

Direkte Georeferenzierung in UAS-Anwendungen – Eine Beispielanwendung der Landesvermessung Baden-Württemberg

MICHAEL CRAMER¹, FELIX SABOW¹ & PETRA FÖRG²

Zusammenfassung: Auch in der Landesvermessung spielen technisch und wirtschaftlich optimierte Datenerfassungsmethoden und Auswerteprozesse eine entscheidende Rolle. Daher wird in dieser Studie ein Verfahren der direkten Georeferenzierung, ohne Verwendung von Passpunkten, in einer UAS-Anwendung untersucht. Das Gebiet einer Straßenbaumaßnahme wurde im März 2015 in einer Blockbefliegung mit einer Bodenpixelgröße (GSD) von 3 cm in einer mittleren Flughöhe von etwa 125 m mit dem MAVinci Sirius Pro System im Auftrag des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL BW) erfasst. Die Auswertung der photogrammetrischen Daten inkl. der zur Verfügung gestellten GNSS-Trajektorie erfolgte mit zwei unabhängigen Softwarepaketen. Referenzdaten in Form von mit GNSS eingemessenen natürlichen Punkten bzw. kinematisch erfassten GNSS-Straßenprofilen erlauben eine Abschätzung der erzielten 3D-Objektpunktgenauigkeit aus der photogrammetrischen Auswertung. Neben der Einzelpunktgenauigkeit wird auch die Genauigkeit der 3D-Punktwolke analysiert. Die Einzelpunktgenauigkeit dieser dichten 3D-Punktwolke soll laut Anforderungen der Landesvermessung 1 dm betragen.

1 Einführung

Die Landesvermessung hat die Aufgabe, Veränderungen in der Landschaft zeitnah zu dokumentieren und so die amtlichen Geobasisdaten zu aktualisieren. Luftbilder sind für die Landesvermessung schon seit jeher die typische Datenquelle, aus denen diese Geobasisdaten abgeleitet werden können. Um eine hohe Aktualität der Geobasisinformationen gewährleisten zu können, müssen diese ständig fortgeführt werden. Daher besteht großes Interesse, die kostenintensive Erfassung der Ausgangsdaten, unter anderem durch eine Effizienzsteigerung bezüglich der Datenerfassung und Datenverarbeitung, zu optimieren (GÜTLINGER 2015). Die flexible Datenerfassung kleinräumiger Gebiete mit einem UAS stellt somit eine gute Alternative oder Erweiterung zu klassischen Bildflügen dar, welche der Aktualisierung von Geobasisinformationen dienen.

Das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL BW) hat seit 2012 mehrfach UAS für Aufgaben der Landesvermessung eingesetzt. Im Jahr 2012 wurde eine umfassende Kampagne zur Evaluierung der UAS-gestützten Bilderfassung im Rahmen eines Flurneuerungsverfahrens gemeinsam mit dem Institut für Photogrammetrie (ifp) und dem Institut für Flugmechanik und Flugregelung (ifr) der Universität Stuttgart durchgeführt (CRAMER et al. 2013). Dieses sogenannte Hessigheim-Projekt (benannt nach der benachbart liegenden

¹ Institut für Photogrammetrie, Universität Stuttgart, Geschwister-Scholl-Str. 24D, D-70174 Stuttgart, E-Mail: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de, felixsabow@outlook.com

² Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL), Referat 53, Fernerkundung, Postfach 4065, 76025 Karlsruhe, E-Mail: petra.foerg@lgl.bwl.de

Ortschaft) diene zugleich als Pilotprojekt für alle Landesvermessungsbehörden in Deutschland zur Abschätzung des Potenzials von UAS im Rahmen der Landesvermessung. In der Studie konnte nachgewiesen werden, dass bei guter Blockgeometrie und dichter Passpunktverteilung 3D-Objektpunktgenauigkeiten (RMS aus Kontrollpunktdifferenzen) im Bereich von 2 – 3 cm in der Lage bzw. ca. 5 cm in der Höhe erzielt werden können. Damit können 3D-Einzelpunkte subpixelgenau bestimmt werden. Die korrespondierende Bodenpixelgröße betrug 5 – 8 cm.

Im nachfolgenden Jahr 2013 wurden diese Untersuchungen in einer neuen Kooperation zwischen dem LGL BW, ifp und dem kommerziellen UAS-Anbieter senseFly fortgesetzt. Zur Dokumentation einer Hangrutschung im Bereich Talheim-Mössingen, Schwäbische Alb, sollte mit dem senseFly eBee System eine 3D-Oberflächenpunktswolke photogrammetrisch bestimmt werden, um durch Vergleich mit dem vorliegenden Laserscanner-DGM die aktuelle Veränderung des Geländes zeitnah zu dokumentieren. Aufgrund der Unwegsamkeit des Geländes war keine alternative terrestrische Datenerfassung möglich. Der Flug wurde im November 2013 unter sehr anspruchsvollen Befliegungsbedingungen (starke Windböen, große Helligkeitsunterschiede, niedriger Sonnenstand) durchgeführt. Der jahreszeitlich späte Befliegungstermin ergab sich aus der Anforderung, in der vegetationsfreien Periode zu fliegen, um möglichst ungehinderte Sicht auf das Gelände zu haben. Die Hangrutschung liegt zu großen Teilen in dicht bewaldetem Gebiet. Im Unterschied zu dem Hessigheim-Projekt lag der Schwerpunkt in dieser Untersuchung auf der Analyse der Genauigkeiten der abgeleiteten Oberflächenmodelle, nicht auf der Einzelpunktbestimmung.

Die flächenhaften Vergleiche der photogrammetrischen Punktwolken mit den Referenzdaten aus der Laserbefliegung zeigen gute Übereinstimmungen im zentralen, von Passpunkten kontrollierten Bereich. Die Abweichungen liegen bei ca. -10 cm – +20 cm, wobei gewisse Anteile auch durch die Vegetation beeinflusst sind. Der Vergleich erfolgte zwischen dem Geländemodell aus Laserscanning und dem photogrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodell. Weitere Analysen anhand von DOM-Vertikaldifferenzen an 19 signalisierten Referenzpunkten lieferten je nach Orientierung bzw. DSM-Verfahren Genauigkeiten (RMS) von 5 – 10 cm, entsprechend 0.6 – 1.2 pix bei einer mittleren GSD von 8 cm. Diese Höhengenaugigkeit im Bereich von etwa 1 pix GSD korrespondiert gut mit den von HAALA (2013) genannten Genauigkeiten photogrammetrischer Punktwolken, die im Rahmen des EuroSDR-Tests für großformatige photogrammetrische Kamerasysteme ermittelt wurden. Das vom LGL BW angestrebte Genauigkeitspotenzial der photogrammetrischen DOM-Bestimmung liegt ebenfalls bei etwa 10 cm.

Die Ergebnisse der UAS-Projekte Hessigheim bzw. Talheim zeigen, dass die Qualität der 3D-Einzelpunkt- bzw. Oberflächenmodellbestimmung durchaus mit der Genauigkeit der klassischen photogrammetrischen Kamerasysteme bzw. Laserscanner verglichen werden kann. Das gilt zumindest für derartige, eher kleinräumige Befliegungsprojekte mit sehr dichter Bildüberdeckung und bei guter bis sehr guter Passpunktverteilung, was einen gewissen Mehraufwand für die Signalisierung bzw. Einmessung dieser Punkte mit sich bringt. Dieses steht in einem Gegensatz zu der photogrammetrischen Praxis, bei der großflächige Auswertungen mit minimaler Passpunktanzahl realisierbar sind. Die präzise GNSS-Bahnbestimmung liefert genaue Messungen der Projektionszentrumskoordinaten, die als gewichtete Beobachtungen in die Auswertung eingehen und damit die Passpunkte vom Gelände „in die Luft“ verlagern. Im Idealfall sind so komplett passpunktfreie Auswertungen möglich, sofern keine zusätzlichen Offset- und Drift-

Effekte zu korrigieren sind und es sich um einen gut verknüpfenden Block mit mehreren sich überlappenden Flugstreifen handelt (ACKERMANN 1997).

In wie weit dieses effiziente Anwendungsszenario nun auch mit kommerziellen UAS realisierbar ist, soll im Rahmen dieses Beitrags anhand eines durchgeführten Beispielprojekts analysiert werden. Dazu hat das LGL BW eine Firma beauftragt, das Gebiet einer Straßenbaumaßnahme im März 2015 mit einem sog. RTK (real-time-kinematic) UAS zu befliegen. Ein solches UAS verfügt neben der bildgebenden Kamera über weitere Sensorik für eine präzise GNSS-Trajektorienbestimmung, die ähnlich wie im bemannten Bildflug eine (quasi) passpunktfreie Auswertung der Bilddaten erlauben soll.

Dieses soll im Folgenden vorgestellt werden. Im nachfolgenden Abschnitt wird RTK UAS diskutiert mit Schwerpunkt auf dem MAVinci Sirius Pro System, welches für diese Anwendung gewählt wurde. Anschließend wird das vom LGL BW beauftragte Befliegungsprojekt (Abschnitt 3) erläutert. Die photogrammetrische Auswertung und Präsentation der Ergebnisse erfolgt in Abschnitt 4. Abschnitt 5 diskutiert dann vor allem auch die seitens der Landesvermessung angestrebte Verwendung UAS-gestützter 3D-Punktwolken zur Fortführung des bestehenden Geländemodells. Der Beitrag schließt mit einer Zusammenfassung.

2 RTK UAS

Unter RTK versteht man im Allgemeinen die kinematische, differenzielle Positionierung in Echtzeit unter Verwendung der Phasenmessung mit Auflösung der Integer-Phasenmehrdeutigkeiten. Für die Echtzeitanwendung ist zwingend eine permanente Verbindung zu einer GNSS-Basisstation notwendig, die am Boden auf einem bekannten Punkt aufgestellt wird und permanente Korrekturdaten an das Flugsystem sendet. Auf diesen Datenlink kann verzichtet werden, wenn die Auswertung der GNSS-Daten im Post-Processing erfolgt, was neben der Echtzeit-Filterung auch die nachträgliche Glättung der Daten und damit Steigerung der Genauigkeit erlaubt. Die präzisen Positionen stehen dem Träger dann allerdings nicht in Echtzeit zur Verfügung. Die ausgewerteten Messdaten sind identisch, die Auswertung findet lediglich zeitversetzt, nach der Landung statt. Dieses Verfahren wird mit post-processed kinematic Auswertung (PPK) bezeichnet, was für photogrammetrische Anwendungen oftmals ausreichend ist. Da in beiden Fällen die Qualität der Bahnbestimmung mit zunehmender Basislänge abnimmt, ist die Referenzstation im Idealfall im Testgebiet platziert, oder es werden – sofern möglich – Korrekturdienste eines GNSS-Permanentreferenzstationsnetzwerks genutzt.

Standard UAS-Flugplattformen sind für die Echtzeitnavigation im Regelfall mit einfachen GNSS-Empfängern ausgestattet, die nur auf einer Frequenz arbeiten. Dieses Standard-GNSS erlaubt unter Auswertung der Codephase Echtzeitpositionsgenauigkeiten im Bereich von wenigen Metern, was für die Navigation des Trägers ausreichend ist. Für die präzise Messung der Projektionszentrumsordinate des zu orientierenden Sensorsystems sind jedoch Positionsmessungen von 10 cm oder besser notwendig, je nach angestrebtem Genauigkeitsbereich bzw. Anwendung. Dieses Genauigkeitspotenzial wird durch die Verwendung von Mehrfrequenz-GNSS-Empfängern realisiert, ähnlich wie sie auch im Rahmen der klassischen geodätischen Basislinienmessung bzw. für die photogrammetrische GNSS-gestützte Aerotriangulation zum Einsatz kommen. Die dort verwendeten Systeme können aufgrund von Gewicht und Größe aber

nicht in UAS mit einem maximalen Gesamtfluggewicht von unter 5 kg eingesetzt werden. Erst mit der Miniaturisierung erschließen sich diese Anwendungsszenarien. BÄUMKER et al. (2013) berichten über ein Zwei-Frequenz UA-System auf Basis des TOPCON B110-Empfängers sowie einer Zwei-Frequenz-Antenne Maxtena M1227 HCT. Das eigentliche GNSS-Empfänger-Board hat Abmessungen von 40x55x10 mm und ein Gewicht <20 g. Das Gesamtgewicht inkl. Antenne liegt bei ca. 100 g. Vergleichbare Systeme finden sich mittlerweile in diversen kommerziellen UAS-Lösungen. Zur Unterscheidung von der regulären UAS-Basisausstattung wird oftmals das Kürzel RTK zur Kennzeichnung real-time-kinematic GNSS-Funktionalität ergänzt. Beispiele dafür sind die UAS-Flächenflieger senseFly ebee RTK bzw. C-Astral Bramor rTK. Andere Hersteller ergänzen alternative Kürzel, unter denen sich die präzise GNSS-Bahnbestimmung verbirgt, wie z.B. Trimble UX5 HP (high precision) oder das hier eingesetzte MAVinci Sirius Pro (professional) System. Auch Rotorflügler wie z.B. der Hexakopter Aibotix X6 Version 2 sind mit RTK-GNSS ausgestattet. Die Hersteller versprechen für diese Systeme durchgängig GNSS-Positionsgenauigkeiten von bis zu wenigen Zentimetern.

Bei dem MAVinci Sirius Pro System handelt es sich um fixed-wing UAS. Starrflügler oder Flächenflieger haben gegenüber Rotorflüglern den Vorteil, dass sie deutlich höhere Flugzeiten erreichen und somit größere Flächen in einem Flug abdecken können was Anwendungen der Landesvermessung vermutlich entgegenkommt. Das Fluggerät selber besteht größtenteils aus Elapor, einem leichten aber gleichzeitig stabilen Hartschaum der Firma Multiplex. Die Spannweite beträgt 1.63 m, die Länge 1.22 m. Das Abfluggewicht liegt inklusive der möglichen 550 g Nutzlast bei 2.7 kg. Bildflüge mit dem UAS sind bis zu einer Windstärke von 50 km/h (Böen bis 65 km/h) durchführbar und es kann bei Außentemperaturen von -20° C bis +45° C, sowie bei Regen eingesetzt werden. Die Fluggeschwindigkeit liegt bei etwa 65 km/h (alle Angaben laut Hersteller). Mittlerweile stattet MAVinci die Systeme mit der Kamera X-M1 von Fujifilm in Kombination mit einem 18 mm f/2.0 Festbrennweitenobjektiv aus. Die kompakte spiegellose Systemkamera verfügt über einen 16 Megapixel APS-C Bildsensor mit den Abmessungen 23.6 x 15.6 mm² und wiegt 450 g inklusive Objektiv. Die im Rahmen des hier untersuchten Projekts erfassten Daten wurden allerdings noch mit einer Panasonic GX-1 und einem 14 mm f/2.5 Pancake Objektiv (entsprechend 35 mm Brennweite im Kleinbildformat) aufgenommen. Die Panasonic GX-1 verfügt ebenfalls über 16 Megapixel, die aber auf einem Micro Four Thirds Sensor angeordnet sind. Mit einer Fläche von 17.3 x 13.0 mm² ist dieser etwa 40 % kleiner als der Sensor der aktuellen XM-1, was sich vor allem auch auf die radiometrische Qualität der Bilder (schlechteres Signal-Rausch-Verhältnis aufgrund kleinerer Pixelgröße) auswirken kann.

Das Sirius Pro System verfügt über ein RTK-fähiges GNSS-Board der Firma Topcon. Laut PRZYBILLA et al. (2015) handelt es sich dabei um das B110 Empfänger-Board, die entsprechenden Produktinformationen von MAVinci spezifizieren einen 100 Hz Topcon L1/L2-Zwei-Frequenzempfänger der Genauigkeitsklasse 2 cm.

3 LGL BW Projekt Neutrassierung Landstraße L 583

Die Landstraße L 583 im Neckar-Odenwald-Kreis verbindet die Ortschaften Großeicholzheim und Seckach. Der bisherige Streckenverlauf hatte unübersichtliche Kuppen und Wannen, enge Kurven und im Bereich der Randstreifen keinen festen Untergrund. In den Jahren 2011/2012 wurde

deshalb die Straße über eine Länge von ca. 2 km vollkommen neu gebaut und im Bereich einer scharfen Kurve über eine Länge von ca. 700 m seitlich verlegt. Begleitend wurden für ca. 5 km die Entwässerungsanlagen hergestellt oder neu gestaltet. Der neue Straßenverlauf und die Geländeänderungen durch die Baumaßnahmen erforderten die Aktualisierung der Geobasisdaten des LGL, insbesondere des DGM. Zur zeitnahen Dokumentation hat das LGL BW den geänderten Abschnitt der Landstraße im März 2015 durch eine klassische UAS-Blockbefliegung erfassen lassen. Um den Verlauf der Straße entsprechend zu berücksichtigen, wurde die Befliegung auf zwei Bildflüge aufgeteilt, mit einem Überlappungsbereich, der in beiden Flügen erfasst wurde. Bei einer mittleren Flughöhe von 125 m über Grund (resultierende Bodenpixelgröße 3 cm) wurden im ersten Flug in 26 Flugstreifen 313 Bilder aufgenommen (Vorwärtsüberdeckung >85%, lange Bildseite in Flugrichtung, Querüberdeckung ca. 70%). Nach der Änderung der Hauptflugrichtung um 45° wurden anschließend weitere 515 Aufnahmen in 17 Flugstreifen gemacht. Das erfasste Gebiet hat eine Größe von etwa 0,9 km² und variiert in der vertikalen Ausdehnung um ungefähr 75 m.

Planung und Durchführung und auch die photogrammetrische Auswertung der Befliegung wurden komplett von der durch das LGL BW beauftragten Firma erledigt. Für die Auswertung konnte diese Firma lediglich auf zwei bekannte Punkte zurückgreifen, die als Standorte für die



Abb. 1: Übersicht über das erfasste Gebiet mit Verteilung der Referenzpunkte (rot: Standpunkte für die GNSS-Referenzstationen, gelb: unabhängige Kontrollpunkte (natürliche Punkte))

terrestrischen GNSS-Referenzstationen (je Block eine Station) genutzt wurden und im Befliegungsgebiet liegen. Weitere bekannte Objektpunkte standen der Firma für die Auswertung nicht zur Verfügung, sodass sich die 3D-Lagerung des Blocks bzw. Georeferenzierung der Bilder ausschließlich auf die direkt gemessenen GNSS-Projektionszentrumskordinaten und die Verknüpfung der Bilder im Bildverband stützt.

Als Referenzwerte für die hier durchgeführten Genauigkeitsuntersuchungen dienen die vom LGL BW zur Verfügung gestellten Daten. Hierzu zählen neben dem landesweiten DGM aus der Laserscannerbefliegung sowohl mit statischem GNSS eingemessene natürliche Punkte (13

natürliche Punkte), wie auch kinematisch erfasste GNSS-Straßenprofile (im Wesentlichen entlang der L 583 und Nebenstraßen). Für diese Trajektorie wurde ein GNSS-Empfänger auf dem Dach eines Fahrzeugs befestigt, das die entsprechenden Straßen abfuhr; die Trajektorie wurde somit mittels kinematischem GNSS erfasst. Die Höhe der Antenne vom Boden wurde mit dem Meterstab gemessen und als konstanter Offset zur Reduktion der Vertikalkoordinaten auf das Straßenniveau angebracht. Diese Korrektur ist nicht streng, da das Fahrzeug durch die Fahrbewegungen federt. Daher ist die Höhengenaugigkeit der Trajektorie auf nur ca. 10 – 15 cm festzusetzen. Die statisch bestimmten Referenzpunkte werden mit einer Genauigkeit von 2 – 3 cm angenommen. Bei diesen Kontrollpunkten handelt es sich um Straßenmarkierungen, Kanaldeckel und speziell angebrachte Farbmakierungen, die in den Bildern klar zu identifizieren sind. Die Abb. 1 zeigt das Untersuchungsgebiet (abgeleitetes Orthophoto aus der UAS-Befliegung) mit den zur Verfügung stehenden (statischen) Referenzpunkten und den beiden Referenzstationsstandpunkten.

4 Photogrammetrische Auswertung

Wie bereits erwähnt ist das Projekt vom LGL BW komplett extern vergeben worden und die beauftragte Firma hat die aus der Befliegung abzuleitenden Endprodukte (Orthophoto (GSD 3 cm), dichte Punktwolke und Oberflächenmodell (Rasterweite 6 cm)) geliefert. Die Auswertung der Daten wurde, wie von der UAS-Herstellerfirma MAVinci empfohlen, mit dem Programmpaket agisoft PhotoScan Pro durchgeführt. MAVinci bietet hierfür eine spezielle Schnittstelle (Plugin) an, um die gemessenen präzisen GNSS-Projektionszentren entsprechend ihrer Genauigkeit zur Lagerung des Blocks zu verwenden. Es standen der Firma wie in Abschnitt 3 genannt nur zwei bekannte Geländepunkte (Referenzstationskoordinaten) für diese externe Auswertung zur Verfügung. Damit beruhen (lt. Sprachgebrauch von MAVinci) die Ergebnisse auf einer passpunktfreien Auswertung. Die beiden im Befliegungsgebiet stehenden und in den Bildern sichtbaren GNSS-Referenzstationen werden aber zumindest als Kontrollpunkte bzw. zur a priori Offsetkorrektur (z.B. Offset Antenne-Kameraprojektionszentrum) genutzt. Aus der Praxis der GNSS-gestützten Aerotriangulation ist bekannt, dass oftmals konstante Offsets pro Bildverband auftauchen – wobei die genauen Ursachen dafür zunächst keine Rolle spielen –, die aber mit nur einem Kontroll- bzw. Passpunkt vollständig aufgedeckt und korrigiert werden können.

Zu Vergleichszwecken wurde eine alternative Auswertung der Daten mit der Software Trimble UASMaster durchgeführt. Die direkt gemessenen GNSS-Projektionszentrumskordinaten flossen dazu mit einer Gewichtung von 3 cm in die Bündelausgleichung ein. Ansonsten erfolgte die Auswertung auch passpunktfrei. Die Genauigkeiten beider Auswertung ergeben sich nachfolgend aus dem Vergleich mit den vorliegenden Referenzdaten.

4.1 Einzelpunktgenauigkeit

Zur Beurteilung der absoluten Genauigkeit der 3D-Punktbestimmung wurden die 13 Kontrollpunkte sowohl in PhotoScan, als auch in UASMaster manuell gemessen, um so die Abweichungen zu den Referenzwerten bestimmen zu können. Die resultierenden Kontrollpunktdifferenzen sind in der Abb. 2 für die 13 Punkte angegeben. Sie zeigen die absolute Genauigkeit der Einzelpunktbestimmung. Die Differenzen sind getrennt für die Auswertungen mit PhotoScan (Quadratsymbolinien) bzw. UASMaster (Dreiecksymbolinien) gegeben. Die

Abbildung zeigt die hohe Übereinstimmung der Ergebnisse. Die Differenzen in horizontaler Richtung sind praktisch mittelwertfrei, in der Vertikalkoordinate lässt sich für beide Auswertungen ein mittlerer Offset von ca. 7.5 cm ablesen. Die Streuungen liegen bei 2.2 cm, 2.3 cm, 3.3 cm für PhotoScan und 3.6 cm, 3.7 cm, 2.6 cm für UASMaster, jeweils angegeben für Ost-, Nord- und Vertikalkoordinate. Die PhotoScan Genauigkeit ist geringfügig besser in den horizontalen Komponenten, wobei UASMaster in der Höhenkomponente leicht besser abschneidet. Die resultierenden RMS-Werte in der Vertikalen sind aber praktisch wieder gleich und liegen bei 8.2 cm für PhotoScan bzw. 7.9 cm für UASMaster. Bezogen auf die Bodenpixelgröße von etwa 3 cm wird in der Lage eine Genauigkeit von etwa 1 pix erreicht, in der Höhe liegt der RMS-Wert bei etwa 2.5 – 3 pix.

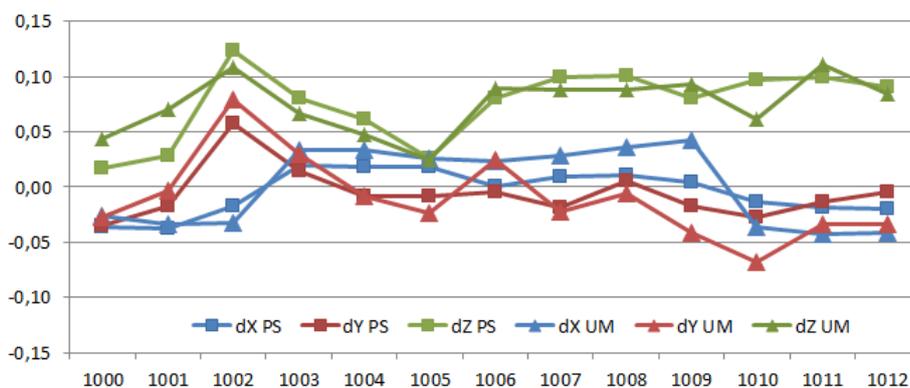


Abb. 2: Kontrollpunktdifferenzen [m] aufgetragen über der Punktnummer (PS: PhotoScan, UM: UASMaster)

4.2 Flächendeckende DHM-Genauigkeit

Die bisher gezeigten Resultate erlauben die Beurteilung der punktuellen Genauigkeit der 3D-Punktbestimmung an den 13 vorliegenden Kontrollpunkten. Da es im Rahmen dieses Projekts eher auf die flächenhafte (Höhen-)Genauigkeit ankommt, werden Vergleiche an den kinematisch erfassten Geländepunkten bzw. mit dem Laserscanner-DGM vorgenommen. Von den 405 kinematisch erfassten Geländepunkten liegen 379 im durch die Bildflüge erfassten Gebiet. An diesen Punkten können die Höhen aus den vorliegenden Oberflächenmodellen interpoliert und

Tab. 1: Vertikaldifferenzen an den Vergleichspunkten der kinematischen Trajektorie

	PhotoScan	UASMaster
Mittelwert [m]	-0.085	-0.060
Max. Abw. [m]	0.410	-0.468
Std. Abw. [m]	0.052	0.115
RMS [m]	0.100	0.129



Abb. 3: Vertikaldifferenzen an den Vergleichspunkten der kinematischen Trajektorie (DOM PhotoScan)

anschließend mit den Höhen aus der kinematischen GNSS-Trajektorie verglichen werden. Tab. 1 gibt einen Überblick über die berechneten Mittelwerte, maximalen Abweichungen, Standardabweichungen und RMS-Werte. Die Abb. 3 zeigt für das DOM aus der PhotoScan Auswertung die Vertikaldifferenzen in Abhängigkeit von der Lage der Punkte. Je größer der dargestellte Kreisdurchmesser, umso höher die Differenz. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss die geringere Genauigkeit der kinematischen Trajektorie berücksichtigt werden, daher wird hier auch nur von Vergleichs- nicht Referenzpunkten gesprochen. Die größeren Abweichungen treten vor allem in den durch Abschattung (Vegetation, Geländeeinschnitt) beeinflussten Bereichen auf, in den Gebieten mit freier Sicht sind die Differenzen kleiner. Dieses weist deutlich auf Ungenauigkeiten in der kinematischen GNSS-Trajektorie hin. Im äußersten Blockrandgebiet tauchen ebenfalls größere Differenzen auf, was sich mit der geringeren Überdeckung und damit auch geringeren Genauigkeit der 3D-Punktvolke aus der photogrammetrischen Auswertung begründen lässt. Die Genauigkeit der PhotoScan bzw. UASMaster Auswertungen ist nahezu identisch, wenn man die RMS-Werte vergleicht. In Bezug auf die Streuung ist das Ergebnis der Punktvolke aus PhotoScan aber besser. Im Vergleich zu den Ergebnissen der 3D-Einzelpunktbestimmung ist die Höhengengenauigkeit insgesamt schlechter, und liegt eher im Bereich von 3 – 4 pix (RMS) was aber auch durch die geringere Qualität der kinematischen Vergleichspunkte verursacht ist.

Die Abb. 4 zeigt die Differenz der beiden Oberflächenmodelle aus der PhotoScan bzw. UASMaster Auswertung (DOM PhotoScan minus DOM UASMaster). Da es sich um die gleiche Oberfläche handelt, abgeleitet aus dem gleichen Bildmaterial, sollten die Differenzen klein sein.

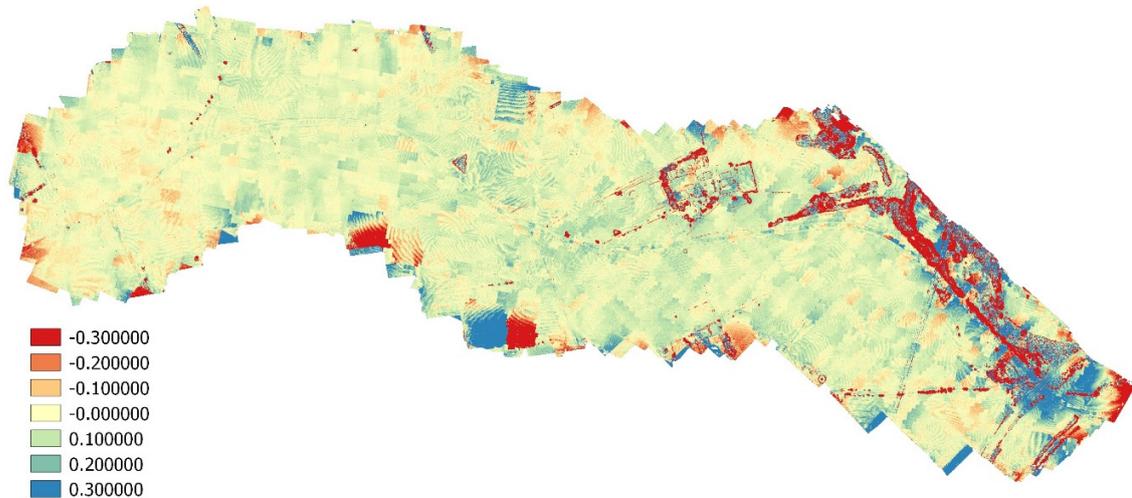


Abb. 4: Differenz der DOMs PhotoScan – UASMaster

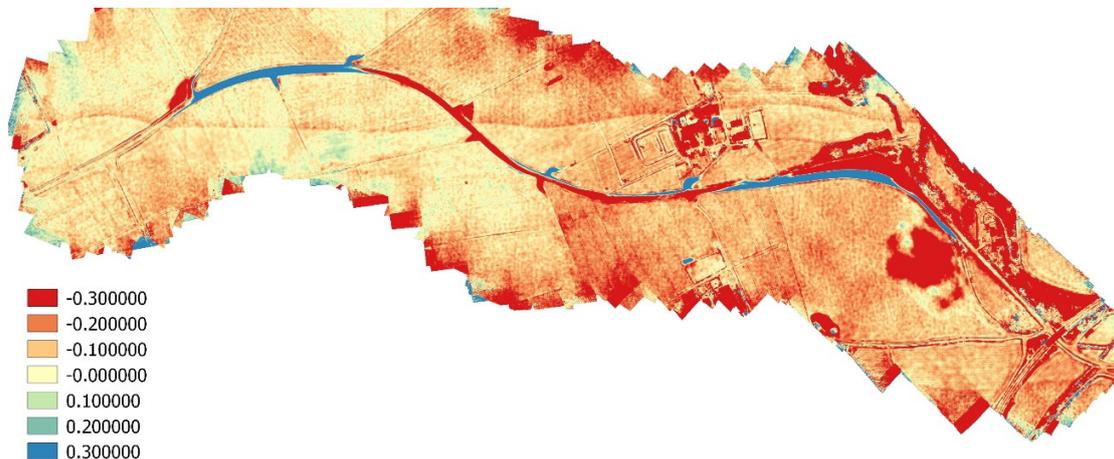


Abb. 5: Differenz zwischen Laserscanner DGM – PhotoScan DOM

Die Grafik zeigt Übereinstimmung überwiegend im Bereich von -10cm – 10cm. Größere Differenzen tauchen vor allem am Blockrand und im Bereich von Vegetation und an Gebäudekanten auf, was aber zu erwarten ist. Es lassen sich jedoch zusätzliche systematische Effekte in den Differenzen erkennen. Es handelt sich um eine Art Kachelung, die offensichtlich auf die Behandlung der jeweiligen Modelle in der Punktwolkengenerierung zurückzuführen ist. Ein solcher Effekt taucht nur in dem von UASMaster gerechneten DOM auf. Die dichte Punktwolke wird zunächst modellweise erzeugt. Diese modellweise generierten 3D-Punkte werden dann zu der gesamten Punktwolke zusammengeführt. Offensichtlich wird in PhotoScan dabei eine andere Anpassung der Modelle durchgeführt. Die in der Aerotriangulation für alle Bilder bestimmten Orientierungen / Unbekannten sind optimal für den gesamten Block geschätzt. Lokal, d.h. bezogen auf einzelne Bildpaare, können sich aber noch Restparallaxen zeigen. Auch dieser Effekt ist aus der klassischen AT bekannt: Wenn die Orientierungen aus einer Bündeltriangulation für das nachfolgende Stereoplotting übernommen werden sollen, kann es notwendig sein, Restparallaxen in dem Modell durch eine Nachorientierung über die zuvor

bestimmten Verknüpfungspunkte zu korrigieren. COLOMINA (2002) bezeichnet dieses mit dem „point interface“ (Punkt-Schnittstelle) in der Photogrammetrie. Trimble arbeitet aktuell an einer verbesserten Angleichung der Einzelmodelle zur Gesamtpunktwolke.

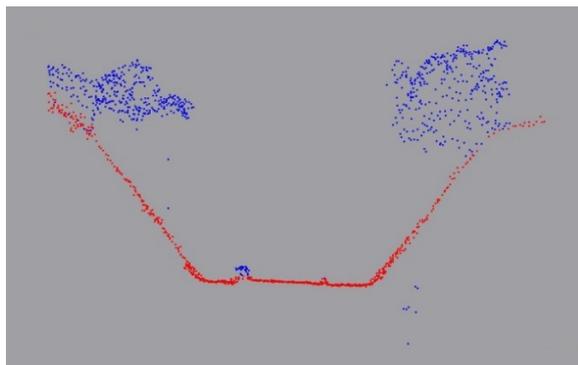
In der Abb. 5 wird das DOM aus der PhotoScan Auswertung verglichen mit dem Geländemodell aus der 2002 durchgeführten Laserscannerbefliegung der Landesvermessung. Da die Höhendaten zu unterschiedlichen Epochen erfasst wurden – das Laser-DGM dokumentiert den Zustand vor der Neutrassierung der Landstraße – müssen sich in dieser Differenz die Veränderungen der Landschaft durch die Straßenbaumaßnahme niederschlagen, was deutlich zu erkennen ist. Differenzen ergeben sich nicht nur an der eigentlichen Straßentrasse, im östlichen Bereich lässt sich unmittelbar neben der Straße auch ein größerer Bereich identifizieren, der offensichtlich aufgefüllt wurde. Darüber hinaus enthält die Differenz natürlich auch den systemimmanenten Unterschied zwischen Geländeoberfläche (Laser-DGM) und sichtbarer Oberfläche (photogrammetrisches DOM aus PhotoScan), vor allem für die mit Vegetation bestandenen Bereiche. Die gezeigten Differenzen sind tendenziell eher negativ, was so zu erwarten war, da hier das Oberflächenmodell von dem „tiefer liegenden“ Geländemodell abgezogen wurde. Die Differenzen liegen im Bereich von -10 – -30 cm. Auffällig sind sich quer durch das Gelände ziehende Versätze zwischen den Höhenmodellen, deutlich zu erkennen im mittleren Bereich des Untersuchungsgebiets und ebenfalls im süd-östlichen Bereich. Hierbei handelt es sich um Restsystematiken aus der Streifenanpassung der damaligen Laserscannerauswertung, die nun durch die hohe Genauigkeit des photogrammetrischen Oberflächenmodells aufgedeckt werden können. Derartige Effekte sind dem LGL BW auch aus anderen Projekten bekannt.

5 Diskussion der Ergebnisse

Die Analyse der Oberflächenmodelle aus der UAS-Befliegung bestätigt das hohe Potenzial der photogrammetrischen Ableitung von dichten Punktwolken. Bei einer Bodenpixelgröße GSD von 3 cm kann das resultierende Oberflächenmodell mit 3 – 4 pix Genauigkeit realisiert werden. Die Genauigkeit der Oberflächenpunkte ist jedoch schlechter als die Vertikalgenauigkeit der 3D-Einzelpunktbestimmung. Die 3D-Einzelpunktgenauigkeit (RMS) liegt bei etwa 1 pix (horizontal) und ca. 3 pix (vertikal). Im Vergleich zu dem Hessigheim-Projekt (CRAMER et al. 2013) sind die bodenpixelbezogenen RMS-Werte schlechter. Dies liegt am Einfluss der individuellen Blockgeometrien und ggf. auch an der kleineren GSD im L 583 Projekt. Hinzu kommt der Umstand, dass bei der Verwendung von Passpunkten am Boden die Neupunkte im gegebenen Passpunktrahmen interpoliert werden, wohingegen die direkte Georeferenzierung (GNSS-gestützte Aerotriangulation ohne Passpunkte) immer einen extrapolierenden Charakter hat. Dadurch können sich theoretische Restfehler (z.B. in der Gesamtsystemkalibrierung) leichter in der Objektpunktbestimmung niederschlagen. PRYZBILLA et al. (2015) untersuchen ebenfalls das Potenzial des MAVinci RTK Systems, berücksichtigen aber in ihren Auswertungen zusätzliche 4 Geländepasspunkte. Diese RTK-Konfiguration mit 4 Passpunkten erreicht für das vorgestellte Projekt die gleiche Genauigkeit wie eine klassische Bündeltriangulation mit 18 Passpunkten. Hervorzuheben ist, dass sich im L 583 Projekt keine systematischen Aufwölbungen des Oberflächenmodells erkennen lassen. Dieses zeigt den stabilisierenden Einfluss der präzisen GNSS-Projektionszentrumskoordinaten, die den Block vollständig kontrollieren, auch wenn

(außer der Referenzstation) keine Passpunktinformation am Boden verwendet wird. Im Gegensatz zu den bisherigen klassisch passpunktbasierten Untersuchungen in Hessigheim bzw. Talheim-Mössingen bedeutet dieses eine signifikante Effizienzsteigerung, da keinerlei Aufwand in eine zusätzliche Einmessung und Signalisierung von Passinformation am Boden erforderlich ist. Diese Effizienzsteigerung ist aber immer mit dem Extrapolationscharakter der direkten Georeferenzierung abzuwiegen. Die hier erzielten Vertikalgenauigkeiten erfüllen mit etwa 10 cm (RMS) jedoch die gestellten Anforderungen der Landesvermessung.

Für die Integration der UAS-basierten Oberflächenmodelle in das existierende Geländemodell – die eigentliche Motivation für derartige UAS-Projekte seitens des LGL BW – müssen nun aber noch verschiedene, teils manuelle Arbeitsschritte durchgeführt werden, um die Standards und die Qualität des digitalen Geländemodells des LGL BW gewährleisten zu können. In der mittels digitaler Bildkorrelation erzeugten dreidimensionalen Punktwolke werden alle sichtbaren Landschaftselemente abgebildet, auch Vegetation und weitere, das DGM störende Objekte. Zudem können bei automatischen Korrelationsverfahren die allgemein bekannten Probleme, z.B. in Schattenbereichen und texturschwachen Gebieten, entstehen. Die erzeugte Punktwolke wird daher zunächst automatisch in Bodenpunkte und Nichtbodenpunkte gefiltert (siehe Abb. 6).



Blau: Nichtbodenpunkte
Rot: Bodenpunkte

Abb. 6: Gefilterte Punktwolke (Klassifikation der UAS-Oberflächenpunkte)

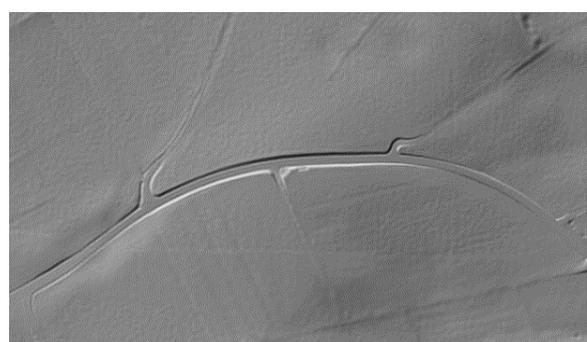
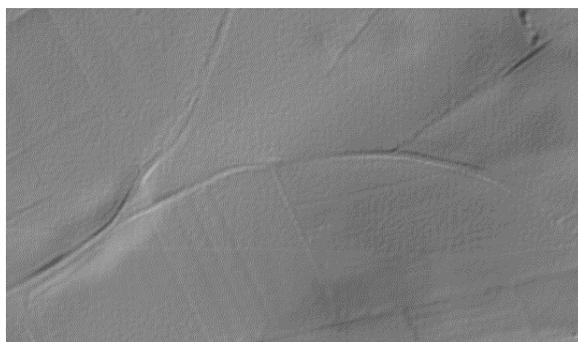


Abb. 7: Laserscanner-DGM (Zustand vorher, links) modifiziert durch die Daten aus der UAS-Befliegung (Zustand nachher, rechts), Ausschnitt aus dem Projekt L 583

Im Stereomodell kann durch den Vergleich der Bodenpunkte aus der aktuellen UAS-Befliegung mit dem veralteten DGM der veränderte Bereich abgegrenzt werden, in dem dann die weitere Bearbeitung erfolgt. Beim LGL BW liegt das Digitale Geländemodell in einer Gitterweite von 1 m landesweit flächendeckend vor. Somit wird auch aus den korrelierten Bodenpunkten der UAS-Befliegung für den veränderten Bereich eine regelmäßige, lückenlose 1 m-Gitterstruktur mittels linearer Prädiktion abgeleitet. In diesem Bereich wird der alte Datenbestand durch den neuen ersetzt. Dabei wird beim Übergang vom alten zum neuen DGM in einem 5 m breiten Streifen eine gleitende Anpassung gerechnet, so dass bei eventuellen geringen Höhendifferenzen keine Stufe entsteht.

Um die Qualitätsanforderungen an das DGM zu gewährleisten, wird das Ergebnis im Stereomodell kontrolliert und eventuell an den oben genannten Schwachstellen der Punktwolke manuell korrigiert. Dabei wird das DGM-Gitter durch Re-Interpolation optimal an den Geländeverlauf angepasst. Das Resultat dieser Anpassungen ist in Abb. 7 für einen Ausschnitt des Testgebiets gezeigt. Ein Nachteil der Stereoauswertung von UAS-Flügen gegenüber Standardbildflügen mit großformatigen Flächensensoren ist die Vielzahl und die unregelmäßige Anordnung der kleinformatigen Bilder. Ein daraus resultierender ständiger Wechsel der Stereomodelle wirkt hier bei der Bearbeitung sehr erschwerend. Der Einsatz stabilisierter Kameraaufhängungen könnte sich daher eventuell positiv auswirken. Hierzu sind weitere Untersuchungen geplant.

6 Zusammenfassung

Die hier vorgestellte Projektstudie belegt erneut das große Potenzial der UAS-gestützten Oberflächenmodellgenerierung für Anwendungen der Landesvermessung. Die RTK-Projektionszentren ermöglichen eine sehr effiziente Datenerfassung. Die Lagerung des photogrammetrischen Bildverbands erfolgt durch die präzisen GNSS-Projektionszentrumskoordinaten. Die bekannten Referenzstationskoordinaten im Befliegungsgebiet ermöglichen darüber hinaus eine etwaige Korrektur von blockkonstanten Offsets. Das photogrammetrische DOM kann so mit ca. 10 cm (RMS) bestimmt werden, was den Genauigkeitsanforderungen der Landesvermessung entspricht. Die photogrammetrischen Höhendaten können nach einer Filterung und Anpassung zur Fortführung des bestehenden landesweiten Geländemodells verwendet werden.

Literatur

- ACKERMANN, F., 1997: Geo-Kodierung ohne Passpunkte. GIS - Geo-Informationen-Systeme **10** (2), 28-32. <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/1997/Ack97.pdf> (letzter Zugriff: 28.04.2016)
- BÄUMKER, M.; PRZYBILLA, H.-J. & ZURHORST, A., 2013: Enhancements in UAV flight control and sensor orientation. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **40** (1/W2), 33-38. <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W2/33/2013/isprsarchives-XL-1-W2-33-2013.pdf> (letzter Zugriff: 28.04.2016)

- COLOMINA I., 2002: Modern sensor orientation technologies and procedures. Integrated Sensor Orientation, OEEPE Official Publication No. **43**, Heipke C., Jacobsen K. & Wegmann H. (Eds.), 59-70. <http://bono.hostireland.com/~eurosdr/publications/43.pdf> (letzter Zugriff: 28.04.2016)
- CRAMER, M., HAALA, N., ROTHERMEL, M., LEINSS, B. & FRITSCH, D., 2013: UAV-gestützte Datenerfassung für Anwendungen der Landesvermessung – das Hessigheim-Projekt Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band **22**, E. Seyfert (Hrsg.), 33. Wissenschaftlich-technische Jahrestagung DGPF, 27. Februar – 1. März 2013, 450-469.
- GÜTLINGER, M. 2015: UAS-Einsatz zur DGM-Aktualisierung, in Bundesanstalt für Gewässerkunde (Hrsg.): Wasserstraßenbezogene geodätische Anwendungen und Produkte der Fernerkundung. Kolloquium am 18./19. November 2014 in Koblenz. – Veranstaltungen 2/2015, Koblenz, März 2015, 11-19, http://doi.bafg.de/BfG/2015/Veranst2_2015.pdf (letzter Zugriff: 28.04.2016)
- HAALA, N., 2013: The Landscape of Dense Image Matching Algorithms. Photogrammetric Week '13, Ed. D. Fritsch, Wichmann, Berlin/Offenbach, 271-284. <http://www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo13/240Haala-new.pdf> (letzter Zugriff: 28.04.2016)
- PRZYBILLA, H.-J., REUBER, C., BÄUMKER, M. & GERKE, M., 2015: Untersuchung 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. http://www.dgpf.de/src/tagung/jt2015/proceedings/papers/06_DGPF2015_Przybilla_et_al.pdf (letzter Zugriff: 28.04.2016).