

Untersuchungen zur Qualität des Realtime Kinematic GNSS Systems der DJI Phantom 4 RTK

HEINZ-JÜRGEN PRZYBILLA¹ & MANFRED BÄUMKER¹

Zusammenfassung: Das UAV DJI Phantom 4 (und Vorläufer) ist seit mehr als 10 Jahren im Markt verfügbar und ist in seiner aktuellen Version „RTK“ mit einem 2-Frequenz GNSS-Empfänger ausgestattet. In Verbindung mit einer Referenzstation oder alternativ z.B. durch die Nutzung des SAPOS-Dienstes ist eine präzise Positionsbestimmung im Realtime Kinematic Modus möglich. Da das System auch Rohdaten im RINEX-Format zur Verfügung stellt, kann grundsätzlich auch eine Positionsbestimmung mittels PPK (Post-Processed Kinematic) durchgeführt werden. Dem Anwender bieten sich somit erweiterte Möglichkeiten zur Georeferenzierung von UAV-Bildflügen.

Im Rahmen des Beitrags erfolgen Untersuchungen zur geometrischen Genauigkeit von UAV-Bildverbänden, die mit vier verschiedenen DJI Phantom 4 RTK Systemen unter fest definierten Bedingungen auf dem UAV-Testfeld „Zeche Zollern“ geflogen wurden. Die nachfolgenden Auswertungen erfolgten mit identischer Parametrisierung durch die Software Agisoft Metashape. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen die zum Teil starken Variationen in der Qualität der gemessenen RTK-Positionen sowie deren Auswirkungen auf die Bildorientierung und beteiligte Parameter. Ein abschließender Vergleich zwischen der Nutzung der RTK-Messungen und solchen aus einem Post-Processing (PPK) zeigt für die untersuchten Bildverbände keinen erkennbaren Genauigkeitsgewinn.

1 Einleitung

Unmanned Aerial Vehicle (UAV) erfreuen sich in der geodätisch-photogrammetrischen Community einer steigenden Beliebtheit. Der Markt – mit von diversen Herstellern angebotenen Komplettsystemen – wächst stetig. Hierbei kommt dem chinesischen Anbieter Da-Jiang Innovations Science and Technology Co., Ltd (DJI) die Markführerrolle zu, mit einem derzeitigen Anteil von ca. 70% des globalen Consumer-Drohnen Marktes (HANDELSBLATT 2020). Das Modell Phantom 4 (und Vorläufer) ist seit mehr als 10 Jahren verfügbar und ist in seiner aktuellen Version „RTK“ mit einem 2-Frequenz GNSS-Empfänger ausgestattet (Abb. 1).



Abb. 1: DJI Phantom 4 RTK

¹ Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie, Lennershofstr. 140, D-44801 Bochum, E-Mail: [Heinz-Juergen.Przybilla, Manfred.Baeumker]@hs-bochum.de

In Verbindung mit einer Referenzstation oder alternativ durch die Anbindung per NTRIP (Network Transport of RTCM via Internet Protocol) über Mobilfunk oder Wi-Fi-Hotspot ist z. B. die Nutzung des SAPOS-Dienstes (SAPOS 2020) möglich, und somit eine präzise Positionsbestimmung in Echtzeit. Die Angaben des Herstellers (DJI 2020) zur Positionierungsgenauigkeit betragen:

- Vertikal: 1,5 cm + 1 ppm (RMS)
- Horizontal: 1 cm + 1 ppm (RMS)

Da das System auch Rohdaten im RINEX-Format (Receiver Independent Exchange Format) zur Verfügung stellt, ist grundsätzlich auch eine Positionsbestimmung mittels PPK (Post-Processed Kinematic) möglich. Die GNSS-Rohdaten eines Zweifrequenzempfängers (Code- und Trägerphasenbeobachtungen sowie die Ephemeridendaten) sind die Grundlage für eine nachträgliche Auswertung, die in der Regel zur Bestimmung von Positionslösungen höherer Genauigkeit führt. Dem Anwender bieten sich somit erweiterte Möglichkeiten zur Georeferenzierung der UAV-Bildflüge. Neben der (indirekten) Lagerung auf Bodenpasspunkte (Ground Control Points – GCP) ist sowohl eine direkte Lagerung auf die gemessenen Bildpositionen (Äußere Orientierung – ÄORI) als auch eine Kombination der beiden Ansätze (integrierte Orientierung) möglich.

Im Rahmen des Beitrags erfolgen Untersuchungen zur geometrischen Genauigkeit von UAV-Bildverbänden. Hierzu wurden 4 verschiedene DJI Phantom 4 RTK Systeme auf dem Areal des Präzisions-UAV-Testfelds des Industriemuseums „Zeche Zollern“ in Dortmund geflogen (Lage- und Höhengenaugigkeit der Passpunkte ca. 2 mm; PRZYBILLA et al. 2018). Alle Bildflüge erfolgten mit einer fest definierten Aufnahmekonfiguration (Kreuzverband mit 20% Höhendifferenz, Längsüberdeckung 80%, Querüberdeckung 60%, GSD 14 mm, manuelle Fokussierung (MF) der Kamera auf unendlich) an drei unterschiedlichen Tagen.

2 RTK-Bildflug

Planung und Durchführung des Bildflugs mit einem DJI RTK-Kopter-Systemen werden mittels einer in sich geschlossenen Software des Herstellers (DJI GS PRO) durchgeführt, die auch die Festlegungen für den Bezug der GNSS-Korrekturdaten enthält (Abb. 2).



Abb. 2: Definition der RTK-Einstellungen in der GS PRO Applikation (Fotos: Hersteller)

Während des Bildfluges werden für jedes Bild eine Bildnummer, ein Zeitstempel, die Komponenten des Hebelarms zwischen Antennenzentrum und der Bildmitte des CMOS-Sensors, die vollständigen Positionsdaten (im WGS84 bzw. ETRS89 bei Nutzung des SAPOS-Dienstes HEPS), zugehörige Genauigkeitsangaben sowie der RTK-Status protokolliert (Abb. 3).

Anzumerken ist hier, dass die Definition des Hebelarms – als Vektor zwischen Antennenzentrum und Projektionszentrum – von der in der Photogrammetrie üblichen Festlegung abweicht!

| | | | | | | | | | | | | |
|----|---------------|--------|------|-------|-------|-----------------|----------------|--------------|-----------|-----------|----------|------|
| 1 | 137007.745028 | [2074] | 26,N | 2,E | 191,V | 51.51629799,Lat | 7.33605200,Lon | 219.190,Ellh | 0.011534, | 0.014892, | 0.023045 | 50,Q |
| 2 | 137011.540180 | [2074] | 39,N | -11,E | 190,V | 51.51634436,Lat | 7.33592497,Lon | 219.164,Ellh | 0.011257, | 0.014774, | 0.022825 | 50,Q |
| 3 | 137014.828655 | [2074] | 37,N | -13,E | 190,V | 51.51639034,Lat | 7.33580400,Lon | 219.238,Ellh | 0.010862, | 0.014808, | 0.022815 | 50,Q |
| 4 | 137018.129651 | [2074] | 42,N | -17,E | 189,V | 51.51643734,Lat | 7.33568114,Lon | 219.209,Ellh | 0.010905, | 0.014635, | 0.022773 | 50,Q |
| 5 | 137021.436674 | [2074] | 43,N | -13,E | 189,V | 51.51648456,Lat | 7.33555970,Lon | 219.129,Ellh | 0.011128, | 0.014976, | 0.022773 | 50,Q |
| 6 | 137024.768855 | [2074] | 44,N | -13,E | 189,V | 51.51653165,Lat | 7.33543664,Lon | 219.082,Ellh | 0.011046, | 0.014868, | 0.022922 | 50,Q |
| 7 | 137028.065583 | [2074] | 44,N | -18,E | 189,V | 51.51657771,Lat | 7.33531410,Lon | 219.076,Ellh | 0.011286, | 0.015268, | 0.023078 | 50,Q |
| 8 | 137031.362426 | [2074] | 43,N | -19,E | 189,V | 51.51662397,Lat | 7.33519211,Lon | 219.114,Ellh | 0.011445, | 0.015365, | 0.023139 | 50,Q |
| 9 | 137034.646846 | [2074] | 42,N | -13,E | 190,V | 51.51667034,Lat | 7.33507188,Lon | 219.140,Ellh | 0.011212, | 0.015130, | 0.022813 | 50,Q |
| 10 | 137037.943424 | [2074] | 43,N | -16,E | 189,V | 51.51671679,Lat | 7.33494892,Lon | 219.147,Ellh | 0.011580, | 0.015509, | 0.023134 | 50,Q |

Abb. 3: Auszug aus Timestamp.MRK mit den protokollierten RTK-Informationen

Weiterhin werden die Originaldaten der Satellitenbeobachtung sowie die Ephemeriden-Daten erfasst und in einer PPKRAW.bin-Datei im Format RTCM 3.2 gespeichert. Zusätzlich konvertiert das System die Satellitendaten on the fly in das RINEX-Format (Receiver Independent Exchange Format) und schreibt diese Daten in eine RINEX.obs-Datei. Damit stehen ebenfalls alle relevanten Informationen für eine PPK-Auswertung zur Verfügung. Diese kann – bedarfsorientiert – z. B. auf Basis der kostenfreien RTKLIB-Software (BÄUMKER 2014, TAKASU 2020) ausgeführt werden.

Zur weiteren Prozessierung müssen die vorliegenden Positionsdaten in der Regel in ein Zielkoordinatensystem konvertiert werden, in Deutschland vielfach ins Landeskoordinatensystem ETRS89. Da die Höheninformation nach dem Flug als ellipsoidische Koordinaten vorliegt, ist zudem eine Geoidundulation (aktuell im GCG2016 – German Combined Quasigeoidmodell) als Korrekturterm anzubringen. Als Resultat ergeben sich Höhen im Deutschen Haupthöhennetz DHHN2016. „Die horizontalen Variationen“ des Quasigeoids können Beträge bis zu 10 mm pro km annehmen. Quasigeoidvariationen müssen deshalb auch bei lokalen Höhenbestimmungen, z. B. mit GNSS, berücksichtigt werden“ (BKG 2020a). Neben einer Webapplikation (BKG 2020b) vertreibt das BKG hierzu auch eine Software als Desktoplösung.

3 Untersuchungsergebnisse

Die nachfolgenden Auswertungen erfolgten für vier verschiedene Systeme Phantom 4 RTK, welche an drei unterschiedlichen Tagen eingesetzt wurden. Die Auswertungen wurden mit der Software Agisoft Metashape durchgeführt. Alle Berechnungen basieren auf identischer Parametrisierung um somit eine Vergleichbarkeit der Resultate zu gewährleisten.

3.1 Qualität der RTK-Messungen

Soll die Lagerung eines Bündelblocks auf der Grundlage gemessener Äußerer Orientierungen ausgeführt werden, ist vorab die Frage zur Qualität der gemessenen Positionsdaten zu klären. Die in Kap. 1 aufgeführten Herstellerangaben zu den erreichbaren Genauigkeiten bewegen sich in einem Bereich der sowohl eine optimale Satellitenkonfiguration als auch einen ungestörten Empfang der Echtzeit-Korrekturdaten voraussetzt. Von diesen Rahmenbedingungen kann nicht

durchgängig ausgegangen werden. Der Hersteller nennt hierzu vier verschiedene Qualitätsstufen zum RTK-Status, der auch während des Bildflugs in der Steuerungs-App angezeigt werden (Abb. 2 rechts):

- None
- RTK-FIX (Mehrdeutigkeiten / Ambiguities gelöst)
- RTK-FLOAT (keine Lösung der Mehrdeutigkeiten)
- SINGLE-GNSS

Abb. 4 zeigt die während der Bildflüge (die sich aus jeweils zwei Teilflügen einer Kreuzbefliegung zusammensetzen) erreichten Standardabweichungen der RTK-Messungen. Die vorliegenden Ergebnisse machen die zum Teil starken Variationen in der Qualität der gemessenen RTK-Positionen deutlich. Lediglich die Messungen des Systems A zeigen eine homogene Datenqualität, die einer FIX-Lösung entspricht. Eine geringe Anzahl von sichtbaren Satelliten, eine schlechte Geometrie der Satellitenkonstellation sowie eine schlechte Funkverbindung zwischen Basisstation und Rover können eine FIX-Lösung verhindern.

Der Haupteinflussfaktor ist bei den hier vorliegenden Daten in der Qualität der Datenverbindung zum SAPOS-Dienst HEPS zu sehen. Derartige Probleme sind nicht untypisch und durch die in Teilen schlechte Qualität des Mobilfunknetzes bedingt. Allerdings können zusätzlich auch atmosphärische Einflüsse eine Ursache darstellen. So fand z. B. die Kreuzbefliegung mit System D unter ungünstigen Witterungsbedingungen (Wind, aufkommende Regenfront) statt. Für die Flüge mit den Systemen B und C ist die RTK-Qualität für jeweils einen Teilflug akzeptabel, während für den zweiten Teilflug deutliche Genauigkeitsschwankungen vorliegen. Die Flüge mit System A weisen eine durchgängig hohe RTK Qualität auf.

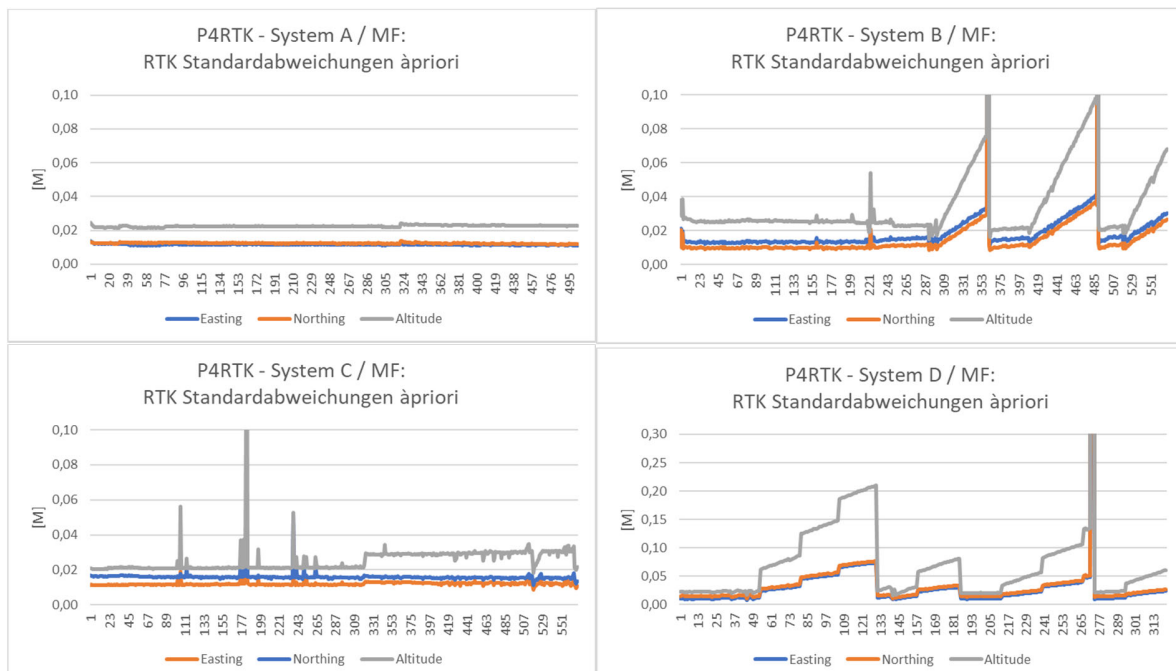


Abb. 4: Standardabweichungen (à priori) der mittels RTK bestimmten Bildpositionen (gemessene ÄORI) der Phantom 4 RTK Systeme A – D. Hinweis: die vertikale Skalierung für System D weicht von denen der Systeme A – C ab

3.2 Georeferenzierung der Bildverbände mittels RTK

Die in Kap. 3.1 gezeigten RTK-Messungen können als Basis für die Bildorientierung im Rahmen der Bündelblockausgleichung (BBA) genutzt werden, mit dem Ziel die Anzahl notwendiger Passpunkte zu reduzieren oder ggf. auch völlig darauf zu verzichten (PRZYBILLA et al. 2015, GERKE & PRZYBILLA 2016).

Die nachfolgenden Untersuchungen orientieren sich an typischen Lagerungskonfigurationen, die sich aus einer Kombination von Passpunkten und gemessener Äußerer Orientierung zusammensetzen (integrierte Orientierung). Im Gegensatz zu Bildverbänden der mantragenden Luftbildphotogrammetrie sind hierbei hinreichend genaue Messungen der Orientierungswinkel, die ein hochgenaues Inertiales Messsystem liefert, nicht verfügbar. Die in Tab. 1 gelisteten Konfigurationen wurden evaluiert. Abhängig vom individuellen Block variiert die maximale Anzahl der GCP zwischen 45 und 50. Für alle Konfigurationen wurde eine einheitliche Innere Orientierung (UNIFIED) für die zwei Teilflüge der Kreuzbefliegung eingeführt. Eine weitere Berechnung erfolgte mit zwei separaten Inneren Orientierungen (SEPARATE) für die Blocklagerung mit beobachteter ÄORI und 4 GCP in den Blockecken. Ziel dieser Variante ist einen eventuellen Einfluss veränderlicher Fokussierung der Kamera zu erkennen.

Tab. 1: Lagerungskonfigurationen aus gemessener ÄORI und Passpunkten

| Innere Orientierung (IORI) | ÄORI | Vollständige GCP (45-50) | 4 GCP in den Blockecken | ÄORI & 4 GCP | ÄORI & 1 GCP |
|----------------------------|------|--------------------------|-------------------------|--------------|--------------|
| UNIFIED | X | X | X | X | X |
| SEPARATE | - | - | - | X | - |

Die während der Bildflüge mit den DJI-Systemen erfassten RTK-Daten wurden mit ihren à priori Genauigkeiten als Beobachtungen in die BBA eingeführt. In der Folge der Berechnungen wurde zudem der Einfluss unterschiedlicher Passpunktanordnungen evaluiert. Abb. 5 zeigt die Verbesserungen an den beobachteten Äußerer Orientierungen nach der Bündelblockausgleichung.

In Agisoft Metashape werden diese Größen als „ERROR“ bezeichnet. Die in der Abbildung dargestellten Resultate basieren auf einer Blocklagerung bestehend aus den RTK-Messungen sowie zusätzlichen 4 Passpunkten in den Blockecken. Die Verbesserungen liegen bei Bildflügen mit einem hohen Anteil von FIX-Lösungen in der Größenordnung der Beobachtungsgenauigkeiten (System A und C). Die Resultate für die Systeme B und D zeigen die (in Teilen) systematisch schlechten RTK-Messungen durch entsprechend hohe Verbesserungen an.

Die Überprüfung der Blockgeometrie, hier insbesondere auch von Blockdeformationen, erfolgt über die Restabweichungen (RMSE) an den Kontrollpunkten (Checkpoints – CP, Abb. 7). Im Gegensatz dazu sind die entsprechenden RMSE-Werte an den Passpunkten (Ground Control Points – GCP, Abb. 6) weniger aussagekräftig. Sie spiegeln lediglich wider, wie die Einpassung des Bildverbands auf die GCP erfolgt.

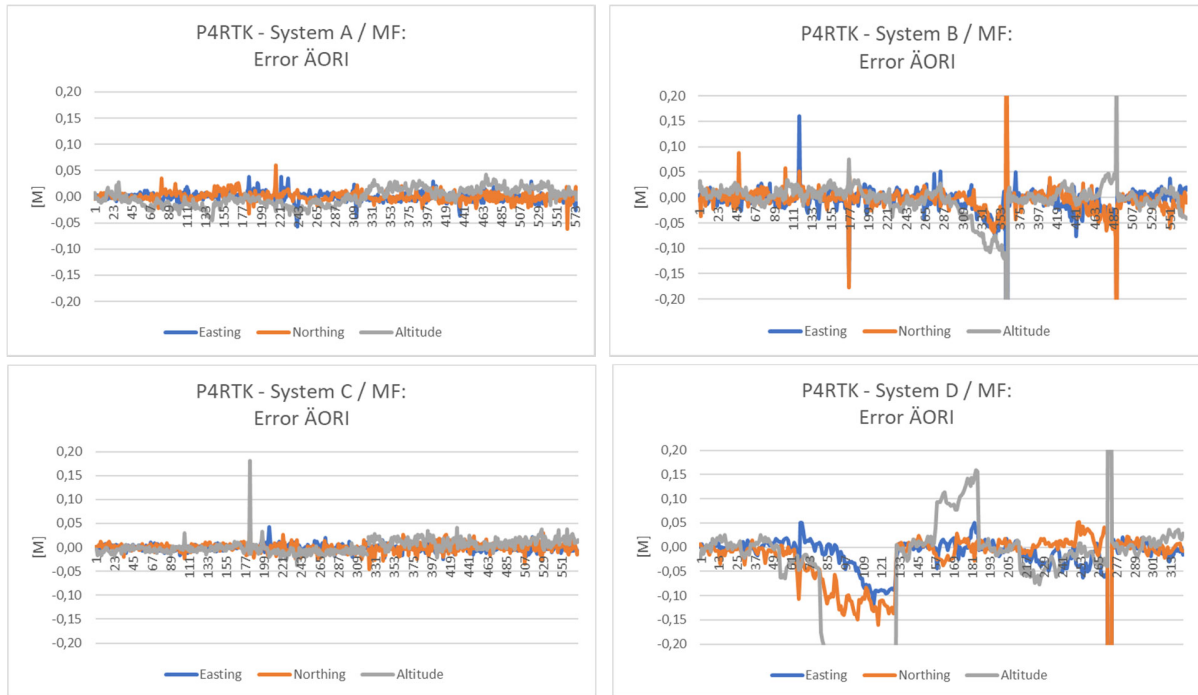


Abb. 5: Verbesserungen (Error) an den durch RTK bestimmten Bildpositionen (ÄORI) nach der BBA für die Systeme A – D

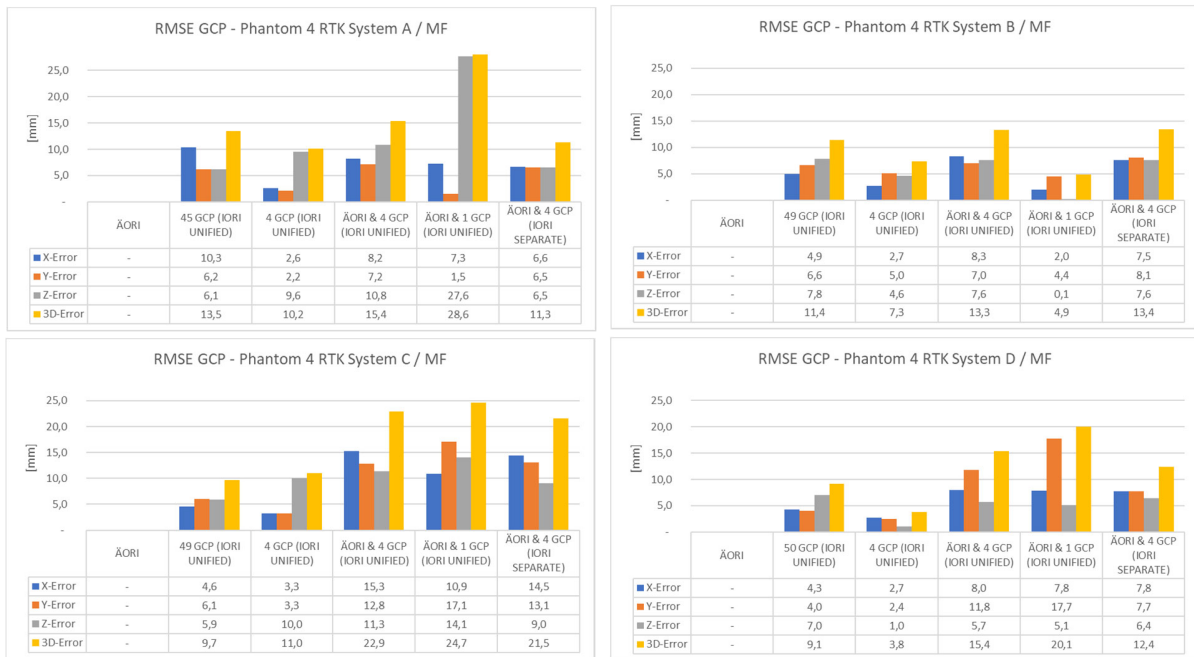


Abb. 6: RMSE-Werte an den Passpunkten (CP) in Abhängigkeit von der Lagerungsart (direkt: ÄORI – indirekt: GCP – integriert: ÄORI+GCP) (Systeme A – D)



Abb. 7: RMSE-Werte an den Kontrollpunkten (CP) in Abhängigkeit von der Lagerungsart (direkt: ÄORI – indirekt: GCP – integriert: ÄORI+GCP) (Systeme A – D). Hinweis: die vertikale Skalierung weicht von der der GCP (Abb. 6) um den Faktor 10 ab

In Abb. 7 werden die Einflüsse der Lagerungsart auf den jeweiligen Block sehr deutlich. Es können folgende Effekte abgeleitet werden:

- Direkte Lagerung auf die gemessene ÄORI
Die Abweichungen an den CP liegen, bezogen auf die Lagekoordinaten, in der Größe der RTK-Genauigkeit (10-20 mm), jedoch zeigt sich eine signifikant große Abweichung in der Höhe. Diese liegt bei den Systemen A und D deutlich über 100 mm und bei System C knapp unter diesem Wert. Lediglich für System B liegt die Abweichung im Rahmen der Beobachtungsgenauigkeit. Eine zuverlässige Lagerung für diese Variante (ohne Bodenpasspunkte) ist nicht erkennbar.
- Indirekte Lagerung mit maximaler Passpunkt-Besetzung
Da in dieser Variante alle GCP zur Lagerung genutzt werden ist eine Kontrolle mittels unabhängiger CP nicht möglich. In Abb. 6 ist jedoch die hohe Qualität der Einpassung auf die GCP erkennbar, die bei ca. 0,5 - 0,7 der GSD liegt. Die hier betrachtete Lagerungsvariante ist mit einem sehr hohen terrestrischen Aufwand verbunden.
- Indirekte Lagerung mit minimaler Passpunkt-Besetzung
Aus der Lagerung über 4 GCP in den Blockecken ist deutlich erkennbar, dass keine hinreichende Stabilität in den Bildverbänden erreicht werden kann. Während die Lageabweichungen der CP noch im Bereich der GSD liegen, übersteigen die Höhenabweichungen diese um den Faktor 15 - 30. Eine Ursache für dieses Resultat ist in der Metrik der Kamera bzw. den offensichtlich unzureichenden Möglichkeiten zur simultanen Kalibrierung zu sehen (Kap. 3.3).
- Integrierte Lagerung auf die gemessene ÄORI und vier Passpunkte

Die vorliegenden Resultate zeigen die Wirksamkeit der integrierten Lagerung auf der Basis der RTK-Messungen in Verbindung mit einer Passpunktbesetzung in den Blockecken. Die Abweichungen an den CP liegen im Bereich der GSD, in Teilen auch darunter. Die erzielten Ergebnisse sind nur minimal schlechter als die Variante mit einer Vollpasspunkt-Besetzung.

- Integrierte Lagerung auf die gemessene ÄORI und einem Passpunkt
Während die direkte Georeferenzierung mittels gemessener Äußerer Orientierung in den vorliegenden Datensätzen durch signifikante Höhenabweichungen gekennzeichnet ist, sind die positiven Auswirkungen eines zusätzlichen Passpunktes (in der Blockmitte) deutlich erkennbar. Die systematischen Höhenabweichungen an den CP reduzieren sich auf ca. 15 - 30 mm und liegen damit auf dem Genauigkeitsniveau der RTK-Messungen. Die Qualität der hier erzielten Genauigkeiten bei der Bildorientierung ist für topographische Anwendungen ausreichend.

3.3 Georeferenzierung der Bildverbände mittels Post-Processed Kinematic (PPK)

DJI RTK-Systeme bieten, auf Grund der Verfügbarkeit der Originaldaten der Satellitenbeobachtung sowie der Ephemeriden-Daten, die Möglichkeit einer verbesserten Positionsbestimmung im Post-processing (PPK). Die notwendigen Berechnungen können z. B. mit der freien Software RTKLIB (TAKASU 2020) ausgeführt werden. Da DJI über keine eigene Auswertesoftware verfügt, wird RTKLIB in den Workflows verschiedener Drittanbieter eingesetzt (AEROTAS 2020, KLAUPPK 2020). Allgemeine Hinweise auf GNSS-Workflows finden sich z. B. bei EMLID (2020). Ein besonderes Augenmerk ist bei der Auswertung auf die korrekte Anpassung/Interpolation der Positionsdaten auf den jeweiligen Zeitstempel der Bildaufnahme sowie die Hebelarm-Korrektur zu legen. Die hierzu notwendige Software wurde von BÄUMKER (2020) erstellt und für das Post-Prozessierung eingesetzt.

In Abb. 8 sind Vergleichsdaten (System B) aus RTK und PPK Prozessierungen dargestellt. Es wird deutlich, dass die beim RTK wiederholt auftretenden Beobachtungen mit großen Standardabweichungen à priori bei der PPK Prozessierung im Wesentlichen nicht mehr vorhanden sind. Es bleibt aber erkennbar, dass im zweiten Teilflug (Bildnummer ab ca. 245, Flughöhe über Grund: 50 m) – im Vergleich zum ersten (Flughöhe über Grund: 60 m) – eine offensichtlich schlechtere Satellitenkonfiguration vorlag, die zu einer schlechteren Beobachtungsgenauigkeit führt. Die Differenzen zwischen RTK- und PPK-Auswertung zeigen in weiten Bereichen eine gute Übereinstimmung, allerdings liegen auch hier partielle Probleme bei der Positionsbestimmung vor.

Die Verbesserungen (ERROR) an den Bildpositionen nach der BBA sind in weiten Bereichen sehr ähnlich, was für die insgesamt gute RTK-Lösung spricht. Dieses Resultat wird auch durch die Restabweichungen an den Kontrollpunkten bestätigt. Für alle Lagerungsarten ergeben sich nahezu identische Ergebnisse. Lediglich die direkte Blocklagerung auf die gemessene ÄORI weist Unterschiede auf, wobei bei der PPK-Lösung erstaunlicherweise höheren RMSE-Werte vorliegen.

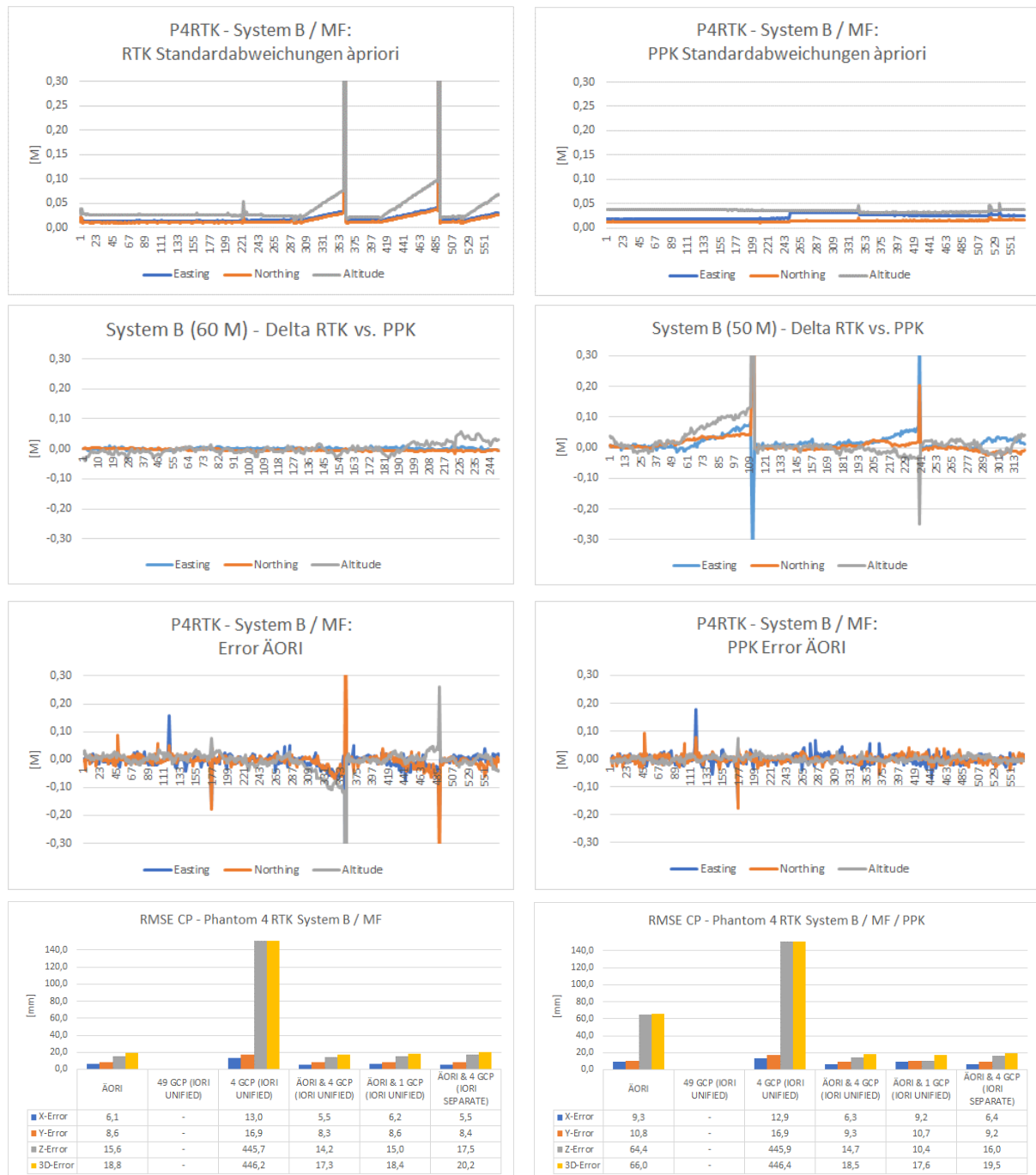


Abb. 8: Vergleich der Auswertungen auf der Basis von RTK-Messungen (links) und PPK-Auswertungen (rechts) für das System B:
 Oben: Standardabweichungen (à priori) der ermittelten Bildpositionen (ÄORI)
 Mitte-oben: Differenzen zwischen RTK und PPK (links: Flug 1, rechts: Flug 2)
 Mitte- unten: Verbesserungen (Error) an den Bildpositionen (ÄORI) nach der BBA
 Unten: RMSE-Werte an den Kontrollpunkten (CP) in Abhängigkeit von der Lagerungsart

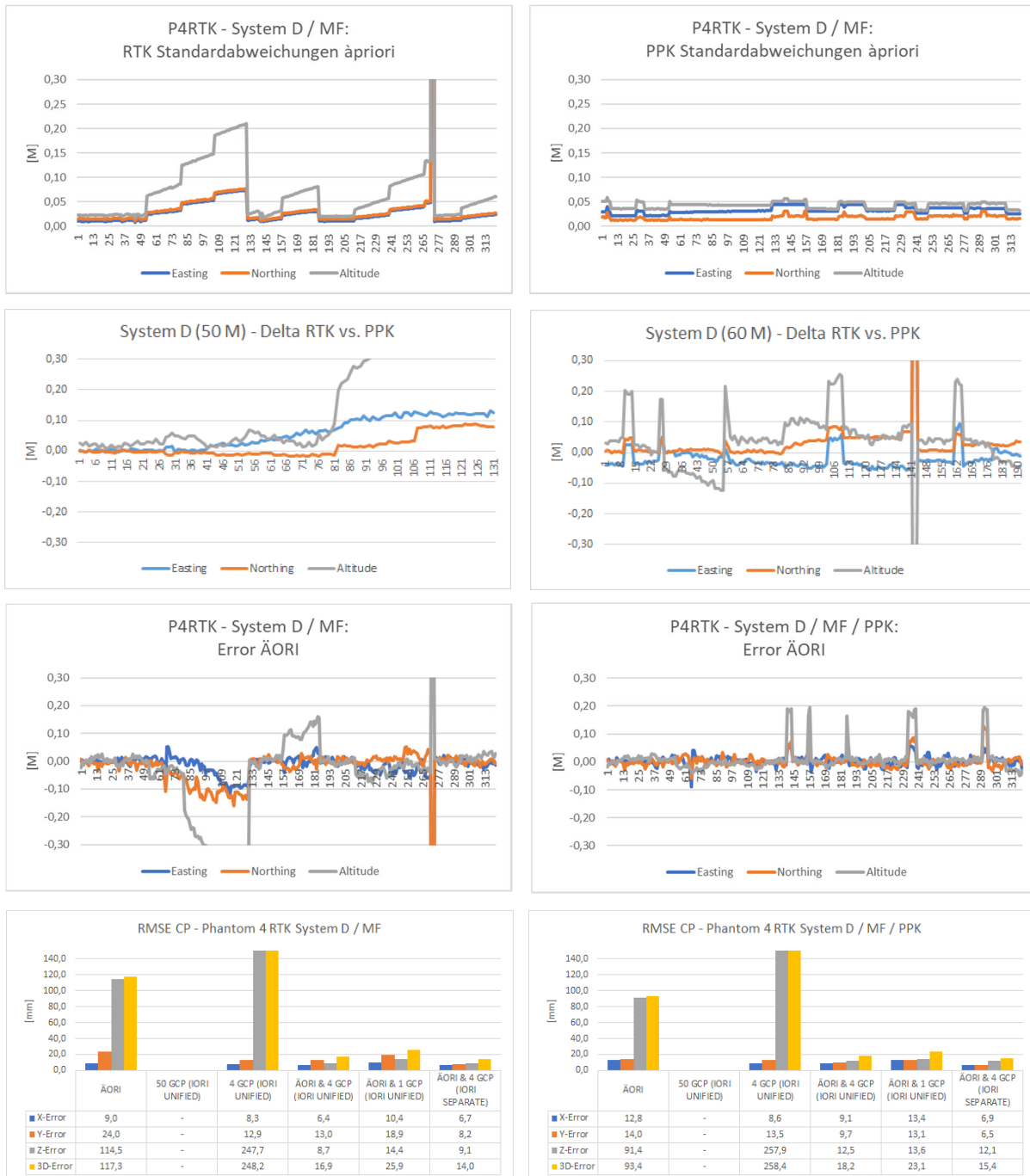


Abb. 9: Vergleich der Auswertungen auf der Basis von RTK-Messungen (links) und PPK-Auswertungen (rechts) für das System D:
 Oben: Standardabweichungen (à priori) ermittelten Bildpositionen (ÄORI)
 Mitte-oben: Differenzen zwischen RTK und PPK (links: Flug 1, rechts: Flug 2)
 Mitte-unten: Verbesserungen (Error) an den Bildpositionen (ÄORI) nach der BBA
 Unten: RMSE-Werte an den Kontrollpunkten (CP) in Abhängigkeit von der Lagerungsart

Die Vergleichsdaten RTK vs. PPK für das System D zeigt Abb. 9. Die vorliegenden RTK-Daten weisen für ca. 20% der insgesamt 321 Bilder des Fluges à priori Genauigkeiten > 10 cm auf, so dass davon ausgegangen werden kann, dass hier keine FIX-Lösung vorliegt (Abb. 10). Der Flug weist im Vergleich zu denen der Systeme A – C die schlechteste RTK-Qualität auf. Die PPK-Lösung liefert gegenüber der des Systems B geringere Genauigkeiten. Diese sind zwar bei getrennter Betrachtung der zwei Teilflüge nahezu homogen in Lage und Höhe, jedoch im zweiten Teilflug (60 m) erkennbar schlechter. Häufigere, größere Differenzen zwischen RTK- und PPK-Auswertung sind die Folge (Abb. 9, Mitte-oben).

Der generelle Qualitätsgewinn der PPK-Lösung spiegelt sich nach Durchführung der BBA im Ergebnis nicht wider. Trotz homogener Qualität der Positionsbestimmungen liegen für verschiedene Bereiche des Bildverbandes Zuschläge (Error) an den gemessenen ÄORI von bis zu 20 cm vor. Die Ursachen sind möglicherweise in einer schlechten Satellitenkonfiguration in Verbindung mit sehr ungünstigen Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt des Bildflugs zu suchen. Abb. 11 weist hier deutliche Systematiken für die an der ÄORI im Rahmen der BBA angebrachten Zuschläge auf.

Der abschließende Vergleich der RMSE-Werte an den Kontrollpunkten (Abb. 9 unten) liefert nahezu identische Resultate. Der vermutete Genauigkeitsgewinn durch die Post-Prozessierung ist im vorliegenden Datensatz nicht nachweisbar.

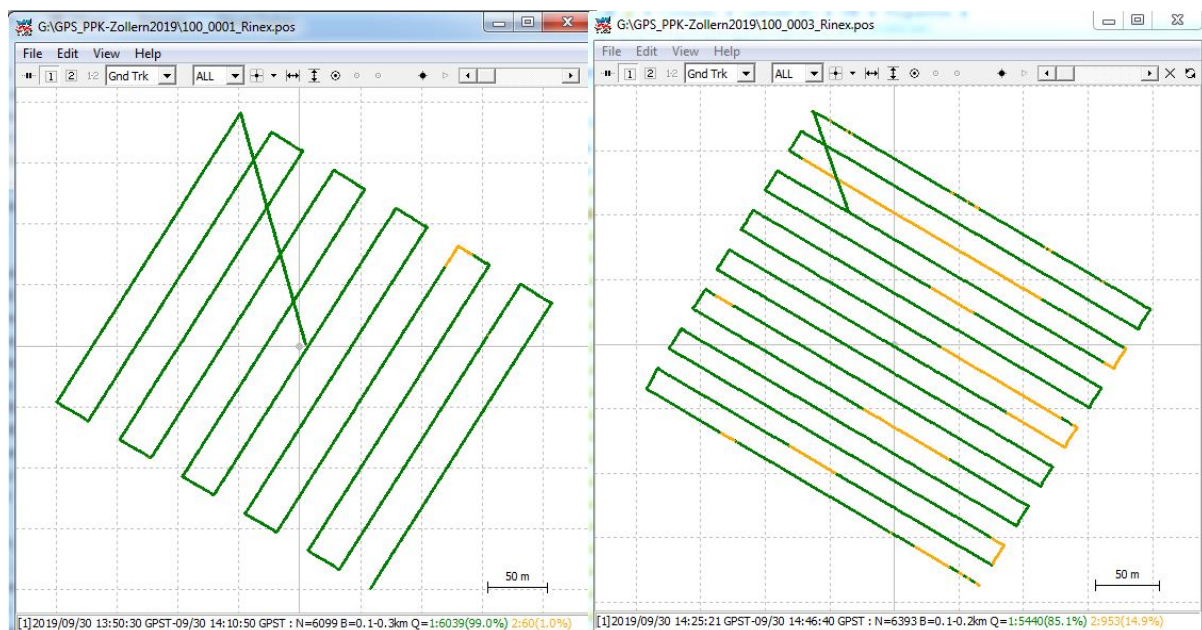
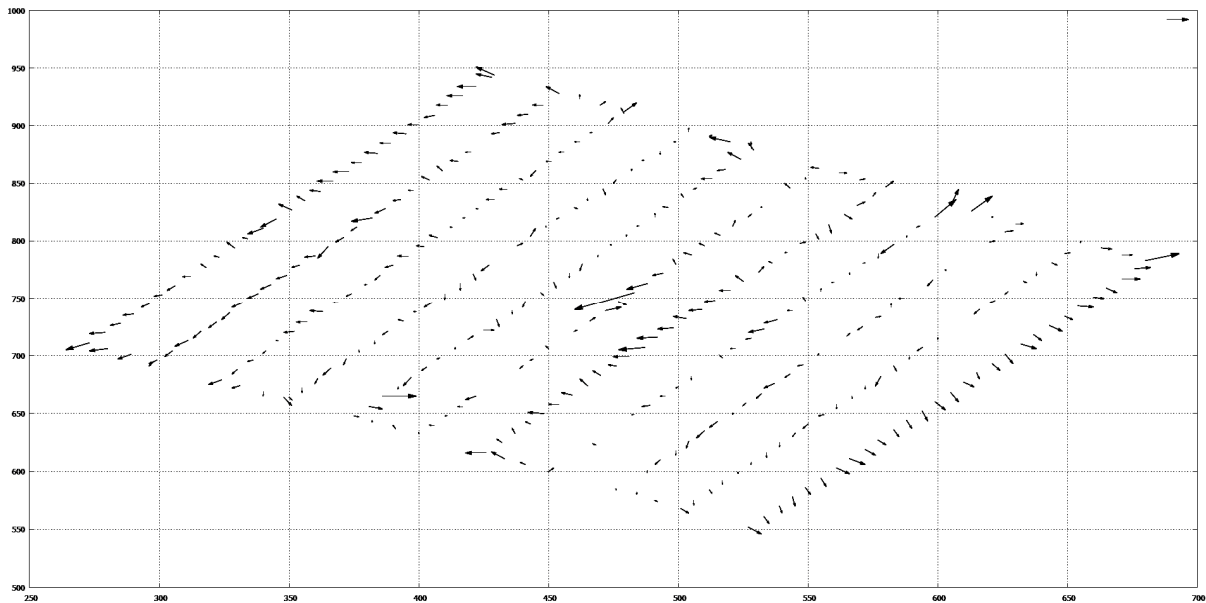
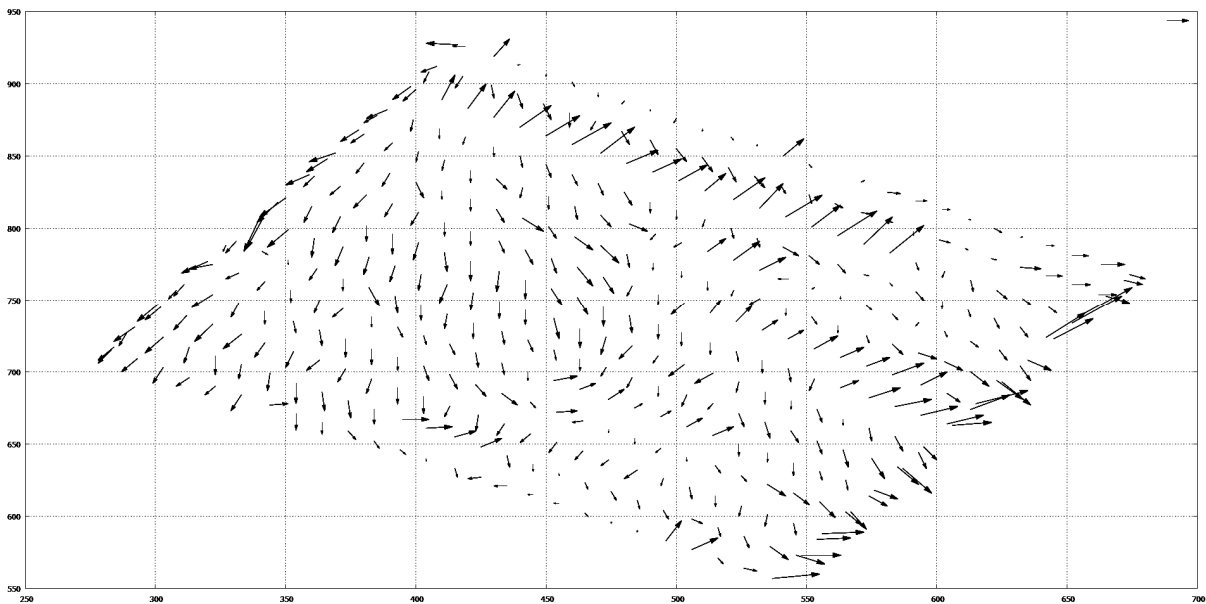


Abb. 10: Anteil der FIX (Grün) und FLOAT-Lösungen (Gelb) aus dem Post-Processing mit RTKLIB für Flüge mit System D (Flughöhe ü. G., links 50 m, rechts 60 m)



RMSE-Werte: Easting: 19,3 mm, Northing: 20,1 mm (nicht dargestellt: Altitude: 26,4 mm)



RMSE-Werte: Easting: 29,9 mm, Northing: 45,2 mm (nicht dargestellt: Altitude: 74,5 mm)

Abb. 11: RMSE-Werte der ÄORI nach BBA, mit deutlich erkennbaren Systematiken in den PPK-Messungen - System D – Flughöhe ü. G.: oben 50 m, unten 60 m – Lagerung auf 50 GCP

3.4 Innere Orientierung der Kamera

Voraussetzung für die in-situ Kalibrierung der Kamera in der BBA ist neben einer geeigneten Aufnahmekonfiguration (hier: Kreuzverband) das Vorliegen entsprechender Lagerungsinformationen (Passpunkte, gemessene Elemente der ÄORI). Abb. 12 zeigt Änderungen der Parameter Kamerakonstante (Δc) und Hauptpunktlage (XH, YH) in Abhängigkeit von der Blocklagerung.

Für alle Kameras liegen geringe Änderungen in der Hauptpunktlage vor (≤ 1 Pixel), ein Resultat, das für die hohe Stabilität der jeweiligen Systeme spricht.



Abb. 12: Änderungen der Parameter der Inneren Orientierung (Δc , XH, YH) in Abhängigkeit von der Blocklagerung sowie gemeinsamer bzw. separater Parameter für die Teilflüge (Systeme A – D). Hinweis: die Abweichungen Δc beziehen sich auf einen einheitlichen Startwert

Der Einfluss der Blocklagerung auf den Parameter „Kamerakonstante“ wird bei allen Systemen sehr deutlich. Bei der Nutzung von ausschließlich vier Passpunkten in den Blockecken ist eine zuverlässige Bestimmung dieses Parameters nicht möglich. Die Abweichungen gegenüber allen anderen Varianten betragen zwischen 20 - 80 Pixel. Die entsprechenden (negativen) Folgen zeigt Abb. 7, hier insbesondere bei den dargestellten Höhenabweichungen an den Kontrollpunkten. Die verwendeten Ansätze einer gemeinsamen (UNIFIED) bzw. separaten (SEPARATE) Parametrisierung der Inneren Orientierung für die jeweiligen Teilflüge zeigt nahezu identische Resultate, sowohl für die RMSE-Werte an den Kontrollpunkten (Abb. 7) als auch für die Variation der Kamerakonstante (Abb. 8). Hieraus ist ableitbar, dass von einer Stabilität der untersuchten Parameter im Verlauf der zwei Teilflüge des Kreuzverbands ausgegangen werden kann.

4 Fazit & Ausblick

Mit der Verfügbarkeit von präzisen RTK-Lösungen für den UAV-Bildflug und der damit verbundenen direkten Georeferenzierung von photogrammetrischen Bildverbänden, ist ein wichtiger Schritt mit Blick auf den wirtschaftlichen Einsatz von UAV's in Geodäsie und Photogrammetrie getan. Die im Beitrag untersuchten UAV-Systeme Phantom 4 RTK liefern für Anwendungen im mittleren Genauigkeitsbereich ($> 2 - 3$ cm) hinreichende Möglichkeiten den terrestrischen Aufwand für die Georeferenzierung deutlich zu reduzieren, indem auf umfangreiche Passpunktmes-

sungen weitestgehend verzichtet werden kann. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch auch die zum Teil starken Variationen in der Qualität der gemessenen RTK-Positionen sowie deren Auswirkungen auf die Bildorientierung und die beteiligten Parameter. Eine Lagerung ausschließlich auf die gemessenen Elemente der Äußeren Orientierung scheint nach den vorliegenden Ergebnissen nicht sinnvoll, da hier vielfach systematische Höhenversätze erkennbar sind. Der integrierte Ansatz zur Georeferenzierung ist hier das Mittel der Wahl. Tab. 2 enthält einen Vorschlag für den Einsatz von RTK / PPK, in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich.

Tab. 2: Nutzung von RTK und PPK in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich

| Parameter | Topographie | Kataster | Ingenieurvermessung |
|------------------------|-------------|------------------|---------------------|
| GSD | 2,5 cm | 1,5 cm | < 1cm |
| Bildmassstab | 1:10.000 | 1:5.000 | 1:1.000 |
| Genauigkeitsbereich | 10 - 20 cm | 1 - 3 cm | 0,2 - 1 cm |
| Genauigkeit erreichbar | +++ | ++ | + |
| Georeferenzierung | RTK / PPK | RTK / PPK & GCP* | GCP** |
| Punktwolke | x | x | x |
| Volumina | x | - | - |
| Höhenlinien | x | - | - |
| Profile | x | - | x |
| Orthophoto | x | x | - |
| Karte | x | x | - |
| 3D Punkte | - | x | x |

GCP* - GNSS-Messung / GCP** - Netzmessung

Die mit zusätzlichem Aufwand verbundene Post-Prozessierung der GNSS-Daten lieferte für die hier untersuchten zwei Datensätze der P4RTK keinen zusätzlichen Genauigkeitsgewinn, obwohl für ca. 20% der RTK-Daten des Systems D keine FIX-Lösungen erreicht werden konnten. Durch eine angepasste Gewichtung (auf der Basis der à priori Genauigkeiten) in der BBA ist der Einfluss dieser Beobachtungen gering, negative Auswirkungen auf die Blockgeometrie nicht erkennbar. Der PPK-Lösung kommt jedoch überall dort eine signifikante Bedeutung zu, wo eine schlechte Mobilfunk-Infrastruktur die Nutzung von Korrekturdiensten verhindert. Probleme eingeschränkten Satellitenempfangs können aber auch durch das PPK nicht aufgefangen werden. Positiv zu bewerten ist die Qualität der Kamera. Das in der Phantom 4 RTK genutzte System ist mit seinem Konzept baugleich mit der Zennuse X4S. Die Kamera verfügt über eine hohe Stabilität, die deutlich über der sonstiger Systeme des Herstellers liegt. Die Ursache hierfür ist in der Fix-Fokus Optik zu sehen, die mechanische Instabilitäten als Folge von Wechseloptiken ausschließt. Aus Sicht der Photogrammetrie ist sie trotz dieser positiven Eigenschaften keine Messkamera, eine in-situ Kalibrierung daher dringend notwendig.

5 Literaturverzeichnis

- AEROTAS, 2020: Phantom 4 RTK – PPK Processing Workflow. <https://www.aerotas.com/phantom-4-rtk-ppk-processing-workflow>. Letzter Zugriff: 19.01.2020.
- BÄUMKER, M., 2014: Zeitreihenanalyse der Daten der GNSS Referenzstation der Hochschule Bochum. In: Zeitabhängige Messgrößen – Ihre Daten haben (Mehr-)Wert. Beiträge zum 129. DVW-Seminar am 26. und 27. Februar 2014 in Hannover, Schriftenreihe des DVW, Band 74 (Hrsg. DVW e.V. – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement).
- BÄUMKER, M., 2020: Labor für Physikalische Messtechnik der HS Bochum. <https://www.hochschule-bochum.de/fbg/einrichtungen-im-fachbereich/labor-fuer-physikalische-messtechnik/>. Letzter Zugriff: 19.01.2020.
- BKG, 2020a: Die Höhenbezugsfläche von Deutschland. <https://www.bkg.bund.de/DE/Ueberdas-BKG/Geodaesie/Integrierter-Raumbezug/Hoehenbezugsflaeche/hoehenbezug.html>. Letzter Zugriff: 15.01.2020.
- BKG, 2020b: Onlineberechnung von Quasigeoidhöhen mit dem GCG2016, <http://gibs.bkg.bund.de/geoid/gscmp.php?p=g>. Letzter Zugriff: 15.01.2020.
- DJI, 2020: Phantom 4 RTK Technische Daten, <https://www.dji.com/de/phantom-4-rtk/info>. Letzter Zugriff: 15.01.2020.
- EMLID, 2020: GPS post-processing. <https://docs.emlid.com/reachm-plus/common/tutorials/gps-post-processing/>. Letzter Zugriff: 19.01.2020.
- GERKE, M. & PRZYBILLA, H.-J., 2016: Accuracy analysis of photogrammetric UAV image blocks: influence of onboard RTK-GNSS and cross flight patterns. PFG - Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation **2016**(1), 17-30.
- HANDELSBLATT, 2020: Diese chinesische Firma hat mit Drohnen den Massenmarkt erobert. <https://www.handelsblatt.com/technik/digitale-revolution/digitale-revolution-diese-chinesische-firma-hat-mit-drohnen-den-massenmarkt-erobert/25395412.html?ticket=ST-1134012-TrivDX4ReHLfHg6nRijj-ap2>. Letzter Zugriff: 19.01.2020.
- KLAUPPK, 2020: <https://klauppk.com/klauppk-software-for-the-phantom4-rtk-2/>. Letzter Zugriff: 19.01.2020.
- PRZYBILLA, H.-J., REUBER, C., BÄUMKER, M. & GERKE, M., 2015: Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 24, T. Kersten (Hrsg.), 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, 16.-18. März 2015 an der Universität zu Köln, Tagungsband auf CD-ROM, 45-54.
- PRZYBILLA, H.-J., BÄUMKER, M. & VIETEN, J., 2018: Das UAV-Testfeld Zeche Zollern in Dortmund. Schriftenreihe des DVW, Band 89, 61-80, Wißner-Verlag, Augsburg.
- SAPOS, 2020: SAPOS-Dienste im Überblick. <https://www.sapos.de/dienste-im-ueberblick.html>. Letzter Zugriff: 15.01.2020.
- TAKASU, T., (2020): RTKLIB, Open Source Program Package for RTK-GPS. <http://gpspp.sakura.ne.jp/rtklib/rtklib.htm>. Letzter Zugriff: 15.01.2020.