt. Weitere eingemessene Punkte verbessern das Ergebnis nach Angabe des Herstellers der verwendeten Photogrammetriesoftware nicht. Da aber zur Qualitätsbeurteilung der Vermessung weitere Kontrollpunkte erforderlich sind, werden insgesamt 10 GCPs ausgelegt und mittels RTK-GNSS erfasst.

2.4 Durchführung der Befliegung

Die Befliegung der Fläche von 1,3 Hektar erfolgte im September 2019 zur Mittagszeit bei leicht bedecktem Himmel.

Die Befliegung erfolgt im automatischen Modus. Der Multikopter startet alleine, fliegt die definierte Route ab, fertigt dabei die Fotoaufnahmen an und landet wieder. Um



Abbildung 2.13: Selbstgebauter GCP

nichts zu vergessen, wird vor dem Start der vorbereiteten Mission folgende Checkliste abgearbeitet:

- Funkfernsteuerung aktiviert
- Handy angeschlossen
- Power on für Kopter
- Reach Modul über Powerbank aktiviert (blinkt)
- Kamera aktiviert und Objektivdeckel entfernt
- GPS-Lock
- Start der Mission

2.5 Korrektur der erfassten Fotopositionen im Post Processing

Konvertierung nach RINEX

Die während der Befliegung angelegte Datei mit den Fotokoordinaten wird im Nachgang vom RTK-Empfänger geladen und mit einer vom Hersteller Emlid angepassten Variante des Werkzeugs *RTKCONV* (Takasu 2019a) in das Receiver-unabhängige RINEX 3.03-Format konvertiert. Als Eingabeparameter werden das Format (hier *u-blox*), das RAW-File mit der Endung *UBX*, ein Output-Directory und, in den Optionen, die gewünschte RINEX-Version sowie die genutzten Satellitensysteme angegeben (Abbildungen 2.14 und 2.15).

Die Ausgabedatei (.obs) im RINEX-Format enthält in den aufgezeichneten Epochen neben den Standard-FLags (0, OK) spezielle Event-Flags (5, External Event). Mit ihnen kennzeichnet der Receiver das Auslösen der Kamera:

```
> 2019 7 24 13 8 25.5941863 5 0
```

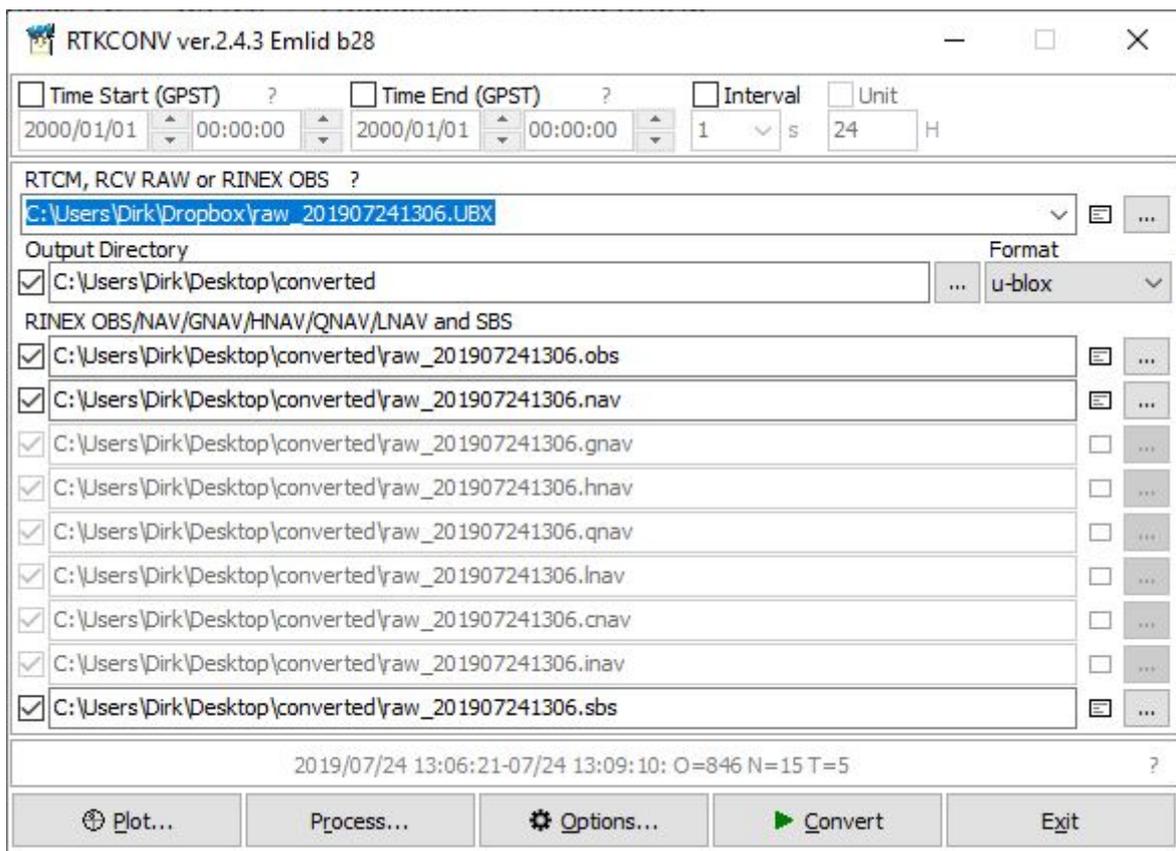


Abbildung 2.14: RINEX-Konvertierung mit RTKCONV

Abbildung 2.15: Optionen in RTKCONV

SAPOS-Korrekturdaten

Korrektursignale von Referenzstationen erhält man in Deutschland zum Beispiel von SAPOS (SAPOS 2020). Im GPPS-Shop können Postprocessing-Daten für jede Position in Hessen als virtuelle Referenzstation (VRS) im RINEX-Format 2.11 bestellt werden, der gewünschte Zeitraum kann dabei minutengenau ausgewählt werden. Abbildung 2.16 zeigt die Maske zur Eingabe der Bestelldaten. Die Startzeit wird in GPS-Zeit eingegeben und liegt damit zwei (Sommerzeit) bzw. eine (Winterzeit) Stunde vor der Ortszeit. Die genauen GPS-Zeiten der Befliegung lassen sich aus der zuvor mit RTKCONV erzeugten RINEX-Datei mit der Endung *.obs* entnehmen. Der Zeitraum wird etwas großzügiger gewählt, damit die Foto-Events auf jeden Fall innerhalb der gewählten Zeitspanne der Korrekturdaten liegen. Die erforderlichen groben Koordinaten der virtuellen Referenzstation lassen sich mithilfe von Google Earth ermitteln, die Position entspricht dem Ort der Befliegung. Die Daten stehen nach einer kurzen Bearbeitungszeit zum Download zur Verfügung.

Postprocessing mit RTKPOST

Die beiden RINEX-Datensätze werden nun zusammen in der Emlid-Variante von RTKPOST (Takasu 2019c) verarbeitet. Die *.obs*-Datei aus der Befliegung wird unter *RINEX OBS*

VRS-Berechnung

Zeit

Bitte geben Sie Ihren gewünschten Beobachtungszeitraum in **GPS-Zeit*** ein.

Datum:

Startzeit: h m s

Dauer: h m

Intervall: s

*GPS-Zeit = MESZ(Sommerzeit) - 2 Stunden
GPS-Zeit = MEZ(Winterzeit) - 1 Stunde

Position

Geben Sie die Koordinaten einer virtuellen Referenzstation in ETRS89 (EPSG 6258) ein. Sie können zwischen dem geographischen und dem geozentrischen kartesischen Koordinatensystem umschalten.

System: Geographisch (B, L, Höhe) - EPSG 6423
 Geozentrisch-kartesisch (X, Y, Z) - EPSG 4936

Breite: N

Länge: E

Höhe: m

Sie können die geographischen Koordinaten in drei Formaten eingeben:

- Grad Min Sek Beispiel: 48 1 21.60
- Grad Min Beispiel: 48 1.36
- Grad Beispiel: 48.02267

Abbildung 2.16: Bestellen der Korrekturdaten bei SAPOS

Rover angegeben. *RINEX OBS*: Base Station entspricht der .o-Datei von SAPOS. Unter *Rinex-Nav* wird schließlich die .nav-Datei der Befliegung eingetragen. Abbildung 2.17 zeigt die Einstellungen. Die weiteren Optionen sind aus Platzgründen in Tabelle 2.4 aufgelistet.

Tabelle 2.4: Einstellungen für RTKPOST

Einstellung	Wert
Positioning mode	Kinematic
Elevation mask	15
SNR mask	35
Rec dynamics	activated
GNSS select	GPS, GLONASS
Integer Ambiguity Res.	Continuous
Filter type	Combined
AR Filter	ON
Base station	RINEX Header Position

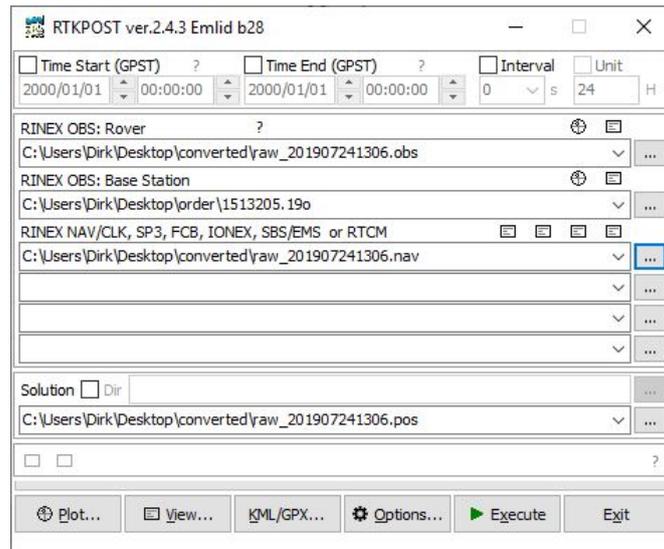


Abbildung 2.17: Einstellungen für RTKPOST

Als Ergebnis des Postprocessings erhält man eine Datei mit der Endung *.pos* mit allen gemessenen Koordinaten sowie eine zweite Datei endend auf *events.pos* mit lediglich den korrigierten Foto-Positionen (Abbildung 2.18). Neben den Koordinaten findet sich in der Datei auch eine Spalte *Q* (für *Quality*), die auf die Güte der Messung schließen lässt. Eine 1 an dieser Stelle steht für eine RTK-Fix-Lösung, also eine Position mit der Lagegenauigkeit von 1-2 Zentimetern.

```
% program : RTKPOST ver.2.4.3 Emlid b28
% inp file : C:\Users\Dirk\Dropbox\Unigis\Befliegung_20190916_bedeckt\raw_201909161243.obs
% inp file : C:\Users\Dirk\Dropbox\Unigis\Befliegung_20190916_bedeckt\order24237\2021259.19o
% inp file : C:\Users\Dirk\Dropbox\Unigis\Befliegung_20190916_bedeckt\raw_201909161243.nav
% obs start : 2019/09/16 12:43:36.0 GPST (week2071 132216.0s)
% obs end : 2019/09/16 12:55:42.2 GPST (week2071 132942.2s)
% ref pos : 50.206669999 8.835303001 125.9999
%
% (lat/lon/height=WGS84/ellipsoidal,Q=1:fix,2:float,3:sbas,4:dgps,5:single,6:ppp,ns=# of satellites)
% GPST latitude(deg) longitude(deg) height(m) Q ns sdn(m) sde(m) sdu(m) sdne(m) sdeu(m) sdun(m) age(s) ratio
2019/09/16 12:48:33.719 50.206969770 8.835368756 214.1796 1 15 0.0059 0.0058 0.0091 0.0018 0.0024 0.0028 3.79 34.4
2019/09/16 12:48:37.555 50.207072889 8.835365939 214.3640 1 15 0.0077 0.0077 0.0118 0.0021 0.0034 0.0038 7.59 34.7
2019/09/16 12:48:39.985 50.207177960 8.835333202 214.7431 1 15 0.0090 0.0090 0.0138 0.0024 0.0041 0.0045 9.99 35.3
2019/09/16 12:48:50.549 50.207285795 8.835331288 215.4920 1 15 0.0051 0.0050 0.0081 0.0017 0.0021 0.0025 0.59 32.9
2019/09/16 12:49:01.771 50.207177680 8.835345471 214.0676 2 15 0.0306 0.0299 0.0211 0.0039 0.0068 0.0064 1.79 0.0
```

Abbildung 2.18: Teil der Datei mit den korrigierten Positionen

Die korrigierten Foto-Positionen werden für die Weiterverarbeitung in der Photogrammetrie-Software benötigt. Der Postprocessing-Workflow ist in Abbildung 2.19 dargestellt.

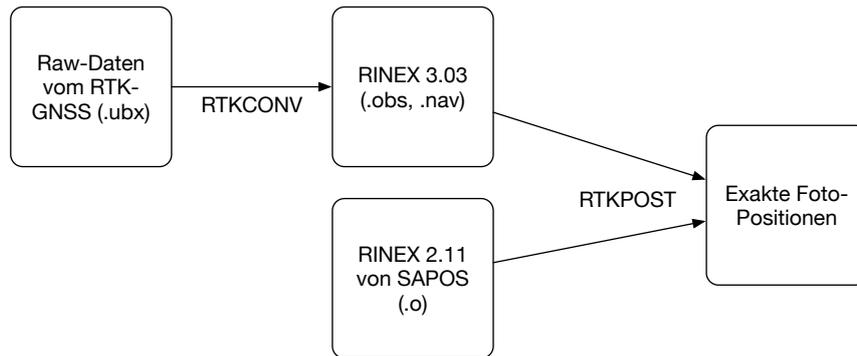


Abbildung 2.19: Postprocessing-Workflow

2.6 Auswertung der Daten mit und ohne Fotopositionen

Die Auswertung der Daten erfolgte mit der Vollversion der Software Pix4Dmapper des Unternehmens Pix4D in der Version 4.4.12 auf einem Windows PC mit vier Kernen bis zu 3,8 GHz und 32 GB RAM.

Die 36 Fotos werden in ein neu angelegtes Projekt importiert und mit den im vorherigen Abschnitt korrigierten Foto-Positionen versehen. Pix4Dmapper erlaubt die Eingabe einer Genauigkeit für die Geokoordinaten. Damit lässt sich die Qualität der Daten beschreiben, was dann bei der Berechnung berücksichtigt wird. Es werden für die Koordinaten der Fotos 0,2 Meter für die horizontale und 0,4 Meter für die vertikale Genauigkeit vergeben. Punkt 5, der nur mit einer nicht fixen Position ($Q=2$) bestimmt werden konnte, wird mit einer Genauigkeit von 5 bzw. 10 Meter beschrieben.

Die Koordinaten der Passpunkte werden ebenfalls in Pix4Dmapper eingelesen und in jeweils mindestens drei Fotos markiert. Punkte, die als Kontrollpunkt dienen sollen, lassen sich in der Software entsprechend kennzeichnen.

Die verwendete Kamera samt Objektiv ermittelt die Software aus den EXIF-Daten der Fotos (EXIF ID: ILCE-6000_E16mmF2.8_16.0_6000x4000) und lädt die entsprechenden internen Parameter der Kamera aus einer Datenbank.

Als Ausgabekoordinatensystem wurde entsprechend den erfassten Daten *WGS 84* gewählt.

Das Pix4Dmapper-Template für die Auswertung von Senkrechtaufnahmen heißt *3D Maps*. Die darin enthaltenen Berechnungsschritte (Kameraorientierung, Punktwolke und

Vermaschung sowie Digitales Oberflächenmodell, Orthofoto und Index) werden zweimal durchgeführt: Einmal ohne Bildkoordinaten und einmal unter Einbeziehung der mittels RTK-GNSS erfassten Positionsparameter.

Für die Kalibrierung der Kamera wird für die Berechnung mit geokodierten Bildern die Kalibrierungsmethode *Alternative* ausgewählt, die für Luftbilder mit genauen Geokoordinaten, wenig Texturen und flaches Terrain optimiert ist.

3 Ergebnisse

3.1 Geokoordinaten der Pass- und Kontrollpunkte

Die folgende Tabelle listet die Koordinaten der eingemessenen Pass- bzw. Kontrollpunkte auf:

Tabelle 3.1: Geokoordinaten der Pass- und Kontrollpunkte

Nr.	Breite	Länge	Höhe	Qualität
10	50.20695217	8.83530433	172.0	RTK-Fixed
9	50.20698317	8.83555167	173.0	RTK-Fixed
8	50.20678300	8.83550967	172.9	RTK-Fixed
7	50.20663267	8.83554183	173.5	RTK-Fixed
4	50.20616983	8.83536317	173.5	RTK-Fixed
2	50.20672317	8.83518983	171.7	RTK-Fixed

Es wurden lediglich Positionen in die Tabelle und in die Auswertung aufgenommen, bei denen eine RTK-Fix-Lösung erzielt wurde. Die Lagegenauigkeit beträgt bei diesen Punkten ein bis zwei Zentimeter. Bei einigen der ursprünglich zehn eingemessenen Punkten war dies aus technischen Gründen nicht gegeben, sodass die Verteilung der verbliebenen, nutzbaren Passpunkte nicht ganz optimal aber doch hinreichend gut ist.

Abbildung 3.1 zeigt die eingemessenen Punkte in einer mit Google Earth (*Google Earth Pro* 2019) angefertigten Aufsicht. Im Sinne einer gleichmäßigen Verteilung der Passpunkte kann auf Punkt 8 am ehesten verzichtet werden, der Punkt wird deshalb als Kontrollpunkt verwendet. Bei der Auswertung wird dieser Punkt nicht zur Kamerakalibrierung verwendet und beeinflusst das resultierende Modell nicht. Er kann somit als ein Kriterium zur Bewertung der Genauigkeit der Messung herangezogen werden.



Abbildung 3.1: Karte mit Pass- und Kontrollpunkten

3.2 Geokoordinaten der Fotos

Die geflogene Route wurde in Form eines Keyhole Markup Language (KML)-Datensatzes aus dem Flightcontroller ausgelesen und dieser in Google Earth importiert. Abbildung 3.2 zeigt das Ergebnis als Screenshot.



Abbildung 3.2: Geflogene Route

Bei der Befliegung wurden 36 Fotos automatisch angefertigt. Um dem Leser eine Vorstellung davon zu vermitteln, was auf diesen Aufnahmen zu sehen ist, werden sie als Thumbnails in Abbildung 3.4 gezeigt.

Abbildung 3.3 visualisiert im oberen Bereich die Anzahl der gültigen Satelliten, von denen das RTK-Modul während der Befliegung Daten empfangen hat. Wie die mit dem Programm RTKPLOT (Takasu 2019b) angefertigte Darstellung erkennen lässt, liegt die Anzahl fast durchgehend bei mehr als 10 Satelliten.

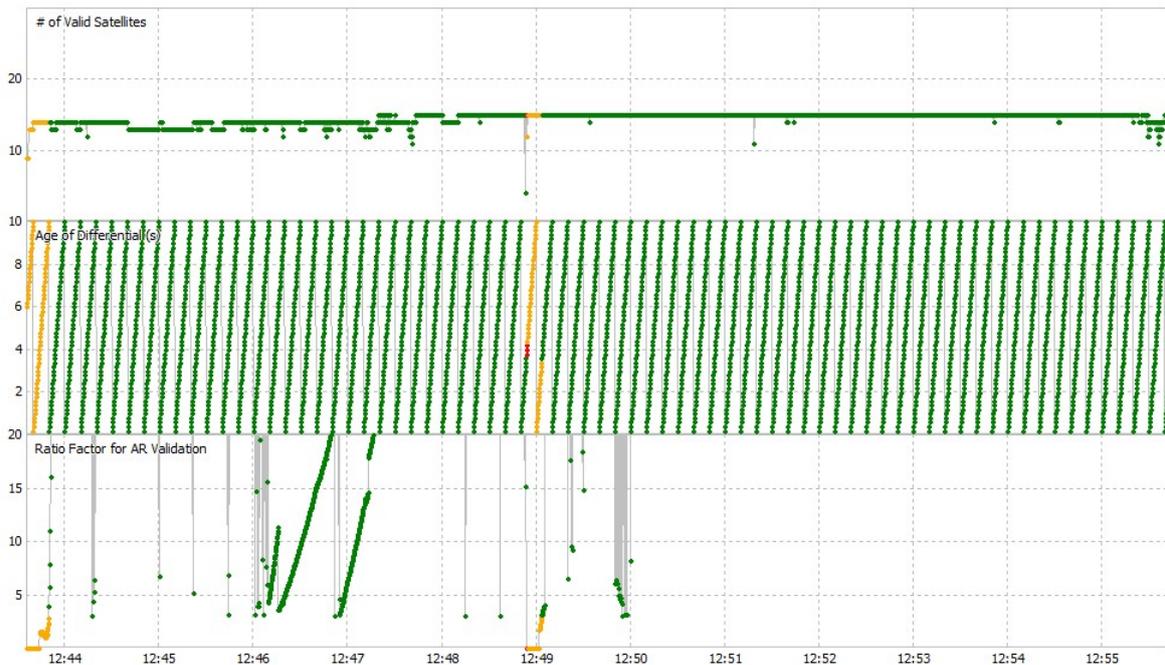


Abbildung 3.3: Anzahl der gültigen Satelliten während der Befliegung

Tabelle 3.2 listet die Geokoordinaten der Bilder nach der Korrektur mit den Daten der virtuellen Referenzstation im Postprocessing auf. Wie aus der Tabelle ersichtlich ist, wurden für alle Fotopositionen außer Position Nummer 5 die Phasenmehrdeutigkeiten gelöst und eine RTK-Fix-Position erhalten.



Abbildung 3.4: Luftaufnahmen

Tabelle 3.2: Geokoordinaten der Bilder

Nr.	Breite	Länge	Höhe	Qualität
1	50.206969770	8.835368756	214.1796	1
2	50.207072889	8.835365939	214.3640	1
3	50.207177960	8.835333202	214.7431	1
4	50.207285795	8.835331288	215.4920	1
5	50.207177680	8.835345471	214.0676	2
6	50.207068507	8.835319720	214.9106	1
7	50.206961534	8.835316322	214.4854	1
8	50.206855029	8.835320216	214.3348	1
9	50.206745568	8.835320159	214.1971	1
10	50.206638643	8.835317144	214.6236	1
11	50.206529891	8.835325752	214.5074	1
12	50.206423107	8.835326615	214.4192	1
13	50.206312878	8.835324430	214.3744	1
14	50.206204404	8.835326686	214.1938	1
15	50.206099884	8.835335028	213.0064	1
16	50.206196131	8.835436368	215.0533	1
17	50.206285075	8.835521675	214.8010	1
18	50.206376608	8.835601396	214.6762	1
19	50.206452514	8.835485436	214.9206	1
20	50.206441873	8.835304025	214.8198	1
21	50.206439390	8.835136937	214.9939	1
22	50.206445013	8.834971782	215.0571	1
23	50.206538274	8.834905404	214.6525	1
24	50.206647670	8.834906688	214.5901	1
25	50.206757581	8.834905212	214.5307	1
26	50.206823214	8.835048486	214.3280	1
27	50.206823533	8.835211996	214.2301	1
28	50.206824591	8.835380206	214.8962	1
29	50.206822960	8.835547326	214.4435	1
30	50.206820230	8.835719744	214.5852	1
31	50.206926411	8.835666523	215.0589	1
32	50.207021613	8.835591656	215.7156	1
33	50.207117193	8.835516086	215.1938	1
34	50.207198073	8.835409280	215.0945	1
35	50.207199259	8.835237075	215.2287	1
36	50.207192119	8.835066903	215.0506	1

Abbildung 3.5 zeigt die Bildpositionen in einer Ground Track-Darstellung, ebenfalls mit RTKPLOT erstellt. Man erkennt die erfassten Positionen und ihre Güte (RTK-Fixe Positionen sind grün, Punkt 5, der nur in Float-Qualität erfasst wurde, gelb dargestellt).

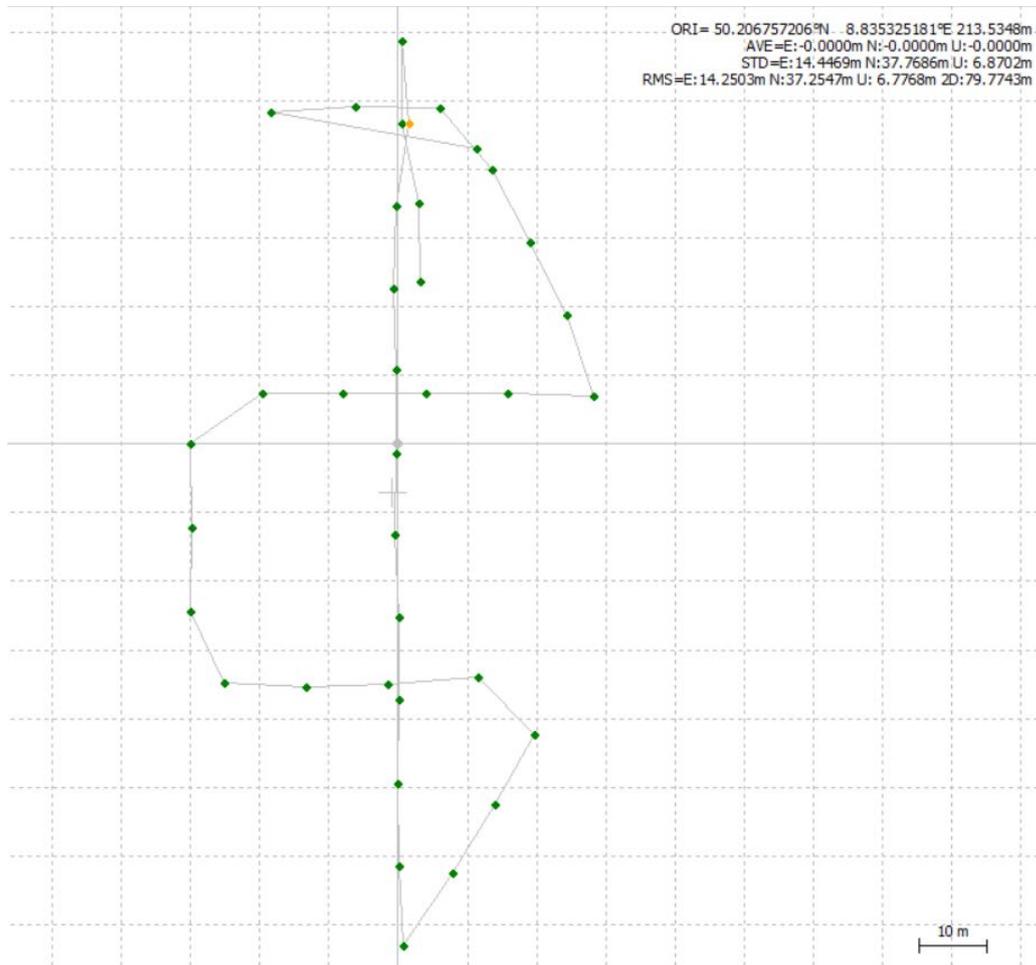


Abbildung 3.5: RTKPLOT-Groundtrack (Grün = RTK-Fix, Gelb = Float)

3.3 Ergebnisse der photogrammetrischen Auswertung mit Pix4Dmapper

Abbildung 3.6 zeigt Pass- bzw. Kontrollpunkte (blaue Kreuze) und Fotopositionen (rote Punkte) in der Pix4Dmapper-Kartenansicht nach dem Importieren der Daten.

Im Folgenden werden für die Beantwortung der Fragestellung dieser Arbeit relevante Ergebnisse der beiden Rechenläufe mit Pix4Dmapper aufgeführt. Die kompletten Pix4D-Auswertungen finden sich in Form der *Pix4D-Quality Reports* im Anhang.



Abbildung 3.6: Pix4D-Kartenansicht

Die mittlere Bodenauflösung (Average Ground Sampling Distance) beträgt bei der durchgeführten Befliegung 1,06 Zentimeter (siehe Tabelle 3.3). Ein Pixel auf dem Bild entspricht also etwa einem Zentimeter auf dem Boden und deckt einen Quadratzentimeter ab, unabhängig davon ob die Bildpositionen in die Berechnung miteinbezogen werden.

Die Rechenzeit war bei dem Rechendurchgang mit Bildpositionen mit vier Minuten und 32 Sekunden um ein Drittel länger als ohne Bildpositionen.

Tabelle 3.3: Zusammenfassende Ergebnisse

Eigenschaft	Ohne Bildpositionen	Mit Bildpositionen
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1,06 cm	1,06 cm
Area Covered	1,2580 ha	1,3071 ha
Time for Initial Processing (without report)	03m:03s	04m:32s

In Tabelle 3.4 sind die Ergebnisse des Pix4Dmapper-Quality Checks gegenübergestellt.

Tabelle 3.4: Ergebnisse des Pix4Dmapper-Quality Checks

Eigenschaft	Ohne Bildpositionen	Mit Bildpositionen
Keypoints per image (median)	73.771	73.771
Calibrated images	36/36	36/36
Relative difference between initial and optimized internal camera parameters	2,08 %	2,62 %
Matches per calibrated image (median)	21.123	33.109,9
Mean RMS error of GCPs (5 3D)	0,013 m	0,015 m

Es wurden durchschnittlich 73.771 markante Punkte (Keypoints) pro Bild gefunden. Das sind Punkte mit hohem Kontrast, Texturen oder ähnlichen Unterscheidungsmerkmalen.

Alle 36 Fotos konnten kalibriert werden und gehen somit in die Verarbeitung ein. Im zweiten Rechendurchgang, bei dem die Geokoordinaten der Bilder in die Rechnung einbezogen wurden, konnten alle 36 gemessenen Positionen verwendet werden.

Pix4Dmapper rechnet ausgehend von einem initialen Kameramodell, basierend auf Brennweite und Sensorgröße aus den EXIF-Daten der Bilder, mithilfe der Bilddaten ein optimiertes Modell aus. Dieses optimierte Kameramodell unterscheidet sich um 2,08% (ohne Bildkoordinaten) bzw. 2,62% (mit Bildkoordinaten) vom initialen Modell.

Im Matching sucht die Software nach Keypoints, die auf mehreren Bildern vorhanden sind. Die Anzahl der zugeordneten Merkmale (Matches) pro kalibriertem Bild beträgt im Fall der Rechnung mit Bildpositionen 33.109. Der Wert ist um etwa ein Drittel größer als in der Rechnung ohne Bildpositionen, hier wurden durchschnittlich 21.123 Merkmale pro Bild zugeordnet.

Abbildung 3.7 visualisiert diesen Sachverhalt durch unterschiedlich starke Verbindungslinien zwischen den Fotos. In der Darstellung zur Rechnung mit Bildpositionen sind die Linien deutlich dunkler, es gibt mehr gemeinsame Punkte.

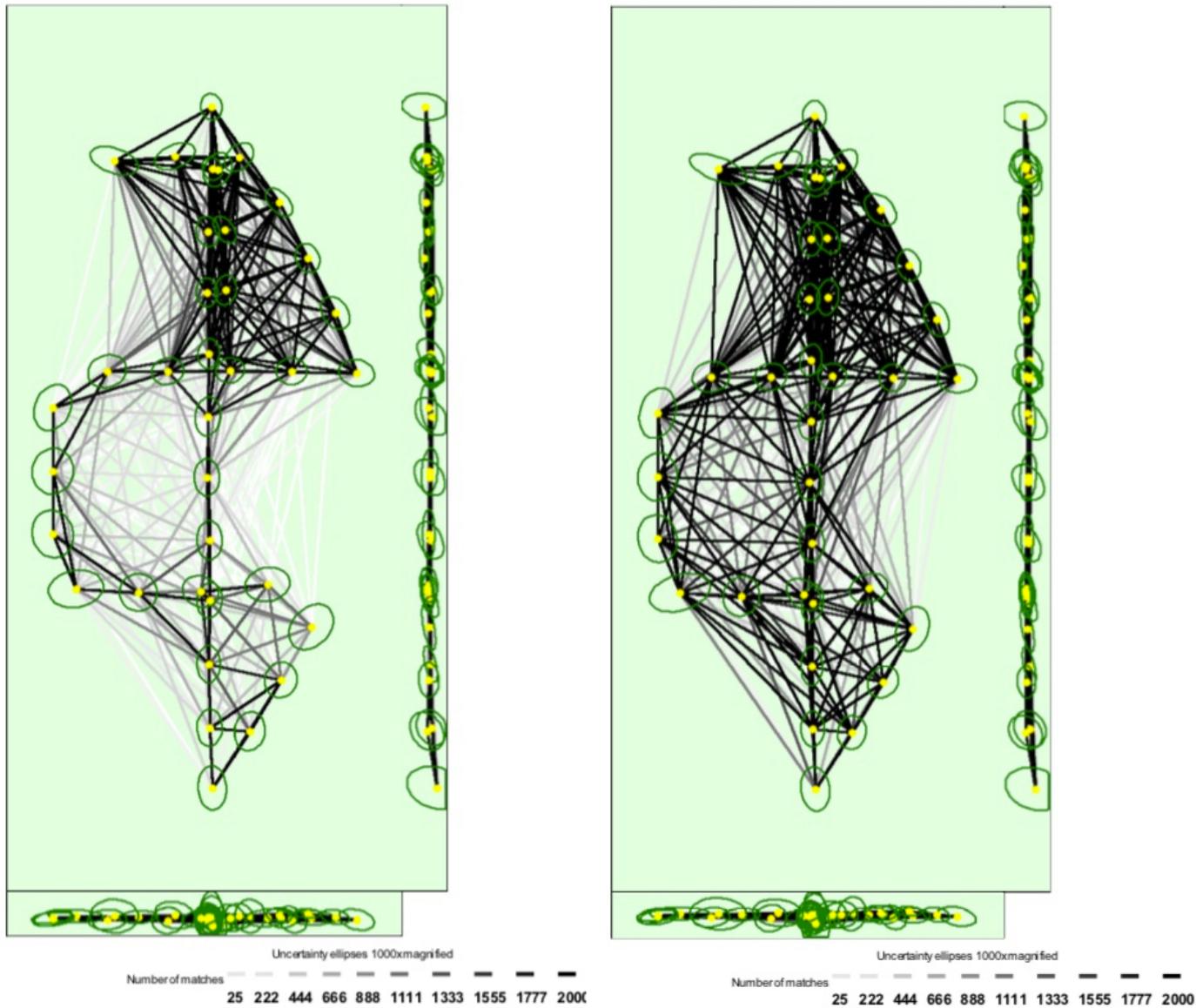


Abbildung 3.7: 2D Keypoint Matches (links ohne, rechts mit Bildpositionen)

Die Vorschauen der resultierenden Orthofotos und DSMs (Abbildung 3.8 und 3.9) erlauben eine visuelle Inspektion der initialen Kalibrierung. Es sind keine Verschiebungen, Risse, Löcher oder sonstige Artefakte zu erkennen.

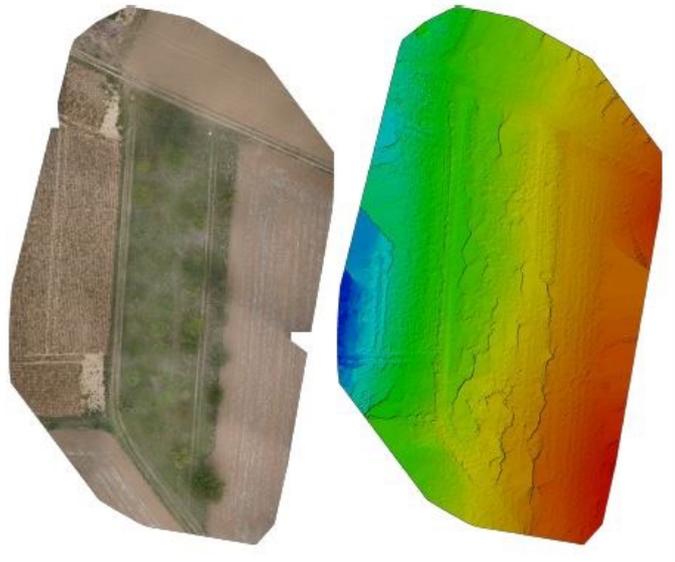


Abbildung 3.8: Orthofoto und DSM (ohne Bildpositionen)

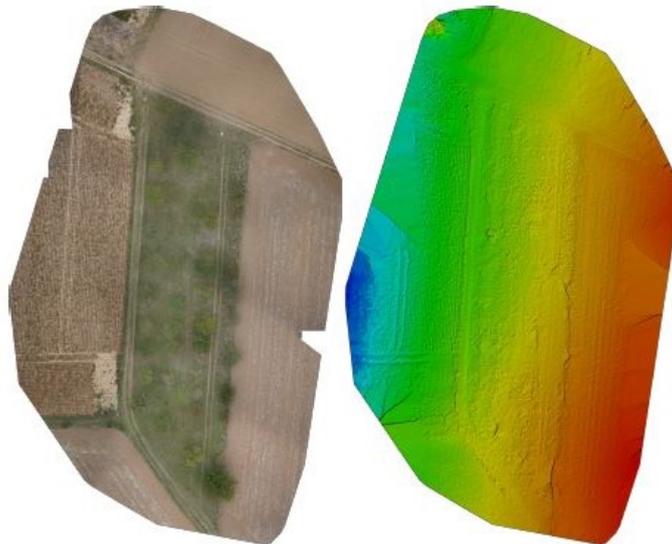


Abbildung 3.9: Orthofoto und DSM (mit Bildpositionen)

Abbildung 3.10 zeigt die Positionen von Fotos (Punkte) und GCPs (Kreuze) vor (blau) und nach (grün) der Berechnung in der Aufsicht. Grüne und blaue Kreuze sind in beiden Fällen praktisch deckungsgleich; die Lage der fünf GCPs wurde durch die Rechnung also praktisch nicht verändert. Die Positionen der Fotoaufnahmen dagegen wurden von der Software mit einem Offset in stets gleicher Richtung versehen, die berechneten Positionen weichen hier also von den gemessenen Positionen ab.

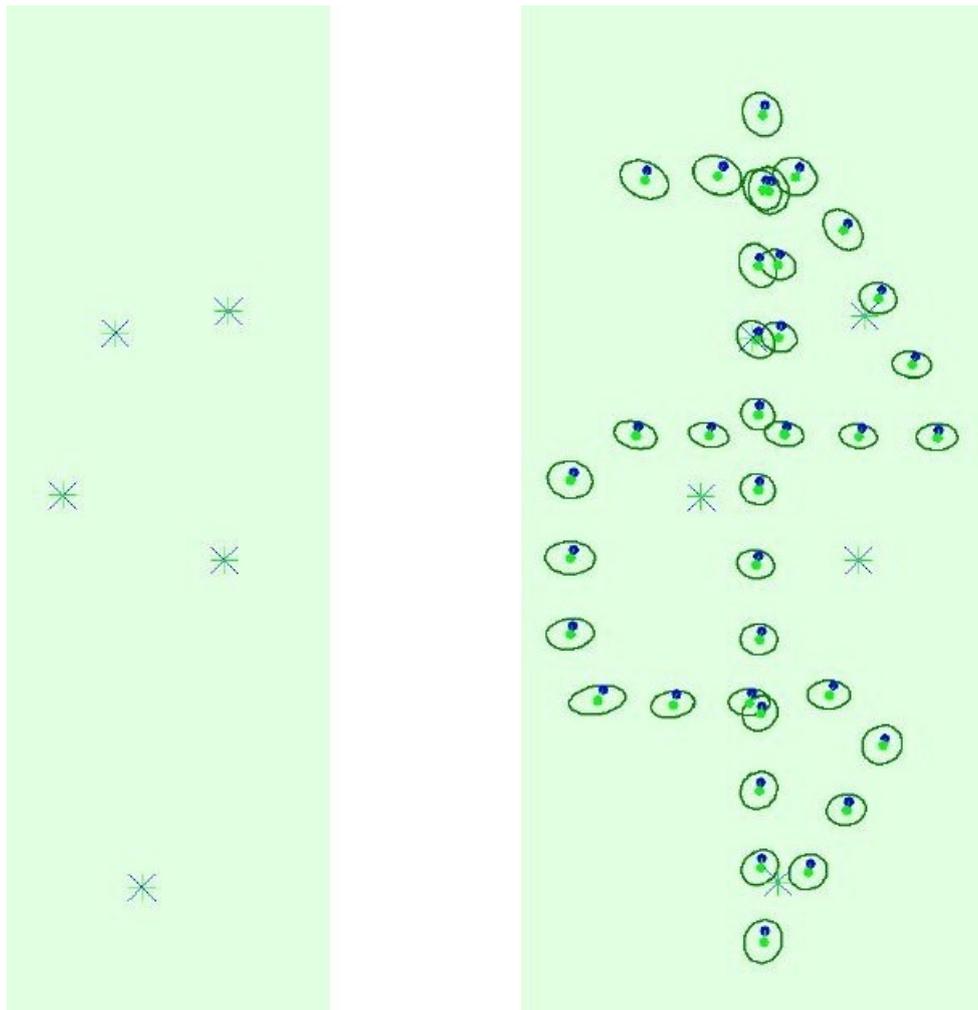


Abbildung 3.10: Positionen von GCPs und Fotos (nur rechts) in der Aufsicht

Die Abdeckung ist in beiden Rechengängen gleich gut, der in Abbildung 3.11 grün dargestellte Bereich mit mindestens fünf überlappenden Bildern ist praktisch identisch. Es sind keine nicht-grün gefärbten Bereiche im Inneren zu erkennen.

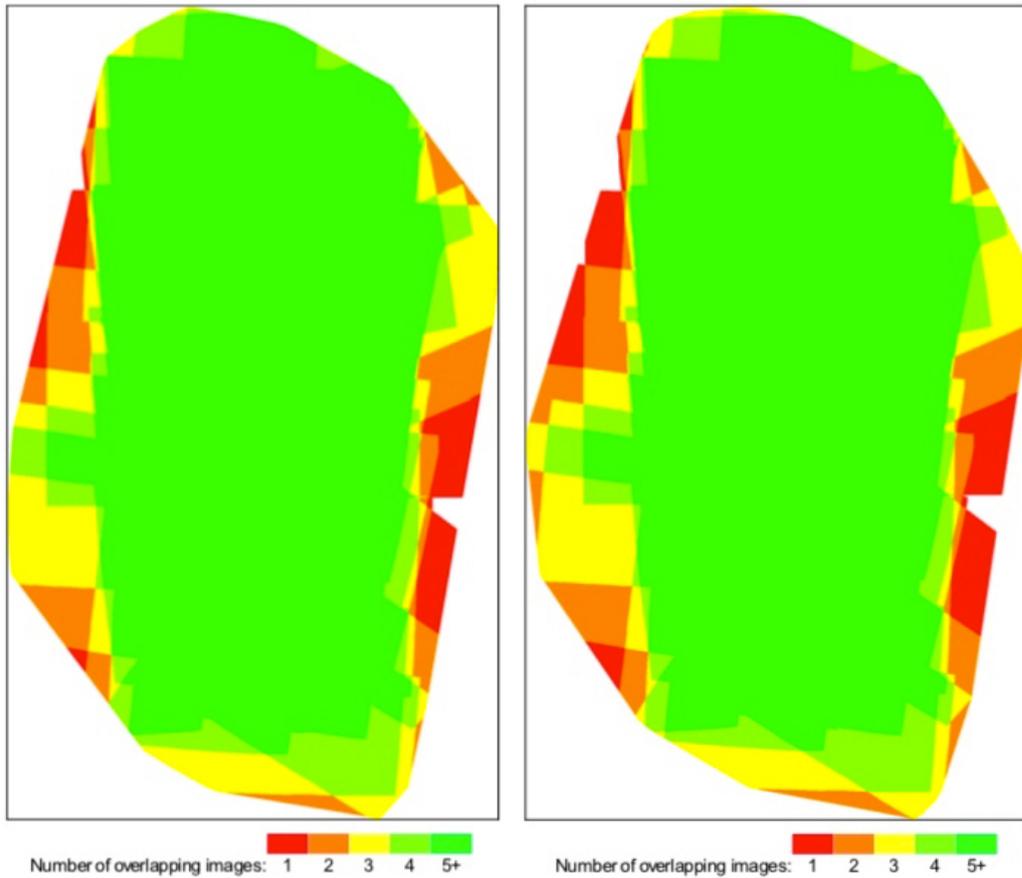


Abbildung 3.11: Überlappung (links ohne, rechts mit Bildpositionen)

Die durchschnittlichen Unsicherheiten der absoluten Kamerapositionen in X-, Y- und Z-Richtung (Tabelle 3.5 und 3.6) sind mit Werten zwischen 5 und 11 Millimetern ohne Bildpositionen bzw. 7 und 13 Millimetern mit Bildpositionen in beiden Fällen sehr gering. Gleiches gilt für die Orientierungen, die sich zwischen 0,002 und 0,007 Grad (ohne Bildpositionen) bzw. 0,002 und 0,008 Grad (mit Bildpositionen) bewegen.

Tabelle 3.5: Ungenauigkeiten der Kameraposition und -orientierung ohne Bildpositionen

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0,005	0,005	0,011	0,007	0,007	0,002
Sigma	0,001	0,001	0,000	0,002	0,001	0,000

Tabelle 3.6: Ungenauigkeiten der Kameraposition und -orientierung mit Bildpositionen

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0,007	0,005	0,013	0,007	0,008	0,002
Sigma	0,001	0,001	0,000	0,002	0,001	0,000

Deutlicher wird der Einfluss bei den Ergebnissen der Bündelblockausgleichung (Tabelle 3.7). Hier ermöglichen die zusätzlichen Bildpositionen das Erkennen von deutlich mehr 2D-Bildpositionen auf den Fotos (1.178.000 gegenüber 774.087). Die höhere Anzahl führt erwartungsgemäß in der Folge auch zu einer höheren Anzahl von 3D-Punkten. Der mittlere Reprojektionsfehler, der die Abweichung der initialen Position auf dem Bild gegenüber der mithilfe der 3D-Punkte reprojizierten Position angibt, wächst von 0,145 Pixel auf 0,231 Pixel.

Tabelle 3.7: Details Bündelblockausgleichung

Eigenschaft	Ohne Bildpositionen	Mit Bildpositionen
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	774.087	1.178.000
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	307.381	385.152
Mean Reprojection Error [pixels]	0,145	0,231

Tabelle 3.8 und Tabelle 3.9 listen die Fehler der Bodenpasspunkte in den verschiedenen Richtungen auf. Der mittlere RMS-Fehler der fünf Passpunkte in allen drei Richtungen beträgt ohne Bildpositionen 1,3 Zentimeter und 1,5 Zentimeter unter Einbeziehung der Bildpositionen. Der größte Einzelfehler beträgt 2,5 Zentimeter.

Tabelle 3.8: Fehler der Passpunkte ohne Bildpositionen

GCP Name	Error X[m]	Error Y[m]	Error Z[m]	Projection Error [pixel]
10	0.000	-0.012	-0.003	0.832
9	0.005	0.012	0.003	0.611
7	-0.020	0.020	-0.018	1.307
4	-0.001	-0.007	0.008	0.840
2	0.021	-0.015	0.020	0.439
Mean[m]	0.001147	-0.000308	0.001933	
RMS Error [m]	0.013151	0.013959	0.012617	

Tabelle 3.9: Fehler der Passpunkte mit Bildpositionen

GCP Name	Error X[m]	Error Y[m]	Error Z[m]	Projection Error [pixel]
10	-0.002	-0.012	-0.005	0.771
9	0.004	0.014	0.008	0.707
7	-0.025	0.016	-0.018	1.327
4	0.004	-0.004	0.025	0.891
2	0.025	-0.017	0.025	0.453
Mean[m]	0.001169	-0.000666	0.006885	
RMS Error[m]	0.015963	0.013279	0.018289	

In Tabelle 3.10 und Tabelle 3.11 sind die Fehler des Punkts Nummer 8, der als Kontrollpunkt dient, aufgeführt.

Tabelle 3.10: Fehler des Kontrollpunkts ohne Bildpositionen

Error X[m]	Error Y[m]	Error Z[m]	Projection Error [pixel]
-0.0033	-0.0350	0.0502	0.6591

Tabelle 3.11: Fehler des Kontrollpunkts mit Bildpositionen

Error X[m]	Error Y[m]	Error Z[m]	Projection Error [pixel]
-0.0021	-0.0341	0.0336	0.7614

4 Diskussion

Zielsetzung dieser Arbeit ist es, die Vor- und Nachteile des zusätzlichen Erfassens der Kamerapositionen mittels RTK-GNSS bei sUAV-Bildflügen zu untersuchen. Im Folgenden werden dazu verschiedene Aspekte betrachtet.

4.1 Genauigkeit der Messung

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, konnten sowohl die Geokoordinaten der Fotopositionen als auch die Pass- bzw. Kontrollpunkte am Boden mit hoher Genauigkeit bestimmt werden. Bis auf eine Fotoposition wurden für die Auswertung ausnahmslos RTK-fixe Positionen herangezogen, bei denen die Lagegenauigkeit 1-2 Zentimeter beträgt. Diese hohe Genauigkeit, kombiniert mit der vergleichsweise guten Auflösung und Bildqualität der verwendeten Kamera, führt erwartungsgemäß auch in der Auswertung mit Pix4Dmapper zu Ergebnissen mit sehr hoher Präzision.

Die erreichte durchschnittliche Bodenauflösung (GSD) beträgt 1,06 Zentimeter in beiden Auswertungen, sie ist abhängig vom verwendeten Sensor, der Brennweite des Objektivs und der Flughöhe. Auf diese zentrale Größe der Fernerkundung haben die zusätzlichen Positionen also keine Auswirkung. Aus der GSD kann auf die erwartete Genauigkeit des Projekts geschlossen werden¹. Sie beträgt 1-2 GSD in der Horizontalen bzw. 1-3 GSD in der Vertikalen, hier also zwischen einem und drei Zentimetern.

Auch auf die Anzahl der markanten Punkte (Keypoints) pro Bild ist keine Auswirkung feststellbar, sie beträgt in beiden Fällen 73.771 Punkte. Das sind deutlich mehr als von Pix4Dmapper benötigt, der Schwellenwert der Software liegt bei 10.000. Die Bilder liefern also genug visuellen Input, um erfolgreich weiterverarbeitet werden zu können.

Die Anzahl der kalibrierten Fotos ist ebenfalls unabhängig von den Fotopositionen. In beiden Fällen konnten alle 36 Fotos für die Auswertung genutzt werden, eine Folge der gewählten Überlappung, einer passenden Flughöhe und einer Bodenbeschaffenheit, die

¹<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558889-Accuracy-of-Pix4D-outputs> (Letzter Zugriff: 13.1.2020)

hinreichend Unterscheidungsmerkmale bietet.

Interessant ist der Unterschied zwischen initialem und optimiertem Kameramodell. Der um etwa ein halbes Prozent größere Wert bei der Rechnung mit Bildpositionen ist vermutlich auf die zusätzlichen Geokoordinaten zurückzuführen, die Einfluss auf die von der Software durchgeführte Selbstkalibrierung der Kamera haben. Da über die Güte der vom Hersteller spezifizierten, und in der Datenbank der Software hinterlegten, internen Kameraparameter keine Informationen vorliegen, kann aus der prozentual stärkeren Optimierung kein Rückschluss auf die Qualität gezogen werden. Der Unterschied könnte auch mit der alternativen Kalibrierungsmethode zusammenhängen, die von Pix4D für Nadir-Fotos mit exakten Geopositionen empfohlen wird², und die demzufolge für die Rechnung mit Bildpositionen verwendet wurde.

Die Anzahl der zugeordneten Merkmale (33.110) mit Bildpositionen, visualisiert in Abbildung 3.7, ist um ein Drittel größer als ohne die zusätzlichen Positionen (21.123). Die Merkmalszuordnung der Software wurde durch die zusätzlichen Positionen offensichtlich unterstützt. Pix4D nutzt für das Matching vermutlich einen SIFT-Algorithmus (Lowe 2004). Inwieweit dieser modifiziert wurde, um geometrische Daten zu berücksichtigen, ist nicht offen gelegt. Entsprechende Ansätze finden sich in der Literatur zum Beispiel bei Koch u. a. (2016), sodass der Gedanke nicht ganz abwegig ist.

Das DSM im Fall des Rechengangs mit den zusätzlichen Fotopositionen wirkt etwas feiner mit weniger harten Kanten im Gelände. Dies könnte als Hinweis auf eine genauere Berechnung der z -Komponente gedeutet werden, ist aber letztlich ein subjektiver Eindruck. In beiden Fällen lassen die Bilder qualitativ hochwertige Endprodukte erwarten, ein substanzieller Unterschied ist nicht auszumachen.

Ein unerwartetes aber interessantes Ergebnis sind die Verschiebungen der Fotopositionen in stets gleicher Richtung in Abbildung 3.10. Die Software korrigiert alle gemessenen, blauen Positionen zu den grün gekennzeichneten Positionen. Aufgrund der Regelmäßigkeit dieser Erscheinung sind hier systematische Probleme wie zum Beispiel die zeitliche Synchronisation von Positionserfassung und Fotoaufnahme oder die technisch bedingte räumliche Entfernung zwischen Kameraprojektionszentrum und GNSS-Antenne anzunehmen. Leider liefert die Pix4Dmapper-Auswertung keine Angaben über die Größe des Offsets, sodass hier keine endgültige Erklärung gegeben werden kann. Die Unsicherheit in der Bestimmung der absoluten Kamerapositionen ist dagegen angegeben, sie beträgt je nach Koordinate zwischen 0,7 und 1,3 Zentimeter und ist damit gering. Ein Hinweis auf eine qualitative Auswirkung der RTK-Positionen kann wiederum nicht abgeleitet

²<https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/205327965> (Letzter Zugriff: 13.1.2020)

werden.

Die Fehler der GCPs geben Auskunft darüber, wie gut das berechnete Modell an die eingemessenen Positionen angepasst werden konnte. In der Gegenüberstellung der Fehler (Tabelle ?? und Tabelle 3.9) weist die Rechnung mit Bildpositionen die größeren Fehler auf. Die fünf Passpunkte, alle mit der gleichen Methode vermessen und auch in etwa gleicher Höhe liegend, werden durch das Hinzunehmen der zahlreichen, durch das RTK-System auf dem UAV ermittelten, und mutmaßlich mit einem größeren Fehler behafteten, Luftpasspunkte nun offensichtlich als leicht ungenauer eingestuft. Das Modell muss die zusätzlichen Luftpasspunkte berücksichtigen und kann sich nicht mehr so eng an den Punkten auf dem Boden orientieren. Die Abweichung ist mit zwei Millimetern gering und der mittlere Fehler mit 1,3 bzw. 1,5 Zentimetern (siehe Tabelle 3.4) im Fehlerbereich dessen, was RTK überhaupt zu leisten vermag.

Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Qualität der Vermessung ist die Abweichung der berechneten Kontrollpunktposition von der gemessenen Position. Da der Kontrollpunkt nicht in die Berechnung eingeht und somit das resultierende Modell nicht beeinflusst, gestattet die Position eine unabhängige Aussage darüber, wie gut das Modell mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Wie Tabelle 3.10 zu entnehmen ist, sind die Fehler in allen drei Dimensionen durch das Hinzuziehen der Geolokationen deutlich gesunken. Insbesondere die z-Richtung profitiert mit einer Verbesserung von 5 auf 3,4 Zentimeter offensichtlich ganz erheblich von den zusätzlichen Luftpasspunkten. Um das Ergebnis zu validieren, wurde zwei weitere Triangulationen durchgeführt, bei denen Punkt 10 als weiterer Kontrollpunkt eingesetzt wurde. Auch bei dieser Rechnung wurde ein deutlich kleinerer Fehler in z-Richtung im Fall der zusätzlichen RTK-Positionen beobachtet, der RMSE fällt hier von 3,8 auf 2,7 Zentimeter. Die Ergebnisse sind damit in Einklang mit den Untersuchungen von Przybilla u. a. (2015, S. 52). Im Beitrag wird berichtet, dass in der durchgeführten Kreuzbefliegung mit ebenfalls vier Passpunkten die RMS-Werte der Kontrollpunkte von 20,2 auf 6,1 Zentimeter fallen. Die Befliegung wurde mit einem Starrflügler bei größerer Flughöhe und höherer Geschwindigkeit durchgeführt, dadurch ergeben sich insgesamt größere Fehler.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das zusätzliche, exakte Erfassen der Kamerapositionen mittels RTK-GNSS bei sUAV-Bildflügen - zumindest unter den hier vorgegebenen Bedingungen - prinzipiell zu einer Verbesserung der Vermessungsgenauigkeit führt. Da aber auch die Rechnung ohne Bildpositionen von sehr hoher Güte ist, fällt es schwer neben den Kontrollpunktfehlern markante Unterschiede auszumachen. Einige Merkmale wie die Abdeckung oder die GSD sind gänzlich unabhängig von den erfass-

ten Positionen. Andere Größen, wie die größere Anzahl der Matches, lassen zwar ein verbessertes Modell vermuten, sind aber qualitativ schwer greifbar.

4.2 Zeitbedarf

Einer der Nachteile des zusätzlichen Erfassens der Bildpositionen ist der erhöhte Zeitbedarf. Die Rechenzeit des initialen Schritts war bei dem Rechendurchgang mit Bildpositionen mit vier Minuten und 32 Sekunden um ein Drittel länger als ohne Bildpositionen. Bei dem überschaubaren Untersuchungsgebiet mit 36 Fotos, das dieser Arbeit zugrunde liegt, ist das nicht weiter problematisch. Bei größeren Projekten mit hunderten oder gar tausenden von Bildern ist die Rechenzeit durchaus eine wichtige Größe. Lässt man die Berechnung durch einen Anbieter in der Cloud durchführen, wirkt sie sich gar direkt finanziell aus.

Neben der erhöhten Rechenzeit ist für die Nachbearbeitung im Postprocessing weiterer Zeitaufwand einzuplanen. Die Daten der Referenzstation stehen (zumindest bei SAPOS) erst einige Zeit später zur Verfügung. Der eigentliche Vorgang des Postprocessings zum Ermitteln der korrekten Bildpositionen benötigt ebenfalls einige Zeit (ca. eine Stunde). Für zeitkritische Projekte wie die Untersuchung in Katastrophengebieten kann das problematisch sein. In jedem Fall ist es Aufwand, der einzuplanen und gegebenenfalls auch bei der Kalkulation zu berücksichtigen ist.

4.3 Know-how

Für den Umgang mit RTK-GNSS ist eine Menge Wissen über die zugrunde liegende Technologie erforderlich. Der unter Kapitel 2.5 geschilderte Vorgang des Postprocessing ist komplex. Abhängig von Tageszeit und Ort sind gegebenenfalls mehrere Parameter (beispielsweise verschiedene Satellitensysteme oder Aktualisierungsraten) zu variieren.

In der vorliegenden Arbeit wurden die Korrekturdaten nach der Befliegung von einem Anbieter heruntergeladen. Da das natürlich nur in Gegenden praktikabel ist, wo solche Daten zur Verfügung stehen (also längst nicht überall auf dem Planeten), kann man die Basisdaten alternativ mit einer eigenen eingemessenen Station selber erfassen und später zur Korrektur verwenden. Auch dazu ist wiederum einiges an Know-how erforderlich. Ohne intensive Beschäftigung mit dem Thema ist PPK derzeit nicht durchführbar.

4.4 Preis

RTK-GNSS-Systeme sind, wie in der Einleitung erwähnt, in den letzten Jahren deutlich preiswerter geworden. Das hier verwendete System *Reach* von Emlid kostet mit Antenne etwa 300 Euro und war zum Zeitpunkt des Entstehens dieser Arbeit das günstigste erhältliche RTK-GNSS. Da das System durch die Verbindung mit dem Blitzschuh der Kamera praktisch unabhängig vom UAV ist, lässt es sich mit ein wenig Basterei mit zahlreichen Drohnen kombinieren. Falls bei der Verwendung mit einem geschlossenen System das Auslösen der Kamera über den Flugcontroller nicht möglich ist, lassen sich die Aufnahmen auch mit der Intervallfunktion der Kamera anfertigen.

Für die tägliche Arbeit in Vermessungsbüros bietet sich allerdings eher ein Komplettsystem an. Fertige Ready-to-use UAV-RTK-Systeme, wie die DJI Phantom 4 RTK inkl. Basisstation, kann man derzeit ab etwa 8000 Euro erwerben. Da diese Drohne auch ohne RTK lieferbar ist, lässt sich der RTK-Aufpreis berechnen, er beträgt etwa 6000 Euro. Ein vergleichbares System von YUNEEC, der H520 RTK, ist angekündigt, war aber Mitte 2019 auf Anfrage noch nicht lieferbar. Die genannten UAS sind an der Schwelle vom Hobby- zum Profibereich angesiedelt. Für professionelle Vermessungsdrohnen lassen sich leicht mehrere 10.000 Euro ausgeben.

Eine teure Ausrüstung zieht weitere Kosten, beispielsweise für die Versicherung, nach sich. Während die Haftpflichtversicherung unabhängig vom verwendeten Modell ist, wirkt sich der Preis des Geräts in der Vollkaskoversicherung in Gänze aus. Bei den Versicherungen Zurich und Kravag beträgt der Jahresbeitrag etwa 6 Prozent vom Netto-Neuwert³.

Neben den Kosten für das UAS kommen unter Umständen noch Kosten für die Korrekturdaten hinzu. SAPOS stellt diese in einigen deutschen Bundesländern kostenlos zur Verfügung, in anderen Bundesländern oder Ländern müssen diese aber gegebenenfalls käuflich erworben werden. In Bayern beispielsweise betragen die Kosten zur Nutzung des hochgenauen Echtzeit-Positionierungsservice 0,1 Euro pro angefangene Minute bei einem Mindestbetrag von 10 Euro pro Kalendermonat⁴.

Steht kein Korrekturdienst zur Verfügung, können die Korrekturdaten wie bereits erwähnt auch selber erfasst werden, dann sind allerdings die Kosten für ein zweites GNSS-System inklusive Antenne, Stativ, Einmessung usw. einzuplanen.

³<https://www.kopter-profi.de/drohnen-kaskoversicherung/drohnenkasko-gewerbe> (Letzter Abruf: 27.2.2020)

⁴Preise entnommen aus der Gebühren- und Preisliste für Geobasisdaten der Bayerischen Vermessungsverwaltung, Stand: 15.01.2020

5 Schlussfolgerung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Wie die Diskussion der Ergebnisse zeigt, lassen sich durch das zusätzliche Verwenden der Fotopositionen zu den Ground Control Points Verbesserungen in der Genauigkeit, insbesondere in der Vertikalen herbeiführen. Hier sind die Fehler an Kontrollpunkten um etwa ein Drittel kleiner als bei Rechnungen ohne die Fotopositionen. Die Ergebnisse sind damit im Einklang mit den, allerdings mithilfe eines Fixed Wing-UAV, durchgeführten Untersuchungen von Przybilla. Weitere Auswirkungen wie die erhöhte Anzahl von Matches lassen zwar auf ein verbessertes, solideres Modell schließen, sind aber nicht direkt messbar.

Wie ebenfalls in der Diskussion geschildert, sind kommerzielle RTK-UAV-Lösungen mit einem Preis ab etwa 8000 Euro für ein Einsteigersystem derzeit noch recht teuer. Dazu kommen noch Nebenkosten, zum Beispiel durch die entsprechend teurere Versicherung.

Die Nachbearbeitung der erfassten Daten im Postprocessing erfordert einige Zeit und eine genaue Kenntnis des Prozesses. Stehen keine kommerziellen Korrekturdaten zur Verfügung, erhöht eine eigene Basisstation die Komplexität und den Preis des Gesamtsystems weiter.

Ob sich Preis und Aufwand rechnen, hängt von den Mindestanforderungen des konkreten Einsatzes ab. Ziel ist in der Regel die kostengünstigste Methode zu nutzen, mit der sich die erforderliche Genauigkeit erreichen lässt. Andere Methoden zur Qualitätssteigerung wie die Kreuzbefliegung, das mehrfache Befliegen in verschiedenen Höhen oder die Verwendung einer qualitativ besseren Kamera sind weniger aufwendig als das Erfassen der exakten Luftpositionen und versprechen aus Sicht des Autors zunächst ein weit besseres Kosten/Nutzen-Verhältnis. Wenn aber eine extrem hohe Genauigkeit, insbesondere der Höhenmessung, erforderlich ist, kann diese durch zusätzliche Erfassen der Fotopositionen in der Luft erreicht werden.

Es sei hier abschließend noch darauf hingewiesen, dass diese Zusammenfassung der

Ergebnisse das *zusätzliche* Erfassen der exakten Fotopositionen mit RTK-GNSS betrifft. Das alleinige Erfassen der Luftpositionen in nicht zugänglichen Regionen, etwa in Katastrophengebieten, ist natürlich stets eine sinnvolle und wichtige Option. Wenn Passpunkte allerdings ohne Probleme und in vertretbarer Zeit ausgelegt und vermessen werden können, scheint das für die meisten Anwendungsfälle ausreichend und derzeit wirtschaftlicher.

5.2 Ausblicke und weitere Fortführung der Arbeit

Wie im vorgegangenen Kapitel geschildert, ist die Nachbearbeitung der Daten im Postprocessing einer der Nachteile der hier angewandten Methode. Eine denkbare Alternative zum mühsamen PPK-Prozess wäre eine Echtzeitlösung, bei der ein beständiger Strom an Korrekturdaten zum GNSS-Empfänger gebracht und dort direkt verrechnet wird. Das Berechnen der Position auf dem Empfänger erlauben einige Systeme mit eingebauter RTK-Engine (zum Beispiel der ublox ZED-F9P). Die Datenübertragung aber ist insbesondere in der Luft schwierig und fehlerträchtig. Denkbar ist eine Funkverbindung zur eigenen eingemessenen Basis oder aber das Nutzen von Korrekturdiensten wie SAPOS in Echtzeit. Das UAV müsste in letzterem Fall zum Beispiel über Mobilfunk mit dem Internet verbunden sein. Kommerzielle Anbieter bieten einen entsprechenden Workflow an.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Einfrequenz-Trägerphasenempfänger für das Erfassen der RTK-Daten verwendet. Da der Multikopter in der Luft keine Probleme mit Abschattungen des Signals durch Bäume und Häuser hat, und inzwischen mit GPS, Galileo und GLONASS gleich mehrere GNSS zur Verfügung stehen, ist das auch durchaus ein praktikabler Weg. Um jedoch Probleme mit Float-Positionen gänzlich zu vermeiden und auch mit längeren Baselines arbeiten zu können, wäre der Einsatz eines Zweifrequenz-Empfängers mit Trägerphasendaten eine sinnvolle Erweiterung. Während des Erstellens dieser Arbeit sind gerade die ersten preisgünstigen Mehrfrequenzempfänger erschienen. Emlid bietet mit *Reach 2* wiederum eine UAV-geeignete Lösung mit Zeit-Synchronisation an. Das Verwenden eines Mehrfrequenzempfängers gestattet eine weitere Entfernung zur Basisstation (bis zu 100 Kilometer), prinzipiell verlässlichere Messungen mit weniger Satelliten und eine kürzere Zeit zum Fix. Da man beim Postprocessing erst zum Zeitpunkt der Auswertung erfährt, ob die erfassten Daten verwendet werden können (also RTK-fix sind), wäre die Verwendung eines Mehrfrequenzempfängers eine sinnvolle Erweiterung.

Bei der hier betrachteten partiellen Georeferenzierung werden die Bildpositionen in Form von Breite, Länge und Höhe in die Berechnung einbezogen. Die Steuerungssoftware des UAV versucht, die Kamera bei der Aufnahme des Fotos exakt senkrecht nach unten auszurichten, scheitert aber aufgrund äußerer Faktoren (zum Beispiel Wind) zu einem gegebenen Moment an dieser Aufgabe. Das ständige Messen und Ausgleichen der Lage führt stets zu kleinen Abweichungen vom Nadir-Zustand. Die drei Drehwinkel Omega, Phi und Kappa beschreiben die tatsächliche Orientierung der Kamera im Raum. Sie werden von der Photogrammetriesoftware automatisch berechnet. Sie lassen sich mithilfe einer qualitativ hochwertigen IMU aber auch exakt erfassen und wie die GPS-Koordinaten in Pix4Dmapper den Bildern zuordnen. Auch hier ist, wie beim Erfassen der GNSS-Daten, eine exakte Synchronisation zwischen Auslösezeitpunkt und Erfassen der Drehwinkel erforderlich. Das Miteinbeziehen der IMU-Daten in die Auswertung wäre ein interessanter nächster Schritt bei der Betrachtung der integrierten Georeferenzierung. Es ist anzunehmen, dass durch weitere Fortschritte in der Sensorik in absehbarer Zeit leistungsfähige Systeme zu vertretbaren Preisen zur Verfügung stehen.

Literatur

- Metashape* (2020). *Agisoft Metashape*. URL: <https://www.agisoft.com/> (besucht am 02.02.2020).
- Bäumker, Manfred (2013). »Hybride Navigationssysteme für Navigation, Regelung und direkte Georeferenzierung«. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 5.
- Blyenburgh, Peter van (1999). »UAVs: an overview«. In: *Air & Space Europe* 1.5, S. 43–47.
- Bock, Y. u. a. (1984). »Geodetic accuracy of the Macrometer model V-1000«. In: *Bulletin Géodésique* 58.2, S. 211–221.
- Cramer, Michael und Benedikt Leinss (2016). »Welche ist am besten? – Anmerkungen zur Auswahl von Kamerasystemen in der UAS- Luftbildphotogrammetrie«. In: *Schriftreihe des DVW*. DVW-Seminar "UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen". Bd. Band 82. Bonn, S. 97–118.
- Dronecode* (2020). *Dronecode - Building a sustainable open source ecosystem for critical Drone components*. URL: <https://www.dronecode.org/> (besucht am 02.02.2020).
- Emlid* (2020). URL: <https://emlid.com/> (besucht am 27.02.2020).
- Gerke, Markus und Heinz-Jürgen Przybilla (2016). »Accuracy Analysis of Photogrammetric UAV Image Blocks: Influence of Onboard RTK-GNSS and Cross Flight Patterns«. In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation* 2016, S. 17–30.
- Heipke, Christian, Willi Freeden und Reinhard Rummel, Hrsg. (2017). *Photogrammetrie und Fernerkundung*. 1. Auflage. Handbuch der Geodäsie herausgegeben von Willi Freeden und Reiner Rummel[...] OCLC: 978272102. Berlin: Springer Spektrum. 839 S.
- Heipke, Christian, Karsten Jacobsen und Helge Wegmann (2001). »Analysis of the Results of the OEEPE Test Integrated Sensor Orientation«. In: *OEEPE Official Publication* 43.
- Heipke, C. u. a. (2000). »Integrated Sensor Orientation – An Oeepe Test«. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 33.

- Kamer, K., H. Eugster und S. Nebiker (2013). »Integrierte Georeferenzierung von luft- und bodengestützten Stereobilddaten im Strassenbereich: Strategien und Ergebnisse«. In: *Geomatik Schweiz* 111, S. 496–501.
- Koch, T. u. a. (2016). »A NEW PARADIGM FOR MATCHING UAV- AND AERIAL IMAGES«. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* III-3, S. 83–90.
- Kraus, Karl (2012). *Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen*. 7., vollst. bearb. und erw. Aufl. Photogrammetrie Karl Kraus ; Bd. 1. OCLC: 314686577. Berlin: de Gruyter. 516 S.
- Lowe, David G. (2004). »Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints«. In: *International Journal of Computer Vision* 60.2, S. 91–110.
- Mader, G. (1986). »Dynamic Positioning Using GPS Carrier Phase Measurements«. In: *Manuscripta Geodaetica* 11.4, S. 272–277.
- MAVLink (2020). URL: <https://mavlink.io/> (besucht am 02.02.2020).
- Meier, Lorenz, Dominik Honegger und Marc Pollefeys (2015). »PX4: A node-based multithreaded open source robotics framework for deeply embedded platforms«. In: *2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Seattle, WA, USA: IEEE, S. 6235–6240.
- Pajares, Gonzalo (2015). »Overview and Current Status of Remote Sensing Applications Based on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)«. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 81.4, S. 281–330.
- Pix4Dmapper (2020). *Pix4Dmapper - Die führende Photogrammetrie-Software für das professionelle Drohnen-Mapping | Pix4D*. URL: <https://www.pix4d.com/de/produkt/pix4dmapper-photogrammetrie-software> (besucht am 02.02.2020).
- Pixhawk (2020). *Pixhawk*. Pixhawk. URL: <https://pixhawk.org/> (besucht am 02.02.2020).
- Przybilla, Heinz-Jürgen (1979). »1979-05-31 Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug«. In: *Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung* (5) 47, S. 137–142.
- (2016). »Unmanned Aerial Systems im Messeinsatz: Über die Systemkonfiguration zur Qualität des geodätischen Endprodukts«. In: *UAV 2016 - Vermessung mit unbemannten Flugsystemen: Beiträge zum 148. DVW-Seminar am 18. und 19. Februar in Bonn*. Schriftenreihe des DVW Band 82.
- Przybilla, Heinz-Jürgen u. a. (2015). »Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen«. In: *Bridging Scales - Skalenübergreifende Nah- und Fernerkundungsmethoden*. 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. Bd. 24, S. 45–54.

- Rieke, M. u. a. (2012). »HIGH-PRECISION POSITIONING AND REAL-TIME DATA PROCESSING OF UAV-SYSTEMS«. In: *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVIII-1/C22*, S. 119–124. (Besucht am 06.04.2018).
- RTKLIB (2020). *RTKLIB: An Open Source Program Package for GNSS Positioning*. URL: <http://rtklib.com/> (besucht am 02.02.2020).
- SAPOS (2020). *SAPOS Hessen*. URL: <http://sapos.hvbg.hessen.de/> (besucht am 10.02.2020).
- El-Sheimy, N. (2009). »Emerging MEMS IMU and its impact on mapping applications«. In: *Photogrammetric Week 9*.
- Toth, Charles und Boris Jutzi (2017). »Plattformen und Sensoren für die Fernerkundung und deren Geopositionierung«. In: *Photogrammetrie und Fernerkundung*. Hrsg. von Christian Heipke. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 29–64.
- VectorNav (2020). *VectorNav Technologies - MEMS-based Inertial Sensors*. URL: <https://www.vectornav.com/> (besucht am 02.02.2020).
- VisualSFM (2020). *VisualSFM : A Visual Structure from Motion System*. URL: <http://ccwu.me/vsfm/> (besucht am 02.02.2020).
- YUNEEC (2020). *YUNEEC - Multicopter für Einsteiger und Copter-Profis*. URL: https://www.yuneec.com/de_DE/home.html (besucht am 02.02.2020).
- Zhou, Yilin u. a. (2018). »GNSS-Assisted Integrated Sensor Orientation with Sensor Pre-Calibration for Accurate Corridor Mapping«. In: *Sensors* 18.9, S. 2783. URL: <http://www.mdpi.com/1424-8220/18/9/2783> (besucht am 27.02.2020).

Verwendete Software

Google Earth Pro (2019). Version 7.3.2.5776. URL: https://www.google.com/intl/de_de/earth/.

mapitGIS (2019). *mapitGIS - Spatial Asset Collection, GPS Surveys and Data Management for Android*. Version 7.2.5Core. URL: <https://mapitgis.com>.

NTRIP Client (2019). Version 2019.12.06. URL: <http://lefebure.com/software/ntripclient/>.

PX4 (2019). Version 1.9.2. URL: <https://px4.io>.

QGroundControl (2019). *QGroundControl - Drone Control*. Version 3.5.4. URL: <http://qgroundcontrol.com>.

Takasu, T. (2019a). *RTKCONV*. Version 2.4.3 Emlid b28. URL: <https://files.emlid.com/RTKLIB/RTKLIB-Win-x64.zip> (besucht am 25.01.2020).

– (2019b). *RTKPLOT*. Version 2.4.3 Emlid b28. URL: <https://files.emlid.com/RTKLIB/RTKLIB-Win-x64.zip> (besucht am 25.01.2020).

– (2019c). *RTKPOST*. Version 2.4.3 Emlid b28. URL: <https://files.emlid.com/RTKLIB/RTKLIB-Win-x64.zip> (besucht am 25.01.2020).

6 Anhang

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper version 4.4.12

! **Important:** Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary i

Project	20190916
Processed	2019-09-30 12:39:12
Camera Model Name(s)	ILCE-6000_E16mmF2.8_16.0_6000x4000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.06 cm / 0.42 in
Area Covered	0.013 km ² / 1.2580 ha / 0.00 sq. mi. / 3.1102 acres
Time for Initial Processing (without report)	03m:03s

Quality Check i

? Images	median of 73771 keypoints per image	✓
? Dataset	36 out of 36 images calibrated (100%), all images enabled	✓
? Camera Optimization	2.08% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
? Matching	median of 21123 matches per calibrated image	✓
? Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.013 m	✓

? Preview i

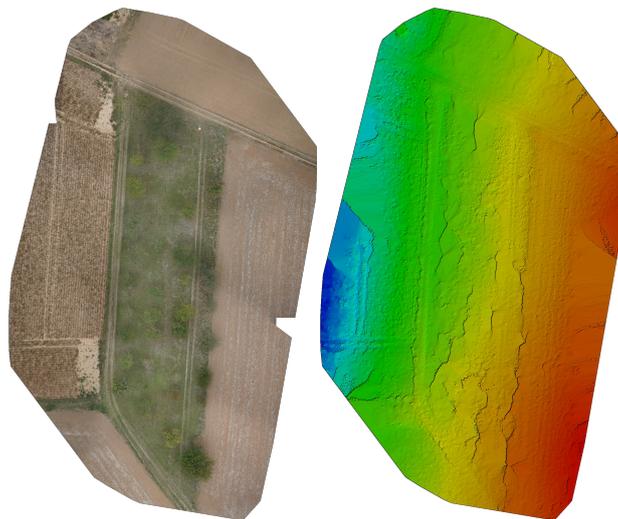


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



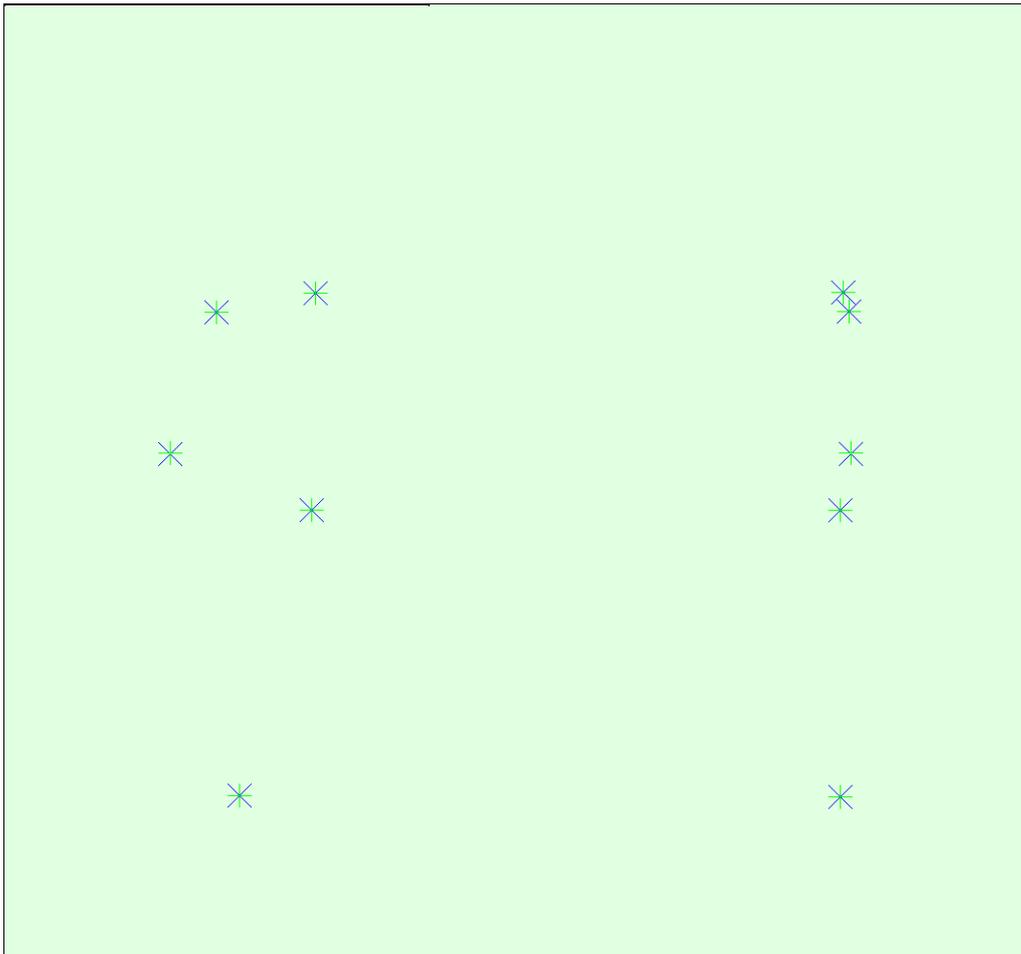
Number of Calibrated Images	36 out of 36
Number of Geolocated Images	0 out of 36

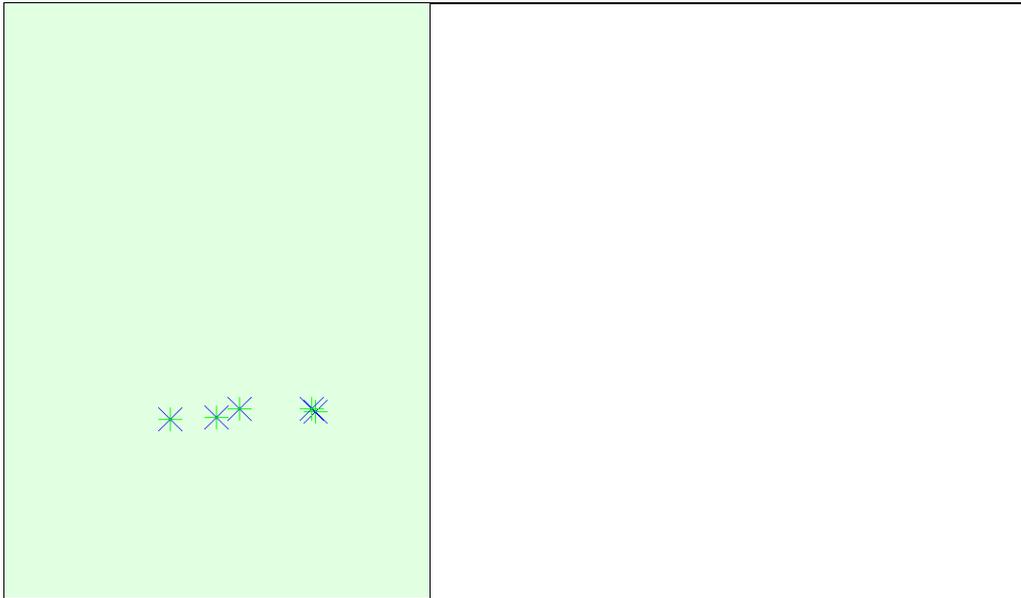
Initial Image Positions



The preview is not generated for images without geolocation.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions





Uncertainty ellipses 500x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

🔍 Absolute camera position and orientation uncertainties



	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.005	0.005	0.011	0.007	0.007	0.002
Sigma	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000

🔍 Overlap



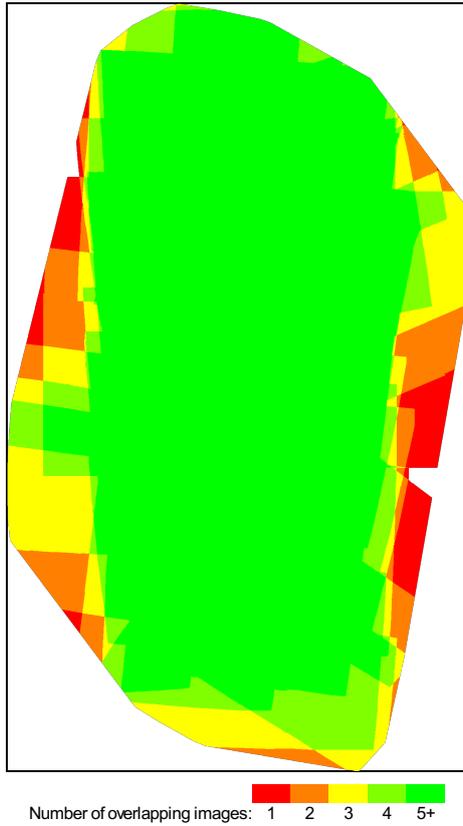


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

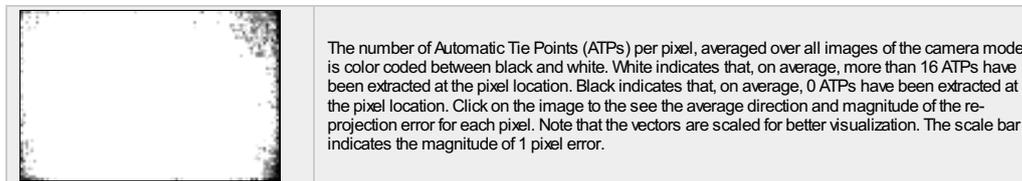
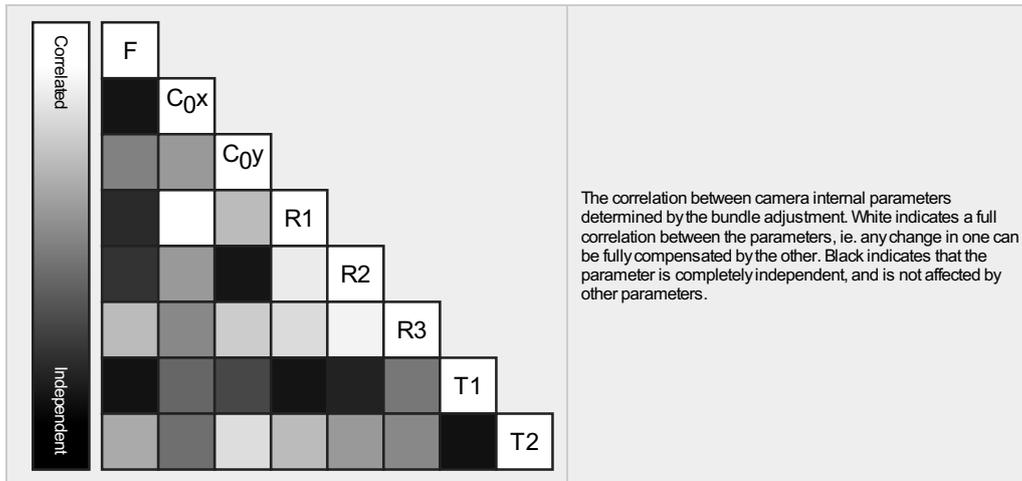
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	774087
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	307381
Mean Reprojection Error [pixels]	0.145

Internal Camera Parameters

ILCE-6000_E16mmF2.8_16.0_6000x4000 (RGB). Sensor Dimensions: 23.500 [mm] x 15.667 [mm]

EXIF ID: ILCE-6000_E16mmF2.8_16.0_6000x4000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4079.128 [pixel] 15.977 [mm]	2999.997 [pixel] 11.750 [mm]	2000.000 [pixel] 7.833 [mm]	-0.066	0.091	0.005	-0.002	-0.002
Optimized Values	3994.229 [pixel] 15.644 [mm]	2988.392 [pixel] 11.705 [mm]	1906.862 [pixel] 7.469 [mm]	-0.064	0.082	0.006	-0.001	0.002
Uncertainties (Sigma)	1.033 [pixel] 0.004 [mm]	0.157 [pixel] 0.001 [mm]	0.200 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	73771	21123
Mn	34513	6197
Max	93009	37031
Mean	75552	21502

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	230860
In 3 Images	43774
In 4 Images	14178
In 5 Images	7069
In 6 Images	4089
In 7 Images	2613
In 8 Images	1685
In 9 Images	1164
In 10 Images	735
In 11 Images	457
In 12 Images	305
In 13 Images	243
In 14 Images	139
In 15 Images	55
In 16 Images	15

2D Keypoint Matches

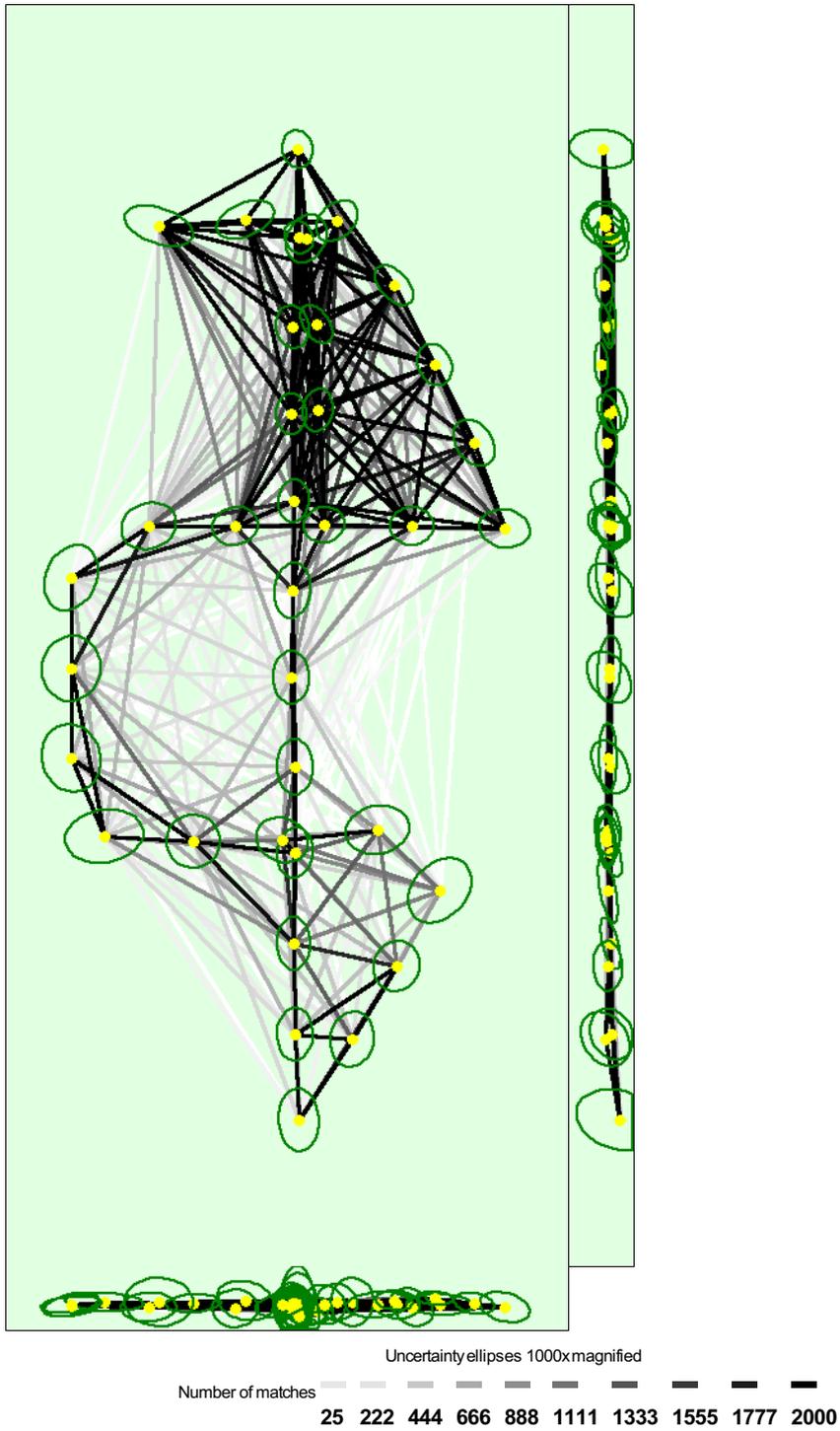


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties



X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
------	------	------	----------------	--------------	----------------

Mean	0.003	0.003	0.002	0.008	0.005	0.002
Sigma	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002	0.000

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
10 (3D)	0.020/ 0.020	0.000	-0.012	-0.003	0.832	5 / 5
9 (3D)	0.020/ 0.020	0.005	0.012	0.003	0.611	6 / 6
7 (3D)	0.020/ 0.020	-0.020	0.020	-0.018	1.307	3 / 3
4 (3D)	0.020/ 0.020	-0.001	-0.007	0.008	0.840	4 / 4
2 (3D)	0.020/ 0.020	0.021	-0.015	0.020	0.439	4 / 4
Mean [m]		0.001147	-0.000308	0.001933		
Sigma [m]		0.013101	0.013956	0.012468		
RMS Error [m]		0.013151	0.013959	0.012617		

0 out of 1 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
8		-0.0033	-0.0350	0.0502	0.6591	4 / 4

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @2.80GHz RAM: 32GB GPU: Intel(R) HD Graphics 630 (Driver: 23.20.16.4973), NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti (Driver: 23.21.13.9125)
Operating System	Windows 10 Home, 64-bit

Coordinate Systems

Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS 84
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 32N

Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options



Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	07m:51s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	05m:05s

Results



Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	6666336
Average Density (per m ³)	2373.21

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (1.06 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	00s
Time for Orthomosaic Generation	14m:04s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

Quality Report



Generated with Pix4Dmapper version 4.4.12

! **Important:** Click on the different icons for:

- ?** Help to analyze the results in the Quality Report
- i** Additional information about the sections

💡 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary



Project	20190916
Processed	2019-09-30 13:58:21
Camera Model Name(s)	ILCE-6000_E16mmF2.8_16.0_6000x4000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.06 cm / 0.42 in
Area Covered	0.013 km ² / 1.3071 ha / 0.01 sq. mi. / 3.2315 acres
Time for Initial Processing (without report)	04m:32s

Quality Check



? Images	median of 73771 keypoints per image	✓
? Dataset	36 out of 36 images calibrated (100%), all images enabled	✓
? Camera Optimization	2.62% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
? Matching	median of 33109.9 matches per calibrated image	✓
? Georeferencing	yes, 5 GCPs (5 3D), mean RMS error = 0.015 m	✓

Preview

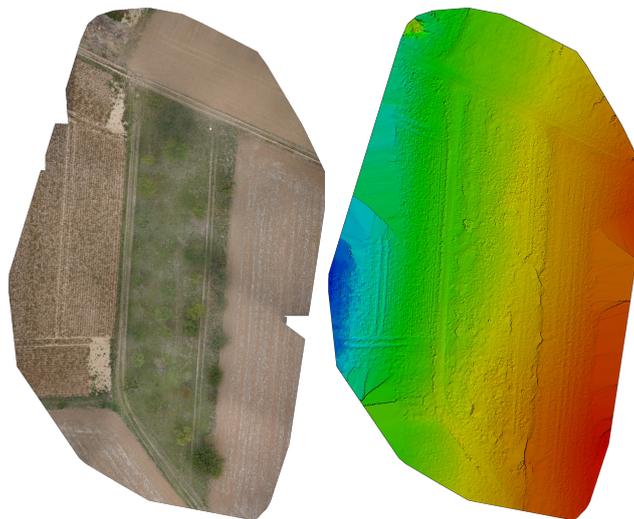


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details



Number of Calibrated Images	36 out of 36
Number of Geolocated Images	36 out of 36

Initial Image Positions

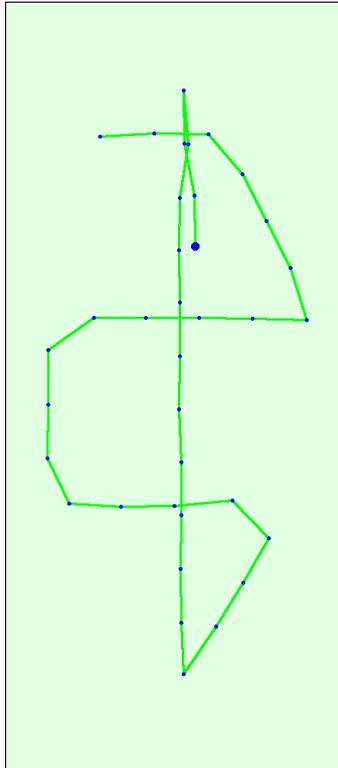
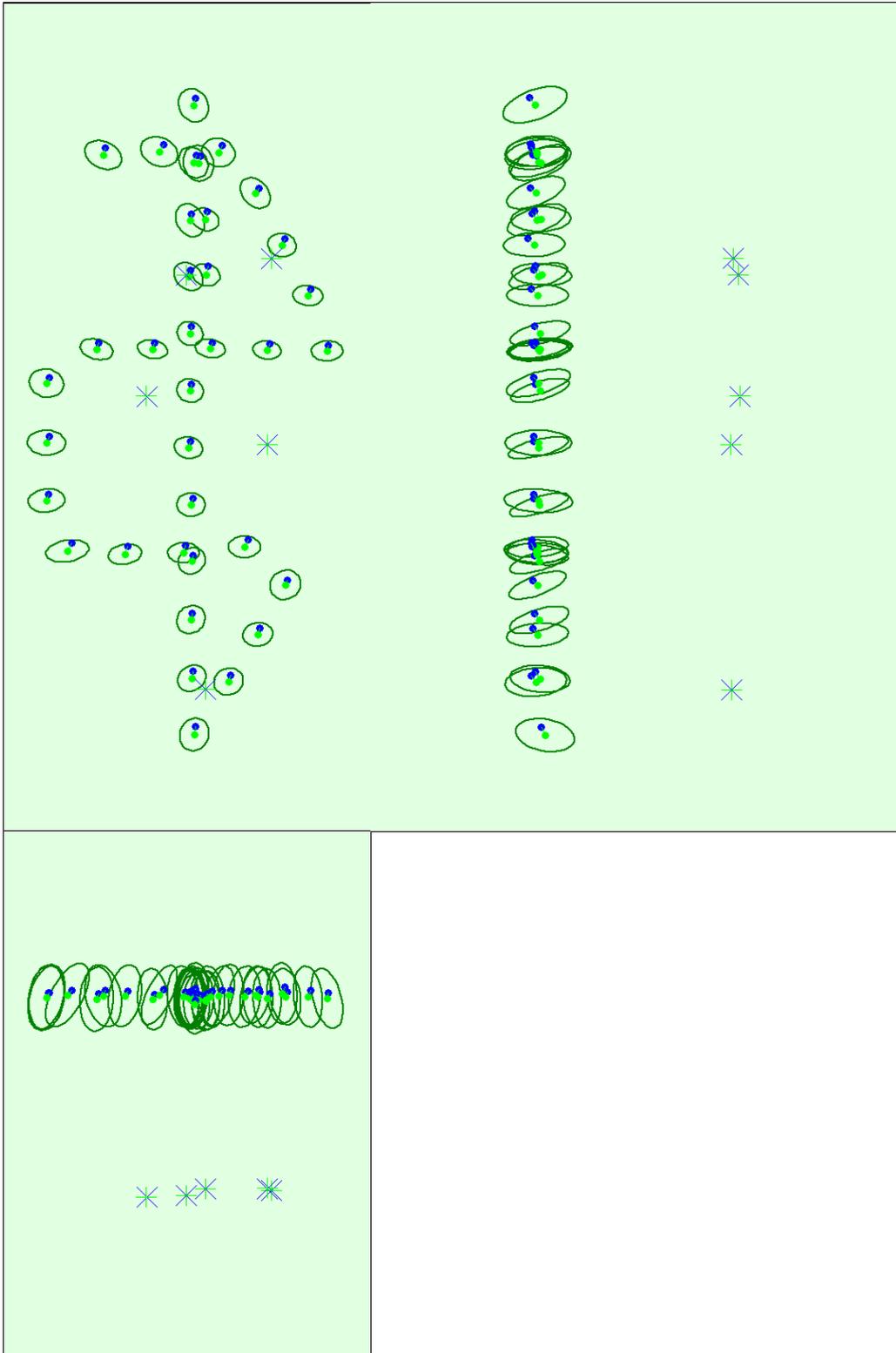


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions





Uncertainty ellipses 500x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute

position uncertainty of the bundle block adjustment result.

🔍 Absolute camera position and orientation uncertainties



	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.007	0.005	0.013	0.007	0.008	0.002
Sigma	0.001	0.001	0.000	0.002	0.001	0.000

🔍 Overlap

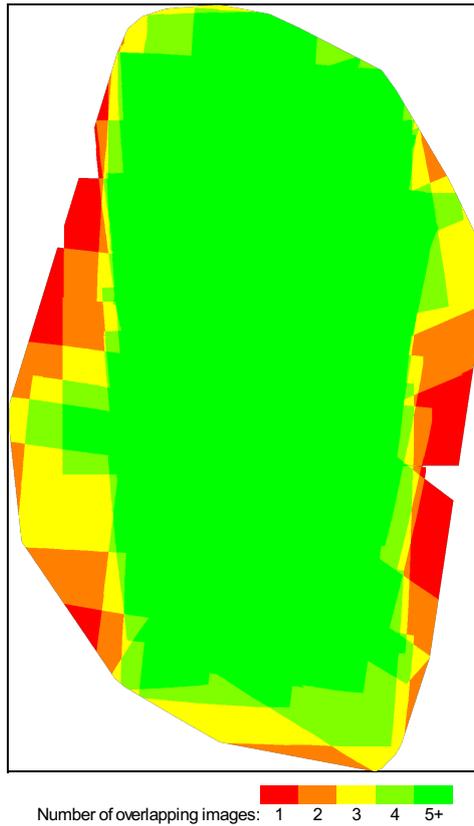


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1178000
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	385152
Mean Reprojection Error [pixels]	0.231

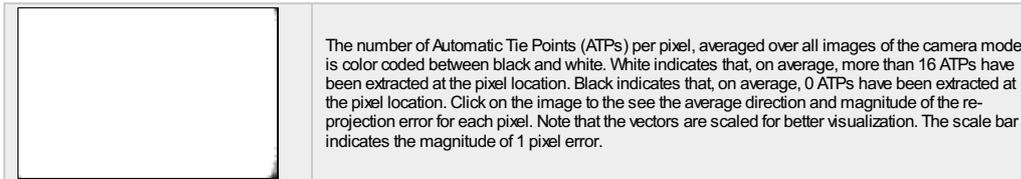
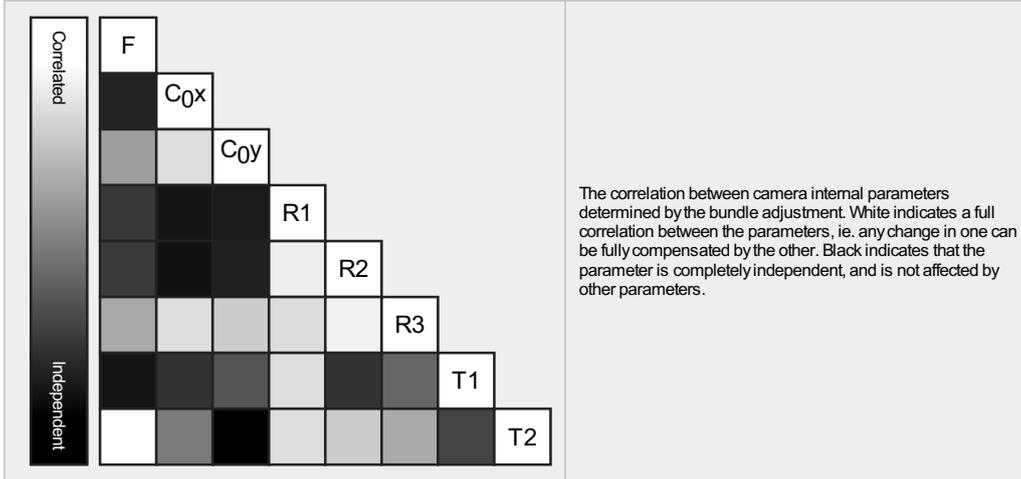
🔍 Internal Camera Parameters

📷 ILCE-6000_E16mmF2.8_16.0_6000x4000 (RGB). Sensor Dimensions: 23.500 [mm] x 15.667 [mm]



EXIF ID: ILCE-6000_E16mmF2.8_16.0_6000x4000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4079.128 [pixel] 15.977 [mm]	2999.997 [pixel] 11.750 [mm]	2000.000 [pixel] 7.833 [mm]	-0.066	0.091	0.005	-0.002	-0.002
Optimized Values	3972.050 [pixel] 15.557 [mm]	2987.737 [pixel] 11.702 [mm]	1906.045 [pixel] 7.465 [mm]	-0.063	0.080	0.005	-0.001	0.002
Uncertainties (Sigma)	1.217 [pixel] 0.005 [mm]	0.156 [pixel] 0.001 [mm]	0.207 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



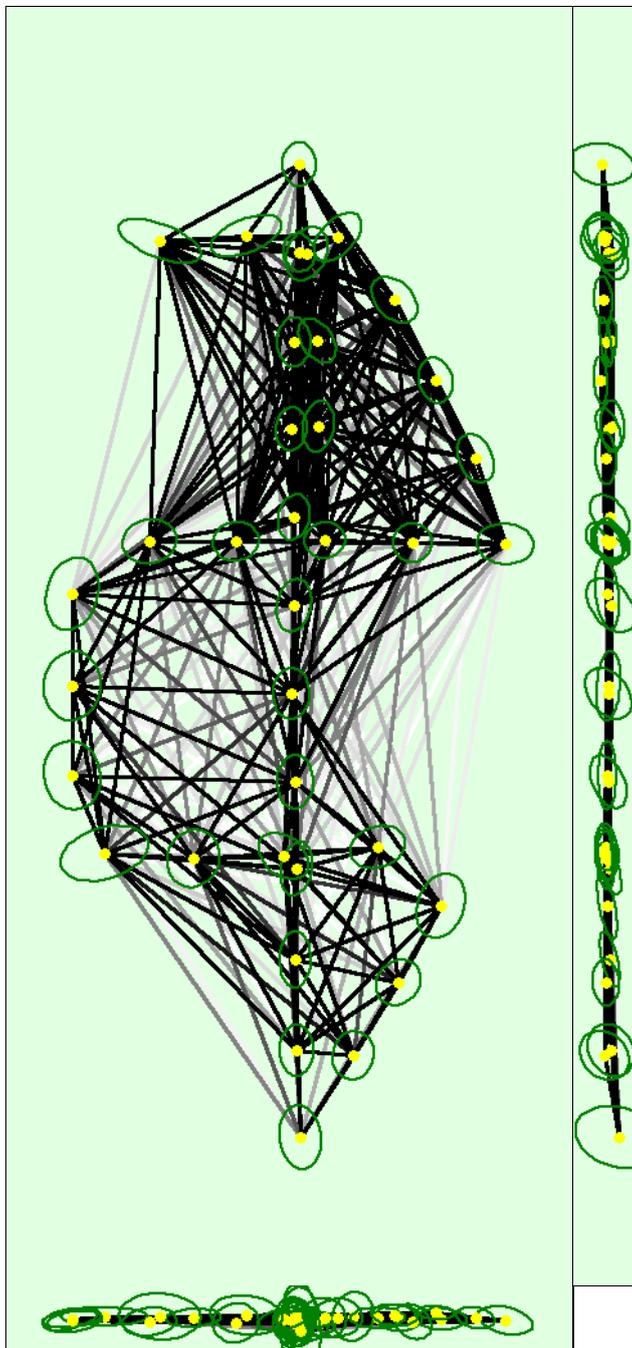
2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	73771	33110
Mn	34513	18856
Max	93009	48326
Mean	75552	32722

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	221345
In 3 Images	74274
In 4 Images	34054
In 5 Images	19386
In 6 Images	12778
In 7 Images	8220
In 8 Images	5533
In 9 Images	3486
In 10 Images	2291
In 11 Images	1443
In 12 Images	916
In 13 Images	642
In 14 Images	480
In 15 Images	220
In 16 Images	73

2D Keypoint Matches



Uncertainty ellipses 1000x magnified

Number of matches

25 222 444 666 888 1111 1333 1555 1777 2000

Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.003	0.003	0.002	0.008	0.005	0.002
Sigma	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002	0.000

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
10 (3D)	0.020/ 0.020	-0.002	-0.012	-0.005	0.771	5 / 5
9 (3D)	0.020/ 0.020	0.004	0.014	0.008	0.707	6 / 6
7 (3D)	0.020/ 0.020	-0.025	0.016	-0.018	1.327	3 / 3
4 (3D)	0.020/ 0.020	0.004	-0.004	0.025	0.891	4 / 4
2 (3D)	0.020/ 0.020	0.025	-0.017	0.025	0.453	4 / 4
Mean [m]		0.001169	-0.000666	0.006885		
Sigma [m]		0.015920	0.013262	0.016944		
RMS Error [m]		0.015963	0.013279	0.018289		

0 out of 1 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
8		-0.0021	-0.0341	0.0336	0.7614	4 / 4

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	55.56	55.56	58.33
0.00	3.00	44.44	44.44	41.67
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		0.416179	1.459076	1.120834
Sigma [m]		0.171969	0.174370	0.094742
RMS Error [m]		0.450309	1.469458	1.124831

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	0.419010	1.456592	1.122215

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X[%]	Images Y[%]	Images Z[%]
[-1.00, 1.00]	83.33	77.78	100.00
[-2.00, 2.00]	97.22	97.22	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	0.333333	0.333333	0.666667
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.788811	0.788811	1.577621

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Initial Processing Details

System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU @2.80GHz RAM: 32GB GPU: Intel(R) HD Graphics 630 (Driver: 23.20.16.4973), NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti (Driver: 23.21.13.9125)
Operating System	Windows 10 Home, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS 84
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 32N

Processing Options

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: yes
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Alternative Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes

Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	07m:26s
Time for Point Cloud Classification	NA
Time for 3D Textured Mesh Generation	04m:02s

Results



Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	6687910
Average Density (per m ³)	2397.67

DSM, Orthomosaic and Index Details



Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (1.06 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Time for DSM Generation	00s
Time for Orthomosaic Generation	13m:57s
Time for DTM Generation	00s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s