

RPAS im operationellen Einsatz beim LGL Baden-Württemberg – 3D-Dokumentation von Hangrutschungen

MICHAEL CRAMER¹, NORBERT HAALA¹, MANFRED GÜTLINGER² & REINHOLD HUMMEL²

Zusammenfassung: Das Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL BW) hat im Jahr 2012 erste umfassende Erfahrungen für den Einsatz von RPAS zur hochgenauen 3D-Datenerfassung und –Modellierung von kleinräumigen Gebieten gemacht. Aufgrund der sehr positiven Ergebnisse der damaligen Messkampagne, die in Zusammenarbeit mit dem Institut für Photogrammetrie (ifp) und dem Institut für Flugmechanik und Flugregelung (iFR) der Universität Stuttgart durchgeführt wurde, ist im Herbst 2013 ein weiteres RPAS-Projekt durchgeführt worden. Ziel war die 3D-Dokumentation einer Hangrutschung, die aufgrund von Starkregenereignissen im Juni 2013 am Albtrauf bei Mössingen-Talheim aufgetreten ist. Zum Einsatz kam das System eBee der Firma senseFly. Hierbei handelt es sich um einen Delta-Flügler mit ca. 1m Spannweite, der mit einer Canon Ixus 127 Kamera mit 16 MPix ausgestattet ist. Im Rahmen des Beitrags werden die ersten Ergebnisse aus den Befliegungen der Rutschung vorgestellt. Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung der Genauigkeit der Sensororientierung und der Generierung von 3D-Oberflächenmodellen (DOMs). Zur Genauigkeitsuntersuchung der aus den RPAS-Bilddaten abgeleiteten DOMs stehen 3D-Daten aus klassischem flugzeuggestütztem Laserscanning zur Verfügung, die den Zustand vor der Rutschung dokumentieren. Des Weiteren konnte in einem Teilbereich der Rutschung terrestrisches Laserscanning vorgenommen werden, sodass eine lokale unabhängige Kontrolle der 3D-Punktwolke aus der photogrammetrischen Oberflächenmodellgenerierung erfolgen kann.

1 Einleitung

Aufgabe der Landesvermessung ist u.a. die Erfassung und 3D-Modellierung der Landestopographie. Dazu führt das LGL BW zyklisch Bildflüge mit 20 cm Bodenauflösung bei voller Belaubung gemäß AdV-Standard durch. Für Sonderprojekte wie der Erfassung der gesplitteten Abwassergebühr oder Flurneuerordnungsverfahren werden zusätzliche Frühjahrsbildflüge ohne Belaubung mit Bodenauflösungen von 10 cm oder besser durchgeführt. Mit Abschluss dieser Flüge in 2014 stehen für die gesamte Landesoberfläche solche Bilder zur Verfügung. Aus den Luftbildern werden überwiegend Orthophotos erzeugt. Sie dienen aber auch als orientierte Luftbilder zur Stereodatenerfassung bzw. zur Einrichtung und Aktualisierung von digitalen 3D-Geländemodellen (Digitales Geländemodell DGM, Digitales Oberflächenmodell DOM und Digitales Gebäudemodell LoD2). Laserscannerbefliegungen sind nach der landesweiten Erfassung in den Jahren 2000 – 2005 nur noch bedarfsorientiert und in Kooperation mit anderen Behörden vorgesehen (LGL 2012).

1) Dr.-Ing. Michael Cramer, Prof. Dr.-Ing. Norbert Haala, Universität Stuttgart, Institut für Photogrammetrie (ifp), Geschwister-Scholl-Str. 24D, 70174 Stuttgart, E-mail: michael.cramer@ifp.uni-stuttgart.de; E-mail: norbert.haala@ifp.uni-stuttgart.de

2) Dipl.-Ing. Manfred Gültlinger, Dipl.-Ing. Reinhold Hummel, Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung Baden-Württemberg (LGL), Kriegsstraße 103, 76135 Karlsruhe, E-mail: manfred.gueltlinger@lgl.bwl.de; E-mail: reinhold.hummel@lgl.bwl.de .

Sollen Daten für lokal sehr eingeschränkte Gebiete erfasst werden, so ist dieses in der Regel nur dann wirtschaftlich, wenn mehrere Gebiete zu einem größeren Befliegungsauftrag vereinigt werden können. Dieses gilt sowohl für Laser- als auch Bildflüge. Kurzfristige Veränderungen in der Landestopographie, wie zum Beispiel die hier untersuchte Hangrutschung, können daher unter Umständen nicht zeitnah erfasst werden. Damit bietet sich für derartige Anwendungen die RPAS-gestützte Erfassung an.

Im Rahmen des im Jahr 2012 als gemeinschaftliches Projekt zwischen LGL, dem Institut für Photogrammetrie (ifp) und dem Institut für Flugmechanik und Flugregelung (iFR) der Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik & Geodäsie durchgeführten UAV@LGL-Projekts, wurde erstmals in Deutschland das Potenzial der RPAS-Datenerfassung für Anwendungen in der Landesvermessung am praktischen Beispiel analysiert (CRAMER ET AL. 2013). Die damaligen Befliegungen eines Weinbergs bei Hessigheim fanden im Umfeld eines Flurneuordnungsverfahrens statt – eine weitere mögliche Anwendung für RPAS-gestützte Datenerfassung und Oberflächenmodellierung. In diesem Pilotprojekt wurden zwei verschiedene Starrflügelssysteme mit zwei verschiedenen Digitalkamerasystemen eingesetzt: Der damalige Erstflug im März 2012 wurde mit dem Multiplex Twinstar II Träger und einer Canon IXUS 100 IS Kamera, die nachfolgende zweite Messkampagne im August 2012 dann mit dem Flugzeug Maja der Firma Bormatec und einer Ricoh GXR Mount A12 Kamera mit einem Zeiss Biogon Objektiv durchgeführt. Beide Trägersysteme sind am iFR vorhanden und wurden im Rahmen der Pilotanwendung mit den beiden Kameras erstmals für photogrammetrische Anwendungen eingesetzt. Sie sind in dieser Konfiguration aber nicht als kommerzielle Systeme zu kaufen. Daher sollte im Rahmen des in diesem Beitrag vorgestellten Tests speziell das Potenzial eines kommerziellen RPAS und der entsprechenden Auswertesoftware untersucht werden.

Die Firma senseFly in Lausanne, Schweiz hat die Datenerfassung des Hangrutschungsgebiets mit deren RPA-System eBee vorgenommen. Die Aerotriangulation (AT) erfolgte zunächst mit den Programmen Pix4uav der Firma Pix4D, welches für das senseFly eBee System unter dem Namen Terra3D vertrieben wird, und alternativ mit der Software agisoft PhotoScan. Die Generierung der Oberflächenmodelle erfolgte unter Verwendung der Software SURE (ROTHERMEL ET AL. 2012), die am ifp realisiert wurde. Parallele Auswertungen fanden auch mit den Programmen Pix4D Pix4Dmapper bzw. Trimble UASMaster statt. Neben der Orientierung und Kamerakalibrierung mittels Aerotriangulation wurden von allen Programmen auch alternative Oberflächenmodelle erzeugt. Diese Ergebnisse werden aber nicht in diesem Papier diskutiert. Eine umfassendere Darstellung erfolgt dann im Rahmen des Vortrags auf der Jahrestagung bzw. in einer zu einem späteren Zeitpunkt zu erstellenden weiteren Publikation. Dieser Beitrag ist daher nur als eine Art vorab Statusbericht zu verstehen.

2 Datenerfassung Hangrutschung Talheim

Aufgrund der starken Regenfälle im Frühsommer 2013 ist es Anfang Juni 2013 an fünf verschiedenen Stellen am Albtrauf im Bereich Mössingen-Talheim südlich von Tübingen zu Massenbewegungen gekommen. Bis auf den Hangrutsch in Mössingen-Öschingen, der die dortige Wohnsiedlung Landhaussiedlung in Mitleidenschaft gezogen hat und daher auch in der Presse mehrfach erwähnt wurde, fanden alle weiteren Rutschungen im unbesiedelten Bereich

statt. Das Geografische Institut der Universität Tübingen untersucht, welche Massenverschiebungen sich bei den Rutschungen ergeben haben. Das LGL BW hat in Zusammenarbeit mit dem ifp im Herbst 2013 entschieden, den Hangrutsch Talheim-West (Nordflanke des Buchbergs) mit RPAS zu erfassen und zu modellieren, um Erfahrungen mit einem marktverfügbaren RPAS zu sammeln und die Geobasisdaten für diesen Bereich zeitnah zu aktualisieren. Wie oben bereits dargestellt, sollte dafür das senseFly System eBee zum Einsatz kommen. Aufgrund der dichten Vegetation war die Datenerfassung nur in der vegetationsfreien Periode möglich. Als Flugfenster wurde daher November 2013 vereinbart. Der eigentliche, recht kleinräumige Bereich der Rutschung Talheim-West hat eine Ausdehnung von ca. 700 x 350 m² und erstreckt sich über eine Höhendifferenz von knapp 200 m (siehe Abbildung 1). Es handelt sich um sehr unwegsames, vormals bewaldetes Gelände, sodass auch deswegen eine kurzfristige 3D-Erfassung mittels RPAS praktisch alternativlos ist.



Abb. 1: Hangrutschung Talheim-West (Nordflanke Buchberg) im Sommer 2013. Das Gelände ist Anfang Juni 2013 innerhalb weniger Tage aufgrund von Starkregenereignissen abgerutscht.

Für die späteren Genauigkeitsuntersuchungen steht das Laserscanner-DGM des LGL zur Verfügung. Diese Daten wurden 2002 im Rahmen einer landesweiten Laserscannerbefliegung (Zeitraum 2000 bis 2005) mit einer Punktdichte von ca. 1 Punkt/m² erfasst und später in ein digitales Geländemodell (DGM) mit 1 m Rasterweite überführt (SCHLEYER 2001). Die absolute Genauigkeit des DGMs ist mit wenigen Dezimetern spezifiziert. Die Qualität des DGMs wurde durch 3D-Auswertungen der stereoskopischen Luftbilder der 10cm-Frühjahrsbefliegungen grundsätzlich bestätigt. Da dieses Laser-DGM natürlich nicht die Rutschung umfasst, kann es nur für die unveränderten Geländebereiche als Referenz verwendet werden. Aus der Differenz zwischen Laser-DGM und dem aus der RPAS-Befliegung ermittelten Höhenmodell kann dann später eine Volumenabschätzung der Massenbewegung erfolgen.

Im Randbereich des Projektgebiets befindet sich ein Stollengebäude der Bodenseewasserversorgung (in Abbildung 1 nicht mehr zu sehen) zur Wartung der Fernwasserleitung vom Bodensee zur Trinkwasserversorgung von Stuttgart. Dieses Gebäude wurde parallel zur RPAS-Befliegung vom LGL mit terrestrischem Laserscanning erfasst. Damit

stehen, allerdings nur für diesen kleinen Bereich, Daten zur weiteren (lokalen) Genauigkeitsuntersuchung zur Verfügung.

2.1 senseFly System eBee

Die Schweizer Firma senseFly ist laut Firmeninformation (SENSEFLY 2014) Ende 2009 als Spin-off des „Laboratory of Intelligence Systems“ der EPFL gegründet worden. Seit Sommer 2012 gehört die Firma zur Parrot-Gruppe. Das aktuelle senseFly System eBee ist seit Anfang 2013 verfügbar und zur Zeit eine viel beachtetes unbemanntes Fluggerät für Kartierungsanwendungen. Das eBee System ist sehr kompakt und kann in einem nur kleinen Koffer transportiert werden. Das eigentliche Flugzeug ist ein Delta-Flügler aus leichtem, schaumstoff-ähnlichen Material mit ca. 100 cm Spannweite und einem Gesamtabfluggewicht von nur 700 gr. Das Gewicht spielt für die Aufstiegsgenehmigung eine wichtige Rolle. So gibt es einige Länder (z.B. Dänemark), die für Systeme mit einem Maximalgewicht von unter 1.5 kg einfachere Aufstiegsenehmigungsverfahren haben. Die beiden Flügel können für den Transport entfernt werden. Die maximale Flugzeit mit einer Batterieladung beträgt ca. 45 min, je nach Flugbedingungen. Das Flugzeug wird angetrieben von einem Elektromotor mit Heckschraube, fliegt mit einer mittleren Fluggeschwindigkeit von 36-57km/h (10-16m/s) und kann bei Windgeschwindigkeit von bis zu maximal 45 km/h (12 m/s) eingesetzt werden. Um Vibrationen zum Zeitpunkt der Bilddatenerfassung bestmöglich zu vermeiden, schaltet sich der Antrieb des Flugzeugs kurz vor der Aufnahme automatisch ab. Damit ergibt sich eine wellenförmige Flugbewegung.

Für die Bilddatenerfassung ist eine Canon Kamera integriert, die vom Flugsystem automatisch zu den vorgegebenen Zeiten ausgelöst werden kann. Für den hier vorgestellten Testflug der Hangrutschung Talheim handelte es sich um die Ixus 127 HS Kamera, mit 4608 x 3456 pix bei einer Pixelgröße von $1.34 \times 1.34 \mu\text{m}^2$ (1/2.3 Zoll Sensor). Die minimale Brennweite der Optik beträgt 4.3 mm, die zugehörige maximale Blendenöffnung 1:2.7. Alternativ kann das System auch mit der Canon Powershot S110 Kamera ausgestattet werden. Diese Kamera verwendet einen 1/1.7 Zoll Sensor. Bei 12 Mpix erlaubt dieses eine Pixelgröße von $1.9 \times 1.9 \mu\text{m}^2$. Die Pixelgröße hat einen gewissen Einfluss auf die radiometrische Qualität von digitalen Bildern, dieses wird im folgenden Abschnitt noch diskutiert.

2.2 Photogrammetrischer Bildflug

Der Testflug wurde in Abstimmung aller Beteiligten für Dienstag, 5. November 2013 festgelegt. Das LGL hatte im Vorfeld im Projektgebiet 19 Punkte als luft sichtbare Bodenpunkte signalisiert und die Referenzkoordinaten dieser Punkte mit GPS eingemessen. Diese Punkte wurden im Rahmen der photogrammetrischen Auswertung als Pass- bzw. Kontrollpunkte verwendet.

Die Befliegung sollte in zwei verschiedenen Bodenpixelgrößen (GSD) erfolgen. Neben einem Flug mit GSD 6cm über das gesamte Gebiet, sollte die Befliegung des zentralen Bereichs des Gebiets (eigentliche Rutschung) mit GSD 3cm erfolgen. Um diese GSD-Werte für das gesamte Gebiet einzuhalten, wurde die Höhe der Flugstreifen der jeweiligen Geländehöhe angepasst. Die Bildflugplanung fand erst vor Ort statt (80/80-Überdeckungsverhältnisse), die Flughöhe über Grund wurde auf Basis des Geländemodells, welches der Planungssoftware zur Verfügung stand, automatisch durch die Planungssoftware für jeden Flugstreifen individuell festgelegt. Bei der

späteren Auswertung hat sich gezeigt, dass die realisierte Bodenpixelgröße eher bei 8cm liegt. Gleiches gilt für den zweiten Flug, dessen realisierte GSD bei 4cm und nicht bei den geplanten 3cm liegt. Im Folgenden werden die Blöcke daher mit GSD 8cm bzw. GSD 4cm bezeichnet. Aufgrund der speziellen topografischen Situation erfolgte die Befliegung parallel zum Hang, d.h. orientiert an der Ausrichtung der Abbruchkante des Albtraufs in ca. Ost-West-Richtung.

Die Abbildung 2 zeigt die Situation des GSD 8cm Blocks auf Basis des später erzeugten Orthophotos. Die Rutschung ist im Mittelteil zu erkennen. Insgesamt wurden 312 Bilder aufgenommen, die in ca. 16 Streifen angeordnet sind. Die Befliegung dauerte ca. 35 min, wobei der Flug nach den ersten 88 Bildern unterbrochen werden musste, da die Speicherkarte keine weiteren Bilder mehr aufgezeichnet hat. Dieses wurde aber zuverlässig vom System gemeldet, sodass nach Einsetzen einer leeren Speicherkarte die Befliegung fortgesetzt werden konnte.

Im Anschluss fand die Befliegung aus der niedrigeren Flughöhe statt. Der GSD 4cm Block besteht aus insgesamt 479 Bildern, die aufgrund der benötigten Flugdauer (Flug 1: 22 min, 274 Bilder und Flug 2: 20 min, 205 Bilder) in zwei Teilblöcken geflogen werden mussten. Die Auswertung dieser Bilder wird im weiteren Verlauf des Beitrags nicht mehr berücksichtigt.

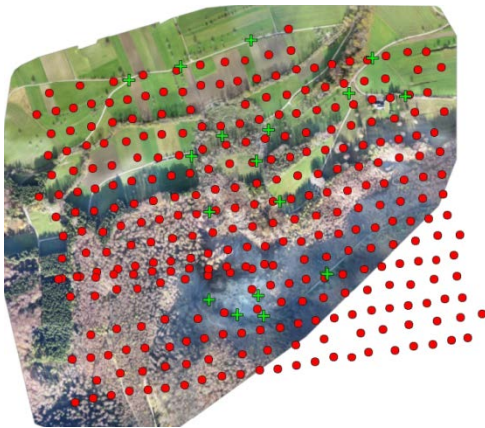


Abb. 2: Bildflugübersicht Talheim-West (GSD 8cm, Auszug Terra3D Report) mit unterlegtem Orthophoto. Die jeweiligen Projektionszentren aller Bilder sind als Punkte markiert; die Kreuze zeigen die Lage der Passpunkte.

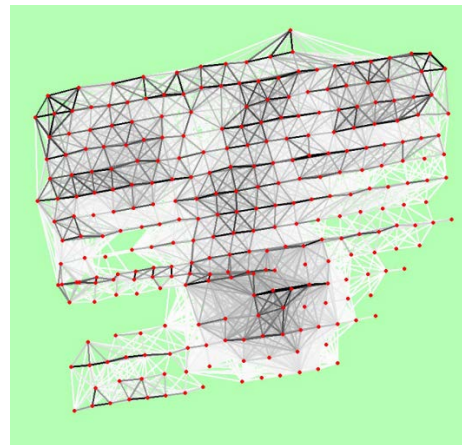


Abb. 3: Blockverknüpfung Talheim-West (GSD 8cm, Auszug Terra3D Report). Die einzelnen Verbindungen symbolisieren die Verknüpfung der Bilder (Punkte). Je heller umso weniger stark ist die Verknüpfung. Nur die orientierten Bilder sind Bestandteil des Blocks.

Für die Befliegung war ein Systemoperator der Firma senseFly persönlich vor Ort und hat die Konfiguration des Systems, die Planung und den Flug durchgeführt. Die Kamera war während der Befliegung auf Automatikmodus eingestellt. Der Himmel am Flugtag war praktisch wolkenfrei und die Bilder wurden um die Mittagszeit (Zeitfenster ca. 12 – 14 Uhr) erfasst. Damit konnte ein maximaler Sonnenstand gewährleistet werden, der für den Flugtag und den Ort bei 26 Grad über Horizont liegt. Die eigentliche Rutschung liegt in Richtung Norden exponiert und wurde wegen der starken Hangneigung von der Sonne nicht bestrahlt. Das führte dazu, dass es im Gebiet sehr helle sonnenbestrahlte und sehr dunkle Schattenbereiche gab, die zu großen Kontrastunterschieden in den Bildern führten. In Teilbereichen der Bilder kam es daher zu

Überbelichtungen. Dieses tritt in sonnenbestrahlten Bereichen vor allem dann auf, wenn der überwiegende Teil des Bildes im Schattenbereich liegt und die Kameraautomatik die Belichtung auf diese Beleuchtungsverhältnisse eingestellt hat. Die schlechtere Radiometrie in den überstrahlten Bereichen wirkt sich negativ auf die spätere automatische Bildmessung aus.

Die Kamera nimmt die Bilder im Automatikmodus auf, d.h. je nach Beleuchtungsverhältnissen wird die Belichtungszeit und ggf. die Empfindlichkeit angepasst. Die minimale Belichtungszeit liegt bei 1/500 sek, die maximale Belichtungszeit, die bei dieser Befliegung aufgetreten ist, bei 1/200 sek. Für die überwiegend verschatteten Bereiche des Hangs wurden die Bilder bei einer Empfindlichkeit von ISO 400 und eher längeren Belichtungszeiten aufgenommen. Für die sonnenbeschienenen Bereiche wurde von der Kamera dann die kürzeste Belichtungszeit und eine niedrigere ISO Zahl eingestellt. Die Blende war für alle Aufnahmen auf maximale Öffnung eingestellt, auch um dem niedrigen Sonnenstand Rechnung zu tragen. Dieses verursacht zu einem gewissen Teil aber auch Bildunschärfen, vor allem in den Ecken der Bilder.

Die RPAS-Datenerfassung fand unter relativ rauen Flugbedingungen statt. Die Windverhältnisse am Flugtag waren laut Wetterprognose wie folgt: mäßiger Wind mit starken Böen (bis zu 50 km/h). Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben sind diese Windgeschwindigkeiten bereits oberhalb des für das eBee-System spezifizierten Einsatzbereichs. Dieses wurde während des Flugs auch mehrfach als Warnmeldung an der Bodenstation angezeigt. Der Flug wurde aber dennoch durchgeführt, da im November auf absehbare Zeit kein von der Wetterprognose her besserer Alternativtermin abzusehen war und der Systemoperator von senseFly vor Ort anwesend war.

Die Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Änderung des Pitch- (oder Nick-) Winkels für einen kurzen Ausschnitt des GSD 8cm Flugs im Vergleich zu einer anderen Befliegung, die unter „normalen“ Flugbedingungen durchgeführt wurde. Deutlich sind im oberen Teil der Abbildung die Auf- und Abwärtsbewegungen während der Bildaufnahme zu sehen, hervorgerufen durch das Abschalten des Motors. Die Bildaufnahme erfolgte ca. im Abstand von 5 sek. Die Abweichung aus der Normallage im Nicken erreicht maximale Werte von bis zu 60 deg. Dieses ist für normale Flugbedingungen deutlich anders, wie der zweite Teil der Grafik zeigt. Auch hier ist am Anfang noch die wellenförmige Bewegung für eine Auslösung zu sehen, ansonsten treten aber kaum starke Abweichungen aus der Normallage auf. Die Abweichungen bleiben deutlich unter 20 deg.

Die starke Dynamik während der Talheim-Befliegungen wirkt sich auf die Bildaufnahme aus. So konnten nicht überall die geplanten 80% Längs- und 80% Querüberdeckung eingehalten werden. Bereits Abbildung 2 zeigt, dass die Auslösung der Bilder in den jeweiligen Streifen mit leicht unterschiedlichen Basislängen erfolgte und zum Teil auch Bilder fehlen. Eine gewisse Unschärfe in einigen Bildern kommt auch aus den starken Rotationsänderungen während der Bildaufnahme.

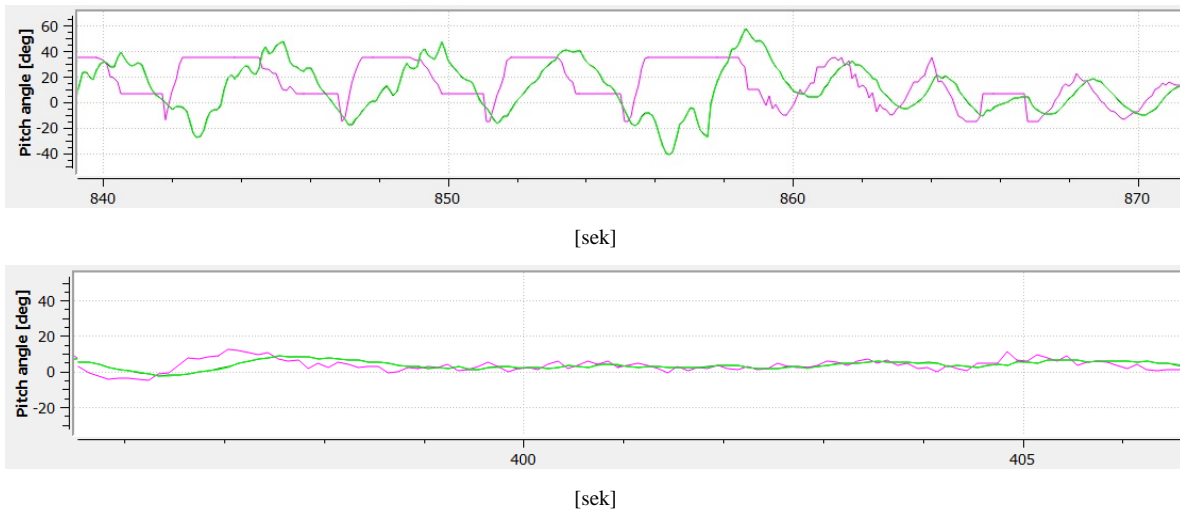


Abb. 4: Dynamik (hier Änderung des Pitch/Nick-Winkels) während eines kurzen Intervalls von Befliegungen mit dem eBee System (Quelle: senseFly). Die obere Grafik zeigt einen Ausschnitt aus der GSD 8cm Befliegung in Talheim, der untere zum Vergleich die Dynamik während eines „Standardflugs“ unter normalen Windbedingungen. Die grüne Kurve zeigt die tatsächliche Flugbewegung, die lila Kurve die Steuerbefehle des Servos. Die unterschiedlichen Skalierungen auf beiden Achsen sind zu beachten.

2.3 Aerotriangulation und Kamerakalibrierung

Die Aerotriangulation mit gleichzeitiger Bestimmung der Kamerakalibrierung erfolgte parallel mit den beiden Softwarepaketen Terra3D (Pix4uav) und PhotoScan. Da die manuellen Messungen der Passpunkte nicht direkt zwischen den Programmen ausgetauscht werden können, wurden die Passpunkte in beiden Programm separat gemessen. Damit verwenden beide ATs geringfügig andere Beobachtungen für die Berechnung der Unbekannten. Die beiden Programme sind im Bereich der RPAS-Datenauswertung etabliert und vielen Anwendern bekannt. Sie basieren auf dem Structure-from-Motion (SfM) Ansatz (SNAVELY ET AL. 2008), sind also in der Lage beliebige Bildverbände zu orientieren. Ein wesentlicher Bestandteil der Bildorientierung ist die gleichzeitige Kalibrierung der Kamera. Beide Programme verwenden das Brown'sche Parametermodell zur Kamerakalibrierung, wobei neben den Parametern der Inneren Orientierung (Kamerakonstante, Bildhauptpunktlage in x, y), drei Parameter für die radiale und weitere zwei Parameter für die tangentielle Verzeichnung bestimmt werden. Die Tabelle 1 zeigt die geschätzten Parameter aus beiden Programmen. Der Vergleich der Zahlenwerte zeigt eine recht gute Übereinstimmung der Kalibrierparameter, in der Bildhauptpunktlage in y -Richtung gibt es einen Unterschied von ca. 7 pix. Der reine Vergleich der Parameter ist aber nicht durchgreifend, da auch aufgrund von Korrelationen mit anderen Größen diese Zahlenwerte gar nicht direkt vergleichbar sind. Aussagekräftiger ist die Untersuchung, wie sich die Kalibrierparameter letztendlich in der Gesamtgenauigkeit der Ausgleichung auswirken. Durchgreifende Kontrolle ist z.B. der Vergleich an unabhängigen Kontrollpunkten.

Tab. 1: Resultate der Kamerakalibrierung für den GSD 8cm Block.

Kalibrierparameter	Pix4D/senseFly Terra3D	agisoft PhotoScan
c [pix]	3251.60	3250.37
x_0 [pix]	2295.74	2294.54
y_0 [pix]	1787.31	1794.73
Radial K1	-0.051882	-0.0518587
Radial K2	0.052339	0.0513124
Radial K3	-0.027080	-0.025766
Tangential P1	0.00421372	0.00441309
Tangential P2	-0.00017116	0.00004492



Abb. 5: Signalisierte Punkte in den GSD 8cm Bildern (Auszug aus Terra3D Report). Im linken Teil ist exemplarisch Punkt 3 im sonnenbestrahlten Teil des Geländes, im rechten Teil Punkt 19 im schattigen Hangbereich gezeigt. Es handelt sich jeweils um Ausschnitte aus 9 verschiedenen Bildern. Aufgrund der hohen Überdeckung können die signalisierten Punkte in bis zu max. 36 überlappenden Bildern gemessen werden. Die Unschärfen in einigen Bildern sind zu erkennen.

Im Rahmen der Auswertungen standen insgesamt 19 signalisierte und koordinatenmäßig bekannte Geländepunkte zur Verfügung, die im Vorfeld der Befliegung signalisiert und mit satellitengestützten Messverfahren (GNSS-Messungen) koordiniert wurden (siehe Abschnitt 2.2). Vier dieser Punkte wurden als Kontrollpunkte verwendet, um die absolute Genauigkeit der 3D-Objektpunktbestimmung abschätzen zu können. Für die Auswertungen mit PhotoScan werden die Differenzen an Kontrollpunkten jedoch nicht gesondert ausgegeben. Dieses ist aber Bestandteil des Pix4D Programms: Die mittlere Abweichung zu den GNSS-Referenzkoordinaten, also die Genauigkeit der 3D-Neupunktbestimmung, liegt bei ca. 5 cm in Ost- und Nordrichtung, und bei ca. 30 cm in der Vertikalkomponente. In der Abbildung 5 sind exemplarisch zwei der in den Auswertungen als Kontrollpunkte verwendeten Punkte gezeigt. Der Punkt Nr. 3 konnte in 32 Bildern, der Punkt 19 in 24 Bildern gemessen werden. Man erkennt in einigen Bildern die Unschärfe aufgrund der Flugdynamik, welche auch die Messgenauigkeit

beeinträchtigt. Die Differenzen an den vier gewählten Kontrollpunkten erlauben eine erste Einschätzung der absoluten Genauigkeit. Die Statistik ist aber nur eingeschränkt aussagekräftig; aufgrund der Anzahl und Lage der signalisierten Punkte kann die Anzahl der Kontrollpunkte aber nicht deutlich erhöht werden, da dieses im gleichen Zug eine Reduzierung der Passpunkte verursacht. Die durchgreifende Kontrolle der absoluten Genauigkeit wird daher erst durch den Vergleich der abgeleiteten Höhenmodelle mit einem Referenzhöhenmodell möglich, was im nachfolgenden Abschnitt präsentiert werden soll.

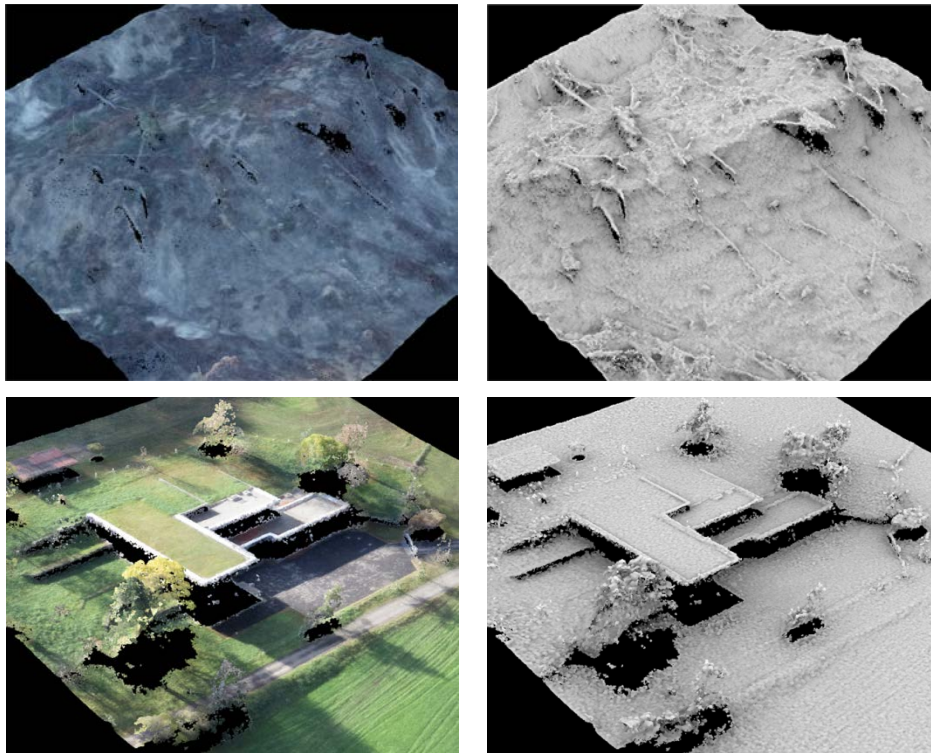


Abb. 6: Ausschnitte aus dem SURE-Oberflächenmodell (Gitterweite 8cm), basierend auf der Orientierung aus PhotoScan. Der obere Teil zeigt einen Ausschnitt aus dem Schattenbereich der Rutschung. Unten ist das Stollengebäude der Bodenseewasserversorgung zu sehen. Der kolorierten Punktwolke (links) ist jeweils eine schattierte Darstellung (rechts) gegenübergestellt.

3 Genauigkeitsuntersuchung der Höhenmodelle

Für die Erzeugung dichter 3D-Punktwolken und Oberflächenmodelle wird in der Photogrammetrie aktuell oftmals ein Ansatz basierend auf dem Semi-Global Matching Verfahren von HIRSCHMÜLLER (2008) genutzt. Dieses Verfahren führt eine Stereozuordnung für jedes einzelne Pixel durch und ermöglicht für sich stark überlappenden Bildverbände eine kombinierte pixelweise Zuordnung mehrerer sich überdeckender Stereobildpaare. Die Oberflächenmodellgenerierung aus den GSD 8cm Bildern wurde mit dem am Institut für Photogrammetrie entwickelten Programmsystem SURE (ROTHERMEL ET AL. 2012; HAALA & ROTHERMEL 2012) durchgeführt. Das Programm SURE verwendet die Ergebnisse der Aerotriangulation mit Terra3D bzw. PhotoScan. Anhand der Orientierung und Kalibrierung der

Kamera können vorentzerrten Bilder gerechnet werden, die Ausgangsdaten für die Oberflächenmodellgenerierung sind. Da zwei unabhängige Orientierungen verwendet werden, unterscheiden sich auch die abgeleiteten DOMs. Somit lassen die Unterschiede in den DOMs auch Rückschlüsse auf die Unterschiede in der Orientierung und Kamerakalibrierung zu, vor allem wenn Vergleiche zu einem Referenzhöhenmodell möglich sind. Dieses soll in diesem Abschnitt diskutiert werden.

Die Abbildung 6 zeigt exemplarisch zwei kleinere ca. 100 x 100 m² große Ausschnitte aus dem SURE-DOM, jeweils als kolorierte Punktwolke bzw. als Schattierung. Verwendet wurde hier die Orientierung aus PhotoScan. Die Punktwolke wurde auf ein regelmäßiges Raster mit einer Gitterweite von 8 cm (entsprechend der GSD) interpoliert. Die Abbildung zeigt, dass auch bei einer offensichtlich schlechten radiometrischen Qualität im Schattenbereich der Rutschung, eine detaillierte Punktwolke abgeleitet werden kann. Die einzelnen umgestürzten Baumstämme sind in der Punktwolke deutlich zu erkennen. Gleiches gilt für die Kanten des Gebäudes, die sich gut in der Punktwolke abzeichnen, obwohl die originalen Bilder gerade an diesen Gebäudekanten aufgrund der sehr hellen Betonoberfläche Überstrahlungen aufweisen.

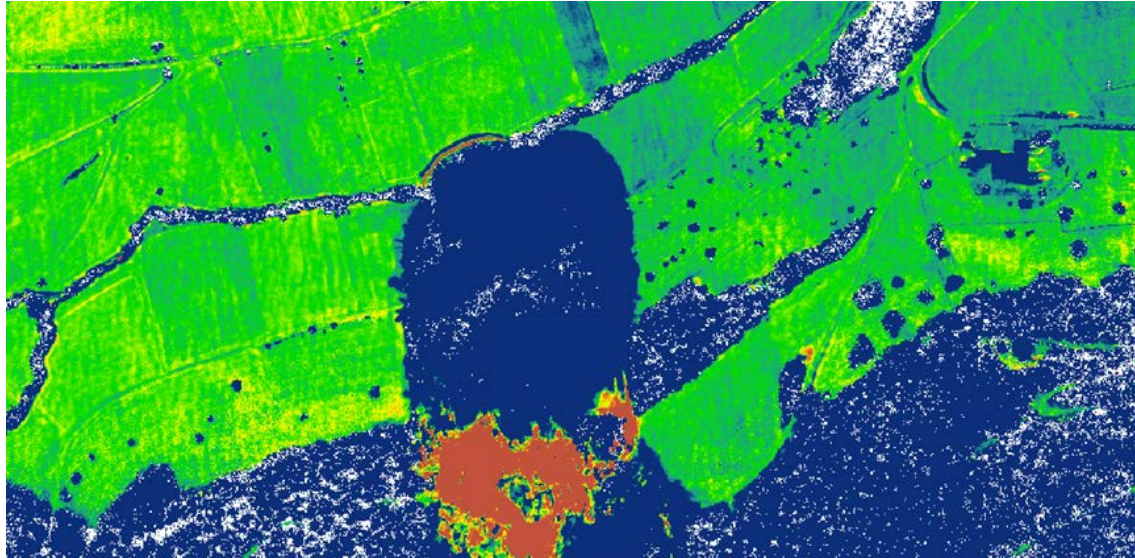
Die Vergleiche mit dem Referenzgeländemodell aus der Laserscannerbefliegung des Landes Baden-Württemberg sind in der Abbildung 7 zu sehen, dabei ist zu beachten, dass die Differenzen zwischen einem Geländemodell und dem aktuellen Oberflächenmodell berechnet werden. Damit ergeben sich zwangsläufig Differenzen bei Vegetation und Gebäuden, die nicht im Geländemodell enthalten sind. Die Erdmassenverschiebung durch die Hangrutschung ist natürlich auch nicht Bestandteil des Laser-DGMs, welches bereits 2002 erfasst wurde. Die großen Differenzen treten daher zunächst im Bereich der Rutschung auf, die sich wie eine Zunge im Differenzenbild abzeichnet. Im südlichen Bereich der Rutschung erkennt man den Massenabtrag, der dann in der Zunge (Bildmitte) wieder angehäuft wird. Ansonsten zeichnet sich die dichte Bewaldung sehr gut im Differenzenbild ab. Am östlichen Rand des Gebiets ist das Gebäude der Bodenseewasserversorgung zu erkennen.

Zur Beurteilung der Qualität der Geländemodellgenerierung und damit auch der Qualität der Orientierung und Kamerakalibrierung sind vor allem die Differenzen in den freien Flächen, die nicht von der Rutschung beeinträchtigt wurden, zu analysieren. Die Farbkodierung weist im zentralen, von Passpunkten kontrollierten Bereich Differenzen im Bereich von -10 cm – +20 cm aus. Teilweise lässt sich in der Differenz auch die Vegetation (Feldbewuchs) erkennen. Die Differenzen sind ansonsten für den mittleren Bereich sehr homogen und liegen im Genauigkeitsbereich von ca. ± 10 cm, was der Genauigkeit des Laser-DGMs entspricht. Im Rahmen des EuroSDR Dense Matching Projekts, welches die Genauigkeit der Oberflächenmodellgenerierung für Luftbilder großformatiger photogrammetrischer Kameras untersucht, wird die Genauigkeit mit annähernd 1 x GSD in der Höhe angegeben, was ebenfalls gut mit dem hier ermittelten Wert korrespondiert (HAALA 2013).

Wenn man in die Randbereiche des Differenzbildes geht, sieht man gewisse Unterschiede zwischen dem auf der PhotoScan-Orientierung basierenden SURE-DOM und dem auf der Terra3D-Orientierung basierenden. Am westlichen bzw. östlichen Rand des hier gezeigten Ausschnitts erkennt man ein deutliches Abfallen des Terra3D-SURE-DOMs unter die DGM-Referenzfläche. In diesen Bereichen treten Differenzen $\Delta < -30$ cm auf. Dieses kann dahingehend interpretiert werden, dass die Terra3D-Orientierung offensichtlich vor allem in den außerhalb des

unmittelbaren Passpunktrahmens liegenden Bereichen weniger stabil zu sein scheint. Die Verteilung der Passpunkte wurde ja bereits in Abbildung 2 angedeutet.

PhotoScan-SURE-DOM – Laser-DGM



Terra3D-SURE-DOM – Laser-DGM

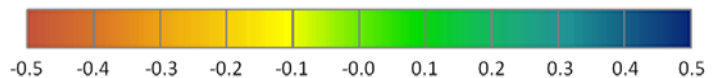
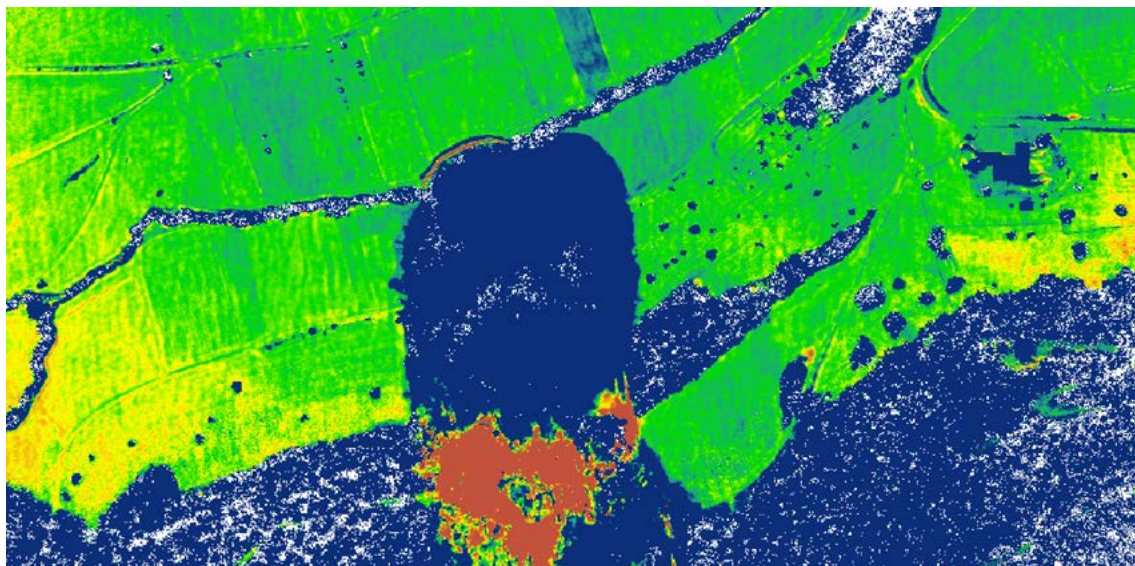
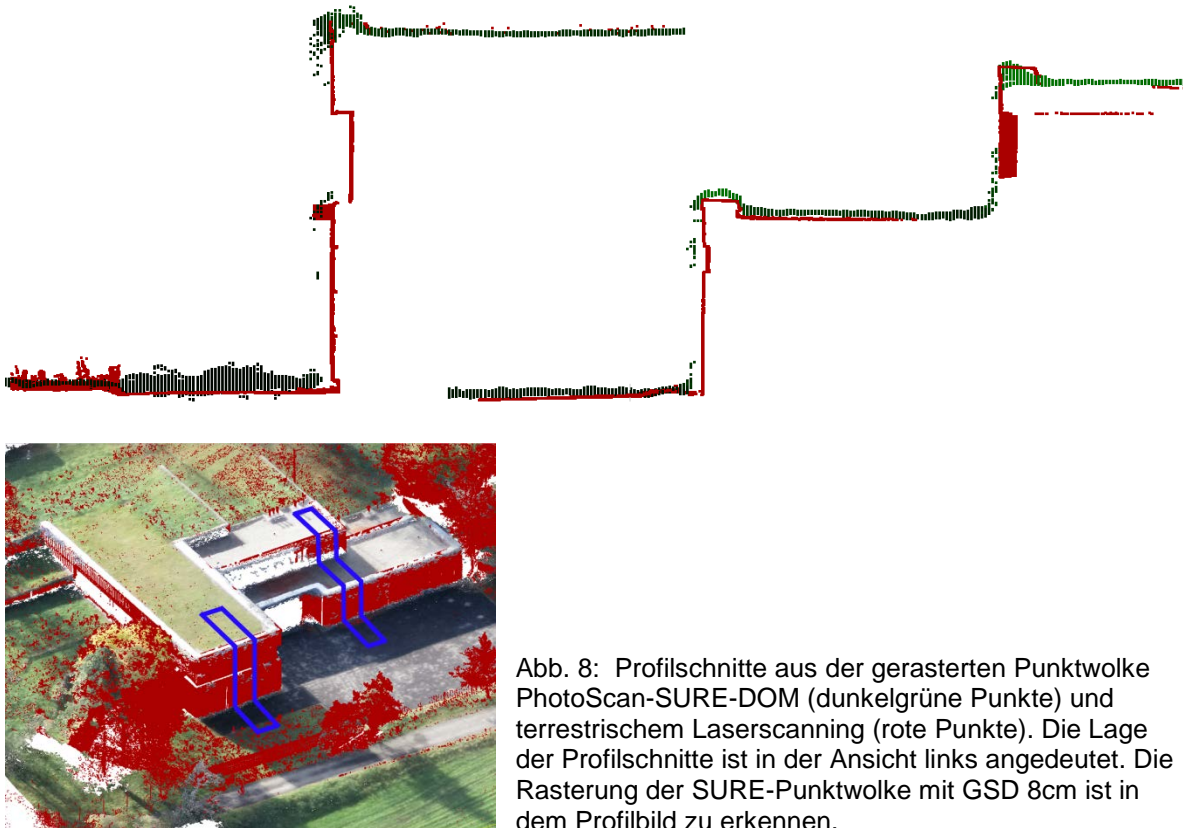


Abb. 7: Vergleich der beiden SURE-DOMs mit dem Referenz-DGM aus der Laserscannerbefliegung 2002. Die Farbkodierung der gezeigten Differenzen Δ ist wie folgt: Braunrot: $\Delta < -0.5\text{m}$ (Laser-DGM über SURE-DOM), Blau: $\Delta > 0.5\text{m}$ (Laser-DGM unter SURE-DOM)

Tab. 2: Analyse der interpolierten DOM-Vertikaldifferenzen an den 19 sign. Referenzpunkten

	Terra3D-SURE-DOM	PhotoScan-SURE-DOM
Mittelwert [m]	0.036	0.082
Std.Abw. [m]	0.034	0.060
RMS [m]	0.050	0.102
Max. Abw. [m] @ Punkt	0.102 @ Pkt. 16	0.147 @ Pkt. 3

Um die Genauigkeit der Oberflächenmodelle auch in Zahlenwerte zu fassen, wurden für die bekannten Referenzpunkte die korrespondierenden Höhen aus den beiden SURE-DOMs interpoliert und die Differenzen statistisch ausgewertet. Die Tabelle 2 zeigt die ermittelten statistischen Kenngrößen bzw. Genauigkeiten. Natürlich dürfen diese Werte nicht in die Fläche verallgemeinert werden; zumal die signalisierten Punkte ja fast alle bereits als Passpunkte in der Auswertung mit Terra3D und PhotoScan benutzt wurden. Dennoch passen die Werte recht gut zu den bereits zuvor getroffenen Aussagen. Der geschätzte Mittelwert ist in beiden Fällen positiv, was bestätigt, dass das DGM unter der aus SURE geschätzten Oberfläche liegt. Die Standardabweichung aus den 19 Vertikaldifferenzen liegt für das Terra3D-SURE-DOM bei ca. 3.5 cm, für das PhotoScan-SURE-DOM bei ca. 6 cm. Demnach scheint die auf der Terra3D-Orientierung basierende SURE-Oberflächenberechnung für die Referenzpunkte leicht bessere Ergebnisse zu liefern. Die erzielten Genauigkeiten sind deutlich besser als die Genauigkeit der Einzelpunktbestimmung aus der AT (siehe Abschnitt 2.3), was an der automatischen Punktzuordnung beim Dense Matching liegt. Zudem zeigt sich der Einfluss der Medianfilterung, wenn für jede DOM-Gittermasche die Höhe aus den beteiligten Stereomodellen gemittelt wird. Abschließend soll für den kleinen Bereich des Stollengebäudes der Bodenseewasserversorgung (siehe Abbildung 6) die SURE-Punktwolke basierend auf der PhotoScan Orientierung mit der terrestrisch erfassten Laserpunktwolke verglichen werden. Die Abbildung zeigt zwei Profilschnitte, die über die Dachflächen bzw. Gebäudedachkanten hinweg gelegt wurden. Die Rasterung der SURE-Punktwolke (GSD 8cm) ist im Profil deutlich zu erkennen. Im Bereich der Dachflächen passen beide Punktwolken sehr gut überein. Das Rauschen liegt im Bereich von 1 x GSD, dabei ist zu beachten, dass es sich um begrünte Dachflächen handelt. Im Bereich der Dachkante kommt es zu größeren maximalen Abweichungen bis zu 3 x GSD. Dieses tritt vor allem an der oberen Dachkante auf. Bei den anderen Dachkanten sind die maximalen Abweichungen nur 2 x GSD groß. Im sehr dunklen Schattenbereich vor dem Gebäude ist vor allem im linken Profil ein größeres Rauschen in der Punktwolke zu erkennen. Dieses ist für alle Bereiche, in denen wenig Radiometrie vorhanden ist, zu erwarten, daher auch die größeren Abweichungen an den Dachkanten, die aufgrund des hellen Betons im Bild überstrahlt werden. Dieses wird an den Dachkanten z.T. mit einer Glättung der Kanten überlagert.



4 Zusammenfassung

Das hier präsentierte Projekt ist eine logische Fortsetzung der in 2012 durchgeführten Pilotanwendungen zur Verwendung von RPAS im Umfeld der Landesvermessung. Obwohl der Testflug unter nicht optimalen Bedingungen durchgeführt wurde, erfüllen die erzielten Ergebnisse die Anforderungen der Landesvermessung. Die photogrammetrisch durch Dense Matching abgeleitete Punktwolke kann zur Fortschreibung des bisherigen Geländemodells aus Laserscanning benutzt werden, sofern zuvor das Oberflächenmodell durch geeignete Filterung in das Geländemodell überführt wird.

Der Test wurde mit rein kommerziellen Systemen durchgeführt. Dieses betrifft sowohl die Datenerfassung mit dem senseFly System eBee als auch die spätere Auswertung mit den verschiedenen Softwarepaketen. Die Technologie ist in der Praxis angekommen. Beeindruckend ist vor allen Dingen der hohe Automatisierungsgrad, mit dem der eBee Flug durchgeführt werden konnte. Der Steurer wird jederzeit über den Systemzustand informiert und kann quasi auf Vorschlag des Systems per Knopfdruck bestimmte vorprogrammierte Szenarien abrufen, um in geeigneter Weise auf die aktuellen Flugbedingungen zu reagieren.

Im hier diskutierten Beitrag konnte nur ein Teil der Auswertungen vorgestellt werden. Die Ergebnisse haben aber gezeigt, dass RPAS eine sehr sinnvolle Ergänzung zu den klassischen Methoden der Datenerfassung mit bemannten Flugzeugen und großformatigen Sensorsystemen darstellen. Diese gilt vor allem dann, wenn die sehr kurzfristige, zeitnahe Befliegung gewünscht

wird und es keine weiteren Projekte gibt, die sich zu einem größeren Auftrag bündeln lassen. Sollte jedoch eine solche Bündelung mit anderen Aufträgen möglich sein, hat die bemannte Befliegung dennoch ihre weitere Berechtigung auch aus Kostengesichtspunkten.

Klar ist, dass die RPAS-Technologie zukünftig in die Produktionsprozesse der Landesvermessung einzubinden ist. Da diese Art der Datenerfassung bei der Aktualisierung Landestopographie zunehmend an Bedeutung gewinnen wird, muss die Landesvermessung über die technologischen und personellen Fähigkeiten zur Prozessierung von RPAS-Daten verfügen. Ob sich das LGL dazu eigene Systeme beschafft, oder die RPAS-Befliegungen als Dienstleistung extern einkaufen wird, ist auch unter wirtschaftlichen Abwägungen zu entscheiden.

Die Problematik der Erteilung der Aufstiegsgenehmigung für die RPAS-Befliegung wurde in diesem Beitrag nicht gesondert behandelt. Im Vergleich zur Pilotanwendung in 2012 konnte die Aufstiegsgenehmigung aber deutlich schneller erteilt werden. Das zeigt, dass auch die Genehmigungsbehörden über zunehmende Erfahrung mit dieser Technologie verfügen. Die Beantragung von Aufstiegserlaubnissen wird mehr und mehr zu einem Standardprozess, der durch entsprechende vereinheitlichte Antragsformulare und Bescheide weiter vereinfacht wird. Die zunehmende länderübergreifende Harmonisierung der RPAS-Flugregularien seitens der EU wird sich ebenfalls positiv darauf auswirken.

5 Danksagung

Unser besonderer Dank gilt der Firma senseFly, Lausanne, die ihr System und einen technischen Mitarbeiter für diesen Test quasi selbstverständlich zur Verfügung gestellt hat. Diese Studie wurde vom LGL Baden-Württemberg finanziert und tatkräftig unterstützt. Dafür unser herzlicher Dank.

6 Literaturverzeichnis

- CRAMER, M., HAALA, N., ROTHERMEL, M., LEINSS, B. & FRITSCH, D., 2013a: UAV-gestützte Datenerfassung für Anwendungen der Landesvermessung – das Hessigheim-Projekt. – 33. DGPF-Jahrestagung, 3-Ländertagung : 450–469, Freiburg.
- HAALA, N. (2013): The Landscape of Dense Image Matching Algorithms, in Fritsch (Ed.): Photogrammetric Week '13, Wichmann Verlag, Berlin, S. 271-284.
- HAALA, N. & ROTHERMEL, M. (2012): Dense Multi-Stereo Matching for High Quality Digital Elevation Models in PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, Jahrgang 2012 Heft 4 (2012), p. 331-343.
- HIRSCHMÜLLER, H. (2008): Stereo Processing by Semi-Global Matching and Mutual Information. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, **30** (2), pp. 328 - 341.
- LGL (2012): Projektbeschreibung UAV@LGL-Projekt, internes Papier, 2012.
- SCHLEYER, A. (2001): Das Laserscan-DGM von Baden-Württemberg, in Fritsch/Spiller (Eds.): Photogrammetric Week '01, Wichmann Verlag, Heidelberg, S. 217-225.

SENSEFLY (2014): Produktinformationen, <https://www.sensefly.com/> (06.02.2014).

SNAVELY, N., SEITZ, S. & SZELISKI, R., 2008: Modeling the World from Internet Photo Collections. – *International Journal of Computer Vision* **80** (2): 189–210.

ROTHERMEL, M., WENZEL, K., FRITSCH, D. & HAALA, N. (2012): SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery Proceedings LC3D Workshop, Berlin, Dezember 2012.