

# Eignung von ALS, Aero- und UAS-Photogrammetrie zur Früherkennung und Erfassung von Tagesbrüchen

VOLKER SPRECKELS<sup>1</sup>, ANDREAS SCHLIENKAMP<sup>1</sup>, ANSGAR GREIWE<sup>2</sup> & LARS EBERHARDT<sup>3</sup>

*Zusammenfassung: Im Verantwortungsbereich der RAG Aktiengesellschaft (RAG) liegen ca. 4.000 bekannte oberflächennahe Schächte und Tagesöffnungen (S&T) im südlichen Ruhrgebiet, die regelmäßig in Augenschein genommen werden. Der Steinkohlenabbau erfolgte zum Teil schon vor mehreren Jahrhunderten, so dass es zu Tagesbrüchen an der Erdoberfläche kommen kann. Tagesbrüche fallen nicht immer spontan, die Ereignisse kündigen sich gegebenenfalls durch Absacken der Füllsäule oder als Muldenbildung an. Die S&T haben Durchmesser um einen Meter und größer. Die Überwachung erfolgt derzeit durch regelmäßige Begehungen der bekannten Orte. Für eine großflächige Erfassung testet RAG seit Ende 2013 fernerkundliche Verfahren zur Detektion von Verdachtsbereichen. Die zentrale Frage ist: Welche Geländeänderungen (Mulden) können in welcher Genauigkeit mit welchem Sensor auf welchem Untergrund zu welcher Jahreszeit erfasst werden? Als Grundlage dienen jährliche großflächige Bildflüge mit Vexcel UltraCamX (UCX) und UltraCam Falcon (UCF) bei ca. 3 cm Ground Sample Distance (GSD), in 2015 erstmals simultan mit Airborne Laserscanning (ALS) bei ca. 20 Punkten/m<sup>2</sup> befliegen. Weiterhin werden spezielle Verdachts- und Überwachungsgebiete halbjährlich mit UAS bei 1 bis 3 cm GSD erfasst. Alle Befliegungsdaten werden mit denselben Passpunkten verknüpft, die mit festen Transformationsparametern über Echtzeit-GPS in das SAPOS-Netz der Landesvermessungsverwaltung NRW eingebunden werden. Entscheidend zur Erreichung vergleichbarer Genauigkeiten sind die Wahl der GNSS-Antenne und die Wahl des bildgebenden Sensors. Lagefehler der ALS-Steifen wurden über stereo-photogrammetrische Messungen kompensiert. Zur Untersuchung der Sensoren über die unterschiedlichen Befliegungszeiten seit 2013 wurden spezielle Referenzflächen auf unterschiedlichen Untergründen festgelegt (Asphalt, Pflaster, Dachflächen, Wiese). Der in einem FME-Workflow automatisierte multitemporale Ansatz ermittelt in der 1. Stufe über jede Referenzfläche für jeden Zeitstempel in der 3D-Punktwolke die aktuelle Rauigkeit und Bewegtheit. In der 2. Stufe erfolgt die Differenzenbildung für einen fest gebufferten Bereich um jeden bekannten S&T aus dem GIS der RAG herum, unter Berücksichtigung der in Stufe 1 ermittelten Bewertungsparameter. Es wird für jeden S&T ein Report für Außendienstmitarbeiter generiert, die anhand dieser Informationen Begehungen priorisieren und optimieren können. Zukünftig soll dieser Workflow um eine Zeitreihenanalyse für bekannte Schächte und um eine grid-basierte Suche zur Detektion von undokumentierten Verdachtsbereichen erweitert werden.*

## 1 Einleitung

Im Schacht-Informationssystem der RAG sind derzeit über 5.000 Schächte und Tagesöffnungen (S&T) für das Ruhrgebiet enthalten (HAGER et al. 2014). Davon liegt die Mehrheit von etwa 4.000

---

<sup>1</sup> RAG Aktiengesellschaft, D-44623 Herne, E-Mail [volker.spreckels, andreas.schlienkamp]@rag.de

<sup>2</sup> Frankfurt University of Applied Sciences, Labor für Photogrammetrie und Fernerkundung, Nibelungenplatz 1, D-60318 Frankfurt am Main, E-Mail ansgar.greiwe@fb1.fra-uas.de

<sup>3</sup> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Fakultät Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, Akademiestraße 6, D- 09599 Freiberg, Lars\_Eberhardt2066@web.de

S&T im südlichen Ruhrgebiet, wo vor mehr als 300 Jahren der Steinkohlenbergbau oberflächennah begann. Die S&T liegen über das gesamte Gebiet verteilt und haben je nach Art und Weise des technischen Stands der Förderung unterschiedlichste Ausprägungen: von den im Süden an der Tagesoberfläche austreichenden Flözen mit Pingen und Stollenmundlöchern bis zum Tiefbauschacht mit Teufen von 1.500 m im nördlichen Ruhrgebiet. Die nicht mehr benötigten S&T wurden nach den jeweils zur Zeit der Ausführung vorherrschenden Möglichkeiten verfüllt. Bedingt z.B. durch die mit der Zeit einhergehende Kompaktion des Füllmaterials, Auswaschung, Erosion etc. kann es zu Sackungen der Füllsäule oder dem Zusammenbruch von Hohlräumen kommen, was sich an der Tagesoberfläche in Form von Mulden bis hin zu Tagesbrüchen zeigen kann (Abb. 1).



Abb. 1: Tagesbruch auf einer Weide (links) und einer Hauszufahrt (rechts)

Abbildung 2 zeigt eine Zeitfolge von Luftbildern für die Kleinzeche Meckel, deren Schächte 1926 verfüllt wurden, und für die in den 1950er Jahren eine möglicherweise erneut aufgenommene Steinkohlenförderung sowie im Jahr 2009 ein Tagesbruch erkennbar ist:



Abb. 2: Zeitfolge von Orthophotos 1926, 1952, 1969, 1998, 2006, 2009 und 2015, mit einem 2009 gefallenen und sanierten Tagesbruch. Quelle: <http://luftbilder.geoportal.ruhr/>

Aus Gründen der Gefahrenabwehr werden bei RAG die bekannten Tagesöffnungen nach einem zertifizierten Monitoringsystem regelmäßig überwacht, in der Regel mindestens ein Mal jährlich. Das geschieht bislang durch in Augenscheinnahme vor Ort. Daher ist das derzeitige Verfahren sehr zeit-, personal- und folglich kostenintensiv. Eine Reduzierung dieses Aufwandes ist aus betrieblichen Gründen umzusetzen. Die S&T liegen in Wäldern, auf Wiesen, Weiden, Äckern, Privatgrundstücken, zu denen Zugang möglich sein und gewährt werden muss. Oftmals ist es durch die Topographie und dem Bewuchs nicht erkennbar, ob es im Laufe der Zeit zu Setzungen an S&T von wenigen Dezimetern gekommen ist. Hier können die fernerkundlichen Verfahren der Aero- und UAS-Photogrammetrie in einseharen Bereichen wichtige Informationen liefern. In Waldbereichen finden photogrammetrische Verfahren ihre Grenzen, so dass hier seit 2015 das Airborne Laserscanning (ALS) getestet wird, wobei der Laserscanner IGI Litemapper LM 7800 zusammen mit der Digitalen Luftbildkamera Vexcel UltraCam Falcon (UCF) in einem

Bildflugzeug eingesetzt wird. Ein als signifikant zu bestimmendes Maß der Veränderung der Tagesoberfläche zur Frühdetektion von Tagesbrüchen wurde auf  $\pm 10$  cm festgelegt, so dass für das Endprodukt und damit über die Messverfahren und dem Verarbeitungsprozess hinweg eine Genauigkeit von  $\pm 3$  cm gegeben sein muss.

Für eine großflächige Erfassung testet RAG seit 2013 UAS-Verfahren in Forschungsstudien sowie im Tagesgeschäft zur Detektion von S&T-Veränderungsbereichen (STUDIE 193 2013; STUDIE 196 2013; STUDIE 200 2014). Im Rahmen einer Diplomarbeit an der TU Bergakademie Freiberg wurden im Jahr 2015 sehr umfangreiche Untersuchungen zur Erstellung eines multitemporalen sowie multisensoralen Workflows zur Früherkennung bzw. Detektion von Tagesbrüchen durchgeführt (EBERHARDT 2015). Abbildung 3 zeigt eine Übersicht mit einer Ausdehnung von ca. 12 km x 6 km mit den Bereichen, die ab 2013 mit fernerkundlichen Verfahren überwacht werden, südlich von Bochum und der Ruhr gelegen.

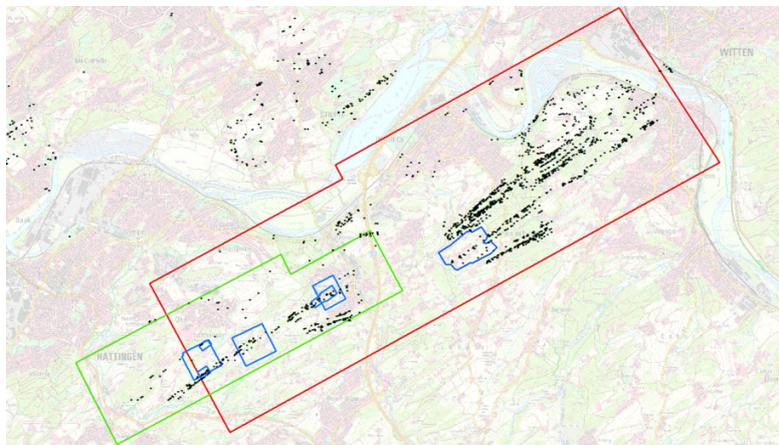


Abb. 3: Übersicht des Untersuchungsgebietes: Lage der S&T (schwarz), UAS-Befliegungsbereiche ab 2013 (blau), UCF Befliegung 2014 (grün), kombinierte Befliegungen UCF mit ALS 2015 & 2016 (rot). Abgebildeter Bereich ca. 12 km x 6 km

## 2 Grundlagen, Genauigkeiten, Referenzdaten

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Das Projektgebiet liegt im südlichen Ruhrgebiet zwischen Witten und Hattingen. Das Gebiet des UCF-Bildfluges 2014 weist eine Ausdehnung von 6 km x 2 km auf. Die UCF Befliegung aus dem Jahr 2015 umfasst eine Fläche von 10 km x 3 km. Diese Flächen über Altbergbaugebieten der RAG werden nun jährlich per Bildflug erfasst. Charakteristisch für diesen Bereich ist eine sehr hügelige Topografie mit Höhenunterschieden von bis zu 130 m. Es liegen landwirtschaftlich genutzte Flächen, verstreute Waldgebiete und verstreute Bebauung abwechselnd nebeneinander. In Abbildung 3 sind neben den zwei Bildflugbereichen (grün und rot), jene Bereiche in blau dargestellt, die halbjährlich per UAS befliegen werden. Die per ALS abgetastete Fläche entspricht der Ausdehnung des UCF-Bildfluges (rot), da beide Sensoren simultan im Flugzeug eingesetzt wurden.

### 2.2 Befliegungen

Für die Detektion von Höhenänderungen im Bereich von wenigen Zentimetern auf der Grundlage bildgestützter Punktwolken müssen viele Faktoren sinnvoll ineinandergreifen. Zunächst gilt es,

den Bild- bzw. UAS- und ALS-Flug sorgfältig vorzubereiten und die für den Aufnahmepurpose geeignete Sensorik und Plattform auszuwählen. Nach erfolgreicher Durchführung stellt schließlich die Wahl geeigneter Auswertesoftware und leistungsfähiger Hardware den wichtigen Schlusspunkt einer photogrammetrischen Auswertung dar. Diese Eckpunkte werden im Folgenden eingehend behandelt. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht zu den Bild- und UAS-Flügen sowie den verwendeten Kameras:

Tab. 1: Übersicht Flüge.

Befliegung	Kamera	$h_g$ [m]	GSD [m/pix]
0114	DP2 Merrill	85	0,014
0214	DP1 Merrill	119	0,029
1114	DP2 Merrill	71	0,011
0315	DP2 Merrill	75	0,025
UCX	UCX	775	0,053
UCF	UCF	400	0,029

### 2.2.1 Kombiniertes Aero-/ALS Flug

In diesem kombinierten UCF und ALS Flug zeigte sich im Vergleich zum UCF-Datensatz eine unzureichend genaue Verknüpfung der ALS Flugstreifen, die über einen Lageversatz von bis zu 35 cm zu Höhenfehlern von einigen Dezimetern führte. Am Beispiel einer Dachfläche, die mehr als 30 cm Höhendifferenz zwischen zwei ALS Streifen zeigt, ist ein Lageversatz von ca. 30 cm (s. Abb. 4) erkennbar. Ein Versatz in dieser Größenordnung resultiert aus der direkten on-board-Referenzierung ohne Passpunkte am Boden, was zu einer ungenügend präzisen Bestimmung des Flugweges führt. Die Passgenauigkeit konnte im Nachhinein über stereo-photogrammetrische Messungen von Dachflächen als Referenzflächen von RAG verbessert werden.

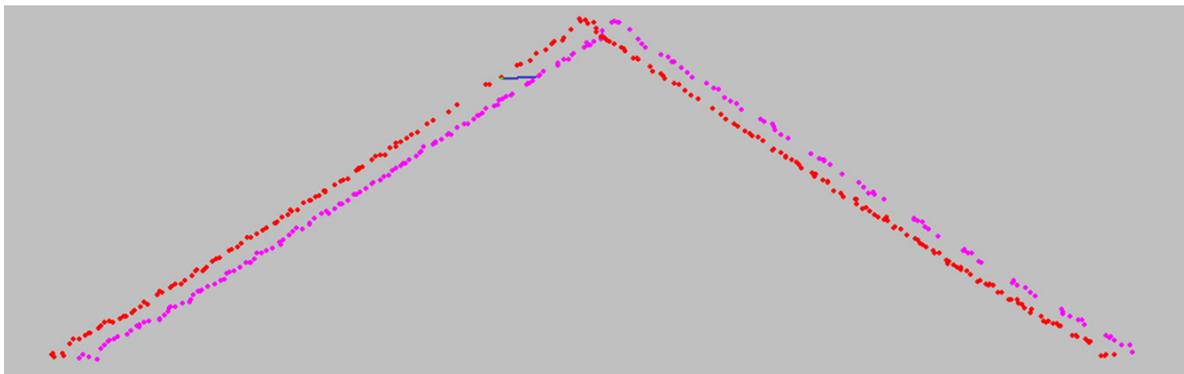


Abb. 4: Lageversatz und daraus resultierenden Höhenversatzes benachbarter ALS-Flugstreifen an einer Dachfläche, hier ca. 30 cm Abweichung in Lage- und Höhe.

### 2.2.2 UAS-Sensor

Für den Einsatz am UAS werden mittlerweile zahlreiche leichtgewichtige Kameras angeboten, so dass eine Bandbreite von nicht-modifizierten Consumer-Kameras bis hin zu speziell entwickelten

Mittelformatkameras im Einsatz ist. Die Abmessungen der Sensoren und somit die Detektorfläche des einzelnen Pixels am Sensor variieren hierbei stark. Allerdings beruhen fast alle diese Systeme auf dem sogenannten „Bayer-Pattern“ zur Aufnahme der Farbinformationen. Jedem Detektorelement wird ein einziger Farbfilter (Rot oder Grün oder Blau) vorgeschaltet. Die volle Farbinformation über den Rot- Grün- und Blauanteil einer reflektierenden Oberfläche kann somit nicht simultan pro Pixel aufgezeichnet, sondern allein durch Interpolation mit Farbwerten der Nachbarelemente erreicht werden (VERHOEVEN 2010).

Die Aufzeichnung der vollen Farbinformationen des Rot- Grün- und Blauanteils für ein einzelnes Detektorelement (Pixel) erfolgt hingegen bei den sogenannten Foveon-Sensoren nach folgendem Prinzip: Anstelle eines vorgeschalteten Farbfilters wird die Trennung der Farbinformationen hier durch die wellenlängenabhängige Eindringtiefe der elektro-magnetischen Welle in den CMOS Chip genutzt (GILBLOM et al. 2003). Daher entspricht diese Aufnahmeweise eher einem Luftbildfilm für Reihenmesskammern. Diese unterschiedliche Art der Aufnahme von Farbinformationen führt zu einem erhöhten Mikrokontrast bei Foveon-Sensoren, verglichen mit Aufnahmen, die durch ein Bayer-Pattern aufgezeichnet werden (Abb. 5).

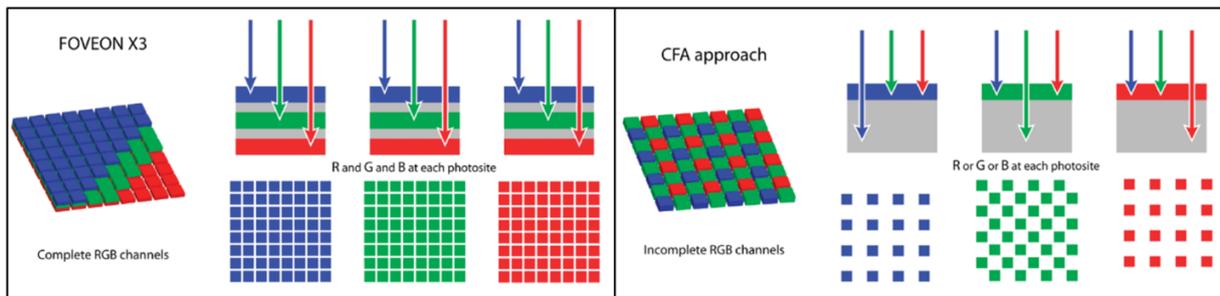


Abb. 5: Foveon (links) und Bayer/CFA – Color Filter Array (rechts) (VERHOEVEN 2010)

Abbildung 6 zeigt die MTF-Kurve eines Bayer-Patterns im Vergleich zu einem Foveon-Chip. Das Kontrastaufklärungsvermögen bei sehr feinen Strukturen – hier liegt die Ortsfrequenz im Bereich der Nyquist-Frequenz – beträgt bei Bayer-Pattern weniger als 10%. Foveon-basierte Sensoren weisen in diesem Bereich 30% auf (GREIWE & GEHRKE 2013).

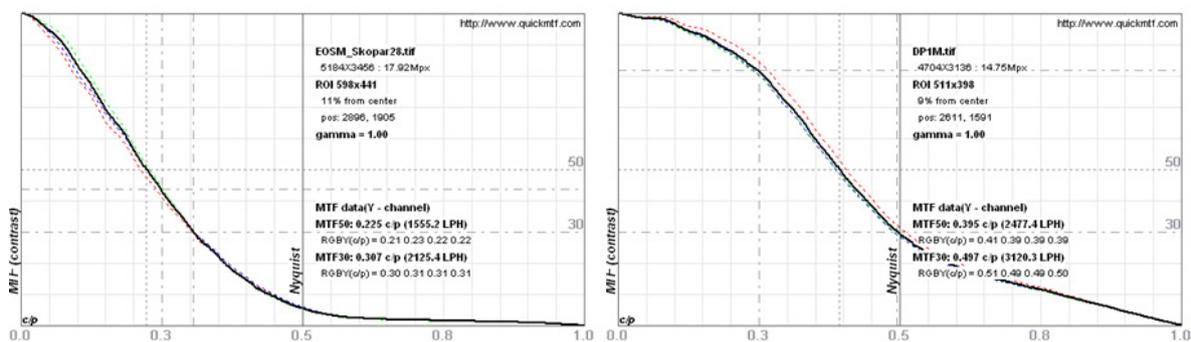


Abb. 6: MTF Kurve eines Bayer-Pattern (links) und eines Foveon-Chips (rechts) (GREIWE & GEHRKE 2013)

Die UAS-Befliegungen werden im Gegensatz zu den anderen Befliegungsmissionen in kleineren Gebieten durchgeführt. Bei der hohen Abtastrate von 1 bis 3 cm bestehen die Bildverbände aus bis zu 2.500 Aufnahmen. Als Auswerteansatz wurde hier Structure from Motion gewählt. Die

Ergebnisse dieses Auswertansatzes sind hochgradig von der Bildqualität der auszuwertenden Aufnahmen abhängig. Dieses gilt insbesondere für die 3D-Punktwolke, welche als Endergebnis des Dense Matching die Grundlage für die Ableitung des Oberflächenmodells bildet. Hier können je nach eingesetztem Sensor – Bayer-Pattern oder Foveon-Chip – qualitative Effekte beobachtet werden, die durch die MTF-Messungen bestätigt werden. Zur Bewertung des Einflusses der Bildqualität auf das Dense Matching wurden drei Sensoren ausgewählt, um eine 3D-Punktwolke von einem Testkörper zu erstellen. Zur Verfügung standen das iQ180 Back (Mittelformat Phase One), 80 MPix und ein Sony ILCE7s (Vollformat Sony Alpha 7s) mit 12 MPix, welche beide auf dem Bayer-Pattern beruhen. Zum Vergleich wurde ein Foveon-Chip (Merrill) mit 12 MPix im APS-C Format gewählt. Die Detektorgröße auf dem Sensor beträgt zwischen  $5\ \mu\text{m}$  und  $6\ \mu\text{m}$ . Es wurden in drei unterschiedlichen Ebenen jeweils 36 Aufnahmen erzeugt. Die Aufnahmeentfernung (Bildmaßstab) wurde für jeden Sensor individuell gewählt, um die Abtastrate konstant zu halten. Bereits die qualitative Betrachtung der Ergebnisse zeigt wesentliche Unterschiede in den jeweiligen 3D-Punktwolken, siehe Abbildung 7. Während der linke und mittlere Testkörper (Bayer-Pattern) ein hohes Rauschen aufweisen, ist das rechts dargestellte Ergebnis des Foveon Sensors deutlich homogener.



Abb. 7: 3D-Punktwolke eines Testkörpers: Sensoren mit Bayer-Pattern (links und Mitte). Rechts das Ergebnis aus Bilddaten eines Foveon-Chips.

Im Praxiseinsatz der UAS-Befliegungen wird das Ergebnis der Laborversuche bestätigt. Hierzu wurden zwei Befliegungen mit unterschiedlichen Sensoren (Sony ILCE, Foveon Merrill) analysiert, deren Aufnahmeparameter GSD, Überlappungsverhältnisse und Bildmaßstab vergleichbar waren. Der Fokus des Vergleiches lag auf der Rekonstruktionsgüte der 3D-Punktwolke. Ebene Flächen sollten in der Punktwolke im Profil auch als ebene, gleichmäßige Anordnung der Punkte im Raum erscheinen. Verglichen wurden natürliche Objektoberflächen (Bordsteine). Die Punktwolke des Bayer-Pattern - Sensors weist eine Streuung („Rauschen“) im Bereich von 4 cm auf, in dem Datensatz mit einem Foveon-Chip ist es lediglich 1 cm, wie in Abbildung 8 ersichtlich.

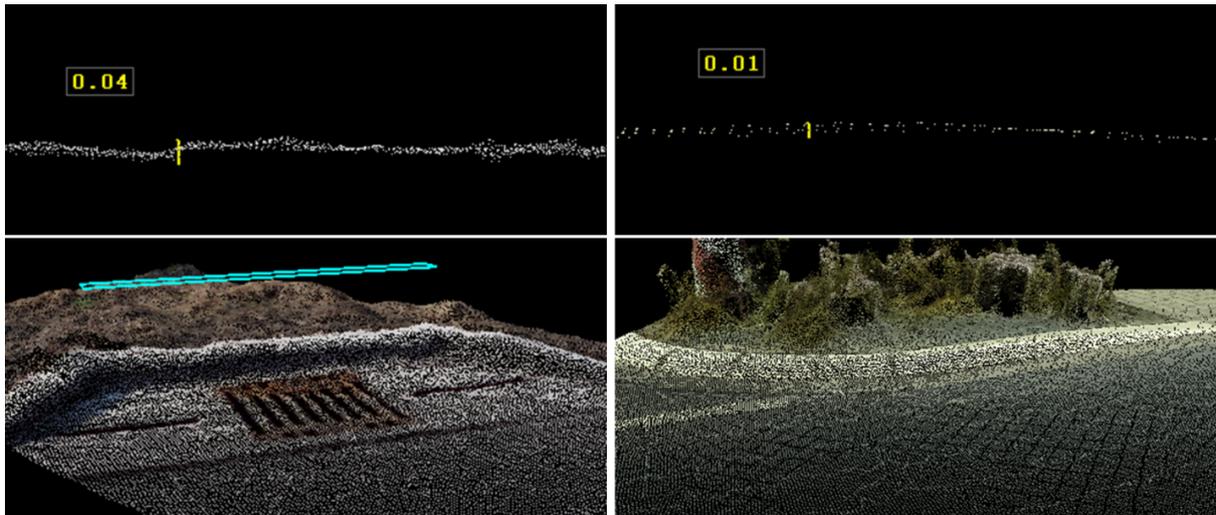


Abb. 8: Rauschen der 3D-Punktwolke an einem Bordstein: 4 cm bei Bayer-Pattern (links), 1 cm bei Foveon-Chip (rechts)

Daraus folgt, dass die Bildqualität des Sensors die entscheidende Größe im Workflow zum Erreichen hoher bis höchster Genauigkeiten zur Ermittlung signifikanter Bodenbewegungen aus Zeitreihenvergleichen von Wiederholungsbefliegungen ist.

Es ist zudem streng darauf zu achten, dass auch im weiteren Bearbeitungsprozess mit der Originalauflösung der Bilder gearbeitet wird. Ein Weiterarbeiten mit verringerter Bodenauflösung in den Bildpyramiden führt zu einer Glättung der Punktwolke und darüber zu Detailverlusten. In der Regel weisen diese Punktwolken auch einen Höhenoffset gegenüber Punktwolken aus Originalbilddaten auf. Abbildung 9 zeigt, dass ein Höhenprofil aus der UCX-Befliegung bei vierfach verkleinertem Bildmaterial (Einstellung in Agisoft PhotoScan: medium, blau) zu jenem aus Originalbilddaten (ultra high, gelb) einen Höhenoffset von 4 cm erfährt.



Abb. 9: Höhenoffset der Punktwolkenberechnung von ca. 4 cm zwischen Originalauflösung (gelb) und vierfach verkleinerter Bildpyramide (cyan)

### 2.3 Terrestrische Photogrammetrie – Referenz Wasserbehälter

Im Untersuchungsgebiet befindet sich der in Abbildung 10 dargestellte Hochwasserbehälter. Er eignet sich aufgrund seiner ebenen Oberfläche (Waschbeton) sehr gut als Referenzobjekt zur Untersuchung der Genauigkeit der einzelnen Punktwolken. Um als Referenz eine Oberfläche höherer Genauigkeit zu erhalten wurde der Hochwasserbehälter mittels terrestrischer Photogrammetrie erfasst. Zum Einsatz kam hier die Nikon D800 mit einem 14mm Objektiv. Aus 106 Aufnahmen wurde mittels Structure from Motion eine Punktwolke mit einem GSD von unter 1 mm abgeleitet. Georeferenziert wurde das Objekt über Passpunkte, die per Echtzeit-GPS bestimmt wurden. Zusätzlich wurden viele Strecken am Behälter gemessen, um als Maßstabsvergleich zu dienen. Zwei Gliedermaßstäbe wurden auf den Behälter gelegt, um eine weitere Kontrollmöglichkeit zur Bestimmung der Referenzfläche zu haben.



Abb. 10: Ansicht (links) und Aufsicht der terrestrischen Referenzfläche „Hochwasserbehälter“ mit Referenzpunkten (rechts)

## 2.4 GPS-Messungen zur Passpunktbestimmung

Die Georeferenzierung der Flugzeug- und Kopter-gestützten Bildflüge erfolgt über am Boden signalisierte Passpunkte. Da RAG seit 2003 für das Ruhrrevier einen festen, einheitlichen Transformationsparametersatz zur Überführung von geozentrisch-kartesischen ETRS89 Koordinaten in das Gauß-Krüger Koordinatensystem verwendet, kommt als Unschärfe in diesem Verfahren nur die Güte der Passpunktmessung zum Tragen (SPRECKELS 2003). Bei den verwendeten GSD von 1 cm bis 3 cm muss nunmehr darauf geachtet werden, dass der Messnagel auf jeden Fall mittig im Signal liegt. Die Koordinatenbestimmung erfolgt althergebracht über Echtzeit-GNSS-Verfahren im Anschluss an SAPOS-Stationen, gemäß den GPS-Richtlinien NRW mit einer Genauigkeit von  $\pm 3$  cm in Lage und Höhe (GPS-RICHTLINIEN). Diese Genauigkeit reicht gerade noch für die UCX- und UCF Blöcke aus, für die UAS-Projekte mit GSD von 1 cm zeigte sich in den Projekten, dass die Passpunktbestimmung mit dem Standard-GPS-Antennen zu Blockverbiegungen führte. RAG ist im Besitz von sechs hochpräzisen, ca. 7 kg schweren Leica AR 25 Chokering Antennen und von sieben 3G+C Antennen. Vergleichende Untersuchungen der RAG im Forschungsprojekt FE-0760 ABSMon (ABSMON) zeigten, dass die schwere Leica AR 25 und die nur wenige 100g leichte 3G+C Antenne im Postprocessing vergleichbare relative Lage- und Höhengenaugigkeiten im Bereich von  $\pm 3$  mm erreichen und somit für diese Antennen ein stabiles Antennenphasenzentrum vorliegt. Im Außendienstesinsatz wurde die 3G+C Antenne zur Passpunktbestimmung eingesetzt und lieferte mit  $\pm 1$ cm Lage- und Höhengenaugigkeit Passpunktkoordinaten, die auch für UAS-Befliegungen verwendet werden können. Im Untersuchungsgebiet liegen Passpunkte allerdings auch in Gebieten, die keinen GPS-Empfang ermöglichen. Hier müssen die Passpunkte mit Tachymetern eingemessen werden.

## 3 Untersuchungen

### 3.1 Bedingungen

Für die Untersuchungen kam eine große Palette an Software und Hardware zum Einsatz. Für die Orientierungen und Ableitung der Punktwolken wurde Agisoft PhotoScan und Erdas Imagine – ORIMA eingesetzt. Die Weiterverarbeitung erfolgte mit FME (Feature Manipulation Engine – Safe Software) und CloudCompare. Für ein späteres Geomonitoring ist es entscheidend, die eingesetzte Software richtig und für den Anwendungsfall angepasst einzusetzen. Auch wenn viele

der Structure from Motion Programme auf den ersten Blick wie eine Blackbox wirken, gibt es eine Vielzahl an Parameter und Analysefunktionen, um eine saubere Orientierung zu rechnen, und damit auch eine ordentliche Punktwolke abzuleiten. In intensiven Vergleichen mit klassischen Orientierungsprogrammen wie ORIMA konnte RAG die Stärken und Schwächen der einzelnen Produkte herausstellen und so für den jeweiligen Anwendungsfall richtig einsetzen. Gerade für die großflächigen Befliegungen mit der UCX oder UCF ist es beim Einsatz von Agisoft PhotoScan entscheidend, eine dichte, dem Gebiet angepasste Passpunktverteilung und ~messung gleichmäßig über den Block verteilt und nicht nur am Blockrand zu haben. Ist dies nicht der Fall, kommt es zu Blockdurchbiegungen von 1 - 2 dm.

Durch die Vielzahl an UAS Befliegungen der RAG in unterschiedlichen Bildflugkonfigurationen (Quer- und Längsüberdeckung) konnte in den vergangenen Jahren neben dem Einsatz des passenden Sensors auch die Wichtigkeit der Längs- und Querüberdeckung festgestellt werden. Anders als bei einem klassischen flugzeuggestützten Bildflug genügt bei UAS-Kampagnen nicht die Standardüberdeckung von 60% Längs- und 30 % Querüberdeckung. Oft wird aufgrund von zu geringer Akkukapazität, Zeit, Wetterbedingungen – aber auch durch fehlendes Knowhow – das Gebiet nicht mit ausreichender Überdeckung befliegen, was dann zu schlechteren Ergebnissen führt. Werden diese genannten Bedingungen bei allen Bildflügen eingehalten, können optimale Ergebnisse erzielt werden und dadurch belastbare Vergleiche ermöglichen.

### 3.2 Multisensoraler Vergleich

#### 3.2.1 Multisensoraler Vergleich am Referenzobjekt Hochwasserbehälter

Das in Kapitel 2.4 beschriebene Objekt, ein Wasserbehälter mit einer Waschbetonoberfläche, dient im Folgenden als Referenz für den Vergleich mit den Punktwolken aus unterschiedlichen Sensoren, Plattformen, bzw. unterschiedlichen GSD und Jahreszeiten der Aufnahmen.

Um ein Genauigkeitsmaß für jede einzelne Punktwolke zu ermitteln, wird eine Ebene oder Flächenkurve durch jede einzelne Punktwolke gelegt. Bei der Erstellung dieser Ebene wird als Ergebnis der Ausgleichung der RMS-Wert ermittelt. Dieser beschreibt die mittlere Standardabweichung aller Objektpunkte (gesamte Punktwolke) und gibt somit Auskunft über das Genauigkeitsniveau der Ausgleichung (LUHMANN 2010). Der Wert kann auch als Punktrauschen verstanden werden. Mit der unabhängigen Berechnung der Genauigkeitsmaße wird sichergestellt, dass die Passpunktdifferenzen keinen Einfluss haben.

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt eine Übersicht der ermittelten RMS-Werte für jeden Datensatz:

Tab. 2: Übersicht der RMS-Werte am Hochwasserbehälter

Punktwolke	<i>terrestrisch</i>	0114	0314	1114	0315	UCF	UCX	ALS
<b>GSD in cm</b>	0,1	1,4	2,9	1,1	2,5	2,8	5,3	-
<b>RMS in cm</b>	0,3	0,4	-	0,3	0,4	0,6	2,0	0,9

Die terrestrische Punktwolke bildet die Vergleichsgrundlage und weist entgegen den Erwartungen kein wesentlich geringeres Punktrauschen als die beiden hochauflösenden UAS-Punktwolken 0114 und 1114 auf. Jedoch erfasst die terrestrische Punktwolke mit einer GSD von 1 mm auch

jeden Kieselstein, so dass in diesem Fall der RMS die echte Oberflächenrauigkeit darstellt, und nicht das Punktrauschen. Die UAS-Flüge 0114 und 1114 erzeugten die höchst aufgelösten GSD. Die Erwartung, dass deren RMS-Werte am geringsten ausfallen, ist erfüllt worden. Beide weichen nur wenige Millimeter von ihrer ausgleichenden Ebene ab. Eine Darstellung der unterschiedlich gelagerten Punktwolken in Form eines Profils ist sehr anschaulich. Hier fällt auf, dass bei zunehmender GSD das Punktrauschen größer wird und der Höhenoffset zur Referenzfläche zunimmt (Abb. 11).

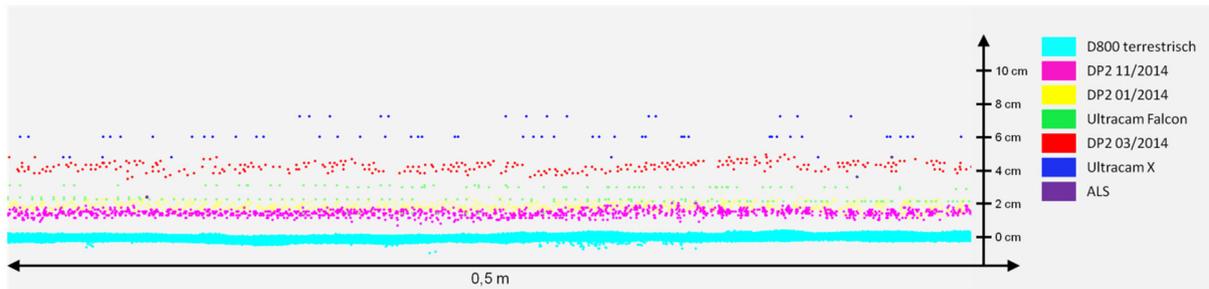


Abb. 11: Profilschnitt durch die Oberfläche des Hochwasserbehälters – Punktwolkenvergleich

### 3.2.2 Testflächen als Referenz

Ein Tagesbruch kann in einem Altbergbauggebiet nahezu überall auftreten. Vielfach sind ehemalige Grubenbaue heute durch Straßen oder Parkplätze überbaut. Aus diesem Grund ist es wichtig, das Verhalten der Punktwolken auf diversen Oberflächenmaterialien an kleinen Testflächen zu untersuchen. Für die Untersuchungen sind Testflächen auf den Materialien Wiese, Asphalt, Pflaster, und Dachflächen ausgesucht worden. Ganz bewusst sind die meisten Testflächen für das Material Wiese generiert worden, da derartige Flächen sehr häufig in den RAG-Altbergbaugebieten vorkommen. Asphalt und Pflaster treten vorrangig bei öffentlichen Flächen und Verkehrswegen auf. Zusätzlich sind Dachflächen digitalisiert worden, um steiles Gelände zu repräsentieren. Wie schon im Kapitel zuvor, werden zur Bestimmung des Genauigkeitsmaßes ausgleichende Flächenkurven für jede Punktwolke erstellt und der RMS Wert bestimmt. Im Folgenden sind die Ergebnisse für die Testflächen Wiese und Asphalt dargestellt.

#### Testflächen Wiese

Das große Problem bei der Bestimmung eines Genauigkeitsmaßes für Wiesenflächen ist deren je nach Jahreszeit mehr oder weniger unregelmäßige Oberfläche im Hinblick auf das Anlegen eines ausgleichenden Objekts. Die hier anzulegenden Flächenkurven stellen tatsächlich nur eine grobe Annäherung an die durch unterschiedliche Vegetationsstände beeinflusste Oberfläche dar. Die resultierenden Genauigkeitsmaße sind daher als sehr grob einzustufen, geben sie doch mehr ein Maß für die (eigentlich unbekannt) Oberflächenrauigkeit als für das Rauschen der untersuchten Punktwolke an. Dennoch sind die Ergebnisse für die weitere Bearbeitung geeignet, da eine großzügigere, konservative Annahme bei der Erfassungsgenauigkeit der Topografie praxistauglicher ist, als eine unter annähernd idealen (Labor-) Bedingungen abgeleitete. Dies erschwert zwar das Erkennen kleinster Bodenabsenkungen, führt aber zu weniger Fehlinterpretationen.

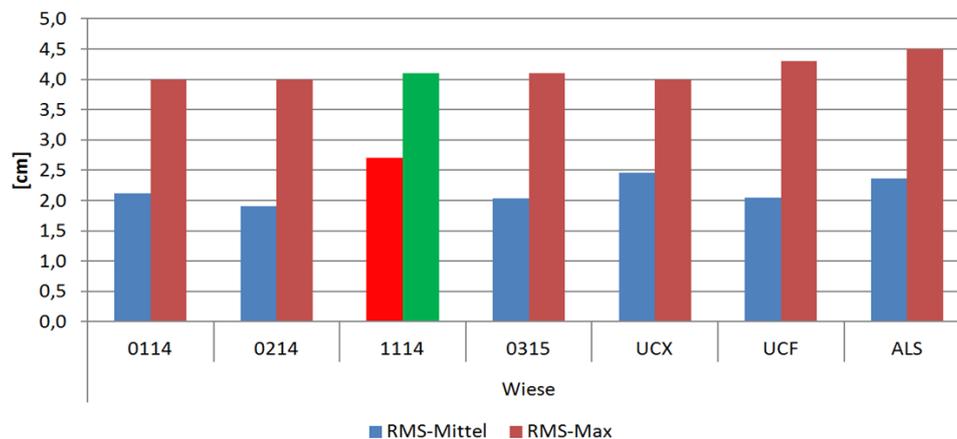


Abb. 12: Übersicht RMS-Werte Testfläche Wiese

Abbildung 12 zeigt, dass alle Punktwolken im Mittel von  $\pm 1,9$  cm bis  $\pm 2,7$  cm streuen. Die mitunter doppelt so großen maximalen Werte resultieren zum einen aus sich ändernder Oberflächenrauigkeit, zum anderen aus unterschiedlicher Geländeneigung. Bemerkenswert ist das höhere Rauschen der Referenzpunktwolke 1114 gegenüber allen anderen Datensätzen, besonders aber im Vergleich zu 0214, obwohl diese aus geringerer Bildüberdeckung prozessiert wurde und eine geringere GSD aufweist. Eine nähere Betrachtung zeigt, dass die Vegetation zwischen beiden Flügen stark unterschiedlich ist. Aufgrund der sehr hohen GSD von 1114 und der dichten Vegetation ist die Oberfläche für einen automatisierten Rekonstruktionsalgorithmus zu unruhig. Das führt zu vielen Ausreißern, die das höhere Rauschen verursachen. Dieses Beispiel zeigt, dass es sinnvoll ist, die Genauigkeit bei der Erfassung der Oberfläche durch den jeweiligen Sensor eher konservativ anzusetzen.

### Testflächen Asphalt

Diese Testfelder sind in Gebiete gelegt worden, die nicht durch Vegetation verdeckt sind, um die Rekonstruktionsqualität auf Asphalt ohne störende Einflüsse zu überprüfen.

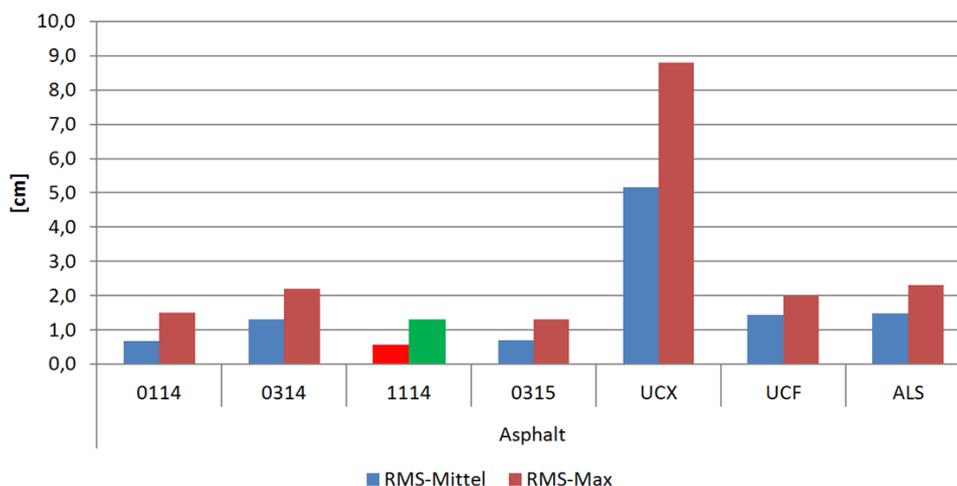


Abb. 13: Übersicht RMS-Werte Testfläche Asphalt

Alle UAS-Punktwolken weisen in Abbildung 13 ein signifikant geringeres Rauschen als die niedriger aufgelöste UCX-Punktwolke auf. Der UCF-Datensatz mit 2,8 cm GSD rauscht nur geringfügig stärker als die UAS-Datensätze, aber beinahe vier Mal weniger als UCX. Da die beiden Luftbildkameras bauartgleich sind, üben vermutlich die große Flughöhe bzw. die geringere GSD der UCX sowie der unterschiedliche Sonnenstand einen wesentlichen Einfluss auf die Rekonstruktion aus. Innerhalb der UAS-Punktwolken weist 0214 den größten Wert auf, was möglicherweise auf die geringe GSD von 2,9 cm zurückzuführen ist. Die Referenzpunktwolke 1114 streut im Mittel mit  $\pm 0,6$  cm erwartungsgemäß am wenigsten. Besonders hervorzuheben ist die hohe innere Genauigkeit von 0315. Trotz einer wesentlich geringeren Auflösung von 2,5 cm GSD streut dieser Datensatz nahezu gleichstark wie der Referenzdatensatz 1114. Es zeigt sich hier, dass die Wahl der Kamera mit dem Foveon Sensor ein entscheidendes Kriterium ist, um eine hohe Rekonstruktionsgenauigkeit zu erreichen.

Der ALS rauscht vergleichbar stark wie UCF, jedoch zum Teil erheblich stärker als der Referenzdatensatz 1114 (siehe Abb. 14). Im Vergleich zu 1114 zeigt die ALS Punktwolke ein für ALS typisches Wellenmuster.

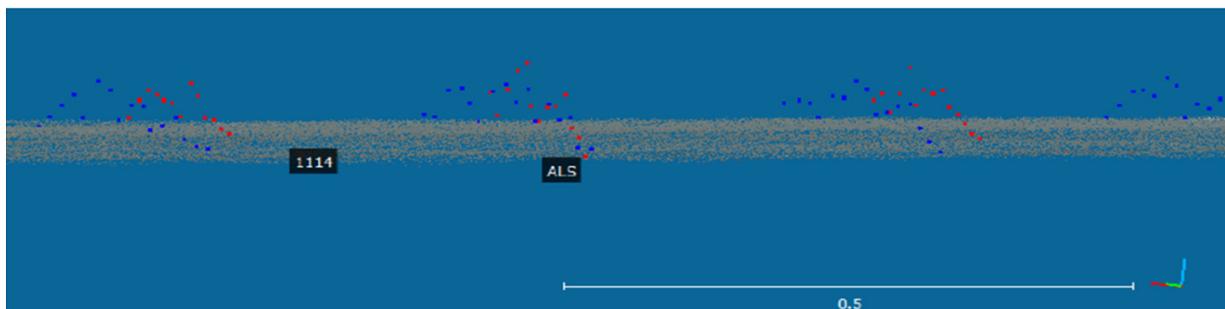


Abb. 14: Vergleich der Punktwolken aus UAS 1114 (beige) zu ALS (zwei Flugstreifen, rot und blau)

Die Punktwolken für wiesenähnliche Bereiche rauschen etwa gleich stark, mit Ausnahme von 1114, welche aufgrund hoher Vegetation und der vorliegenden GSD die Oberflächenrauigkeit besonders gut wiedergibt. Insgesamt liefern die UAS-Punktwolken die geringsten RMS-Fehler, mit Ausnahme der wiesenähnlichen Testflächen. Besonders hervorzuheben sind die Referenzpunktwolke 1114 und 0315, die fast immer innerhalb eines Zentimeters streuen. Die multisensoralen Untersuchungen zeigen das hohe Potential der photogrammetrischen Vermessung mittels Foveon Sensor. Ein Punktrauschen im Bereich von 1 bis 3 cm zeigt die Praxisfähigkeit des routinemäßigen Einsatzes von Kameras zur Detektion vertikaler Bodenbewegungen. Es bleibt zu untersuchen, mit welcher Genauigkeit Veränderungen in Abhängigkeit der Jahreszeit und des Vegetationsstandes ableitbar sind. Die in diesem Abschnitt ermittelten inneren Genauigkeitsmaße sind daher beim multitemporalen Vergleich im nachfolgenden Abschnitt zu berücksichtigen.

### 3.3 Multitemporaler Vergleich

Für den multitemporalen Vergleich wurde mit Hilfe des Programms FME (Feature Manipulation Engine, Safe Software) ein Workflow erstellt, der aus den unterschiedlichen Punktwolken Höhendifferenzen ableitet und Statistiken zu diesen aufstellt. Die Höhendifferenzen wurden für dieselben Testflächen Wiese, Asphalt, Pflaster, und Dachflächen ermittelt. Wichtig war es, im Vorfeld sinnvolle Vergleichsdatsätze auszuwählen. Da es für den ALS noch keinen zweiten Datensatz gibt, ist ein temporaler Vergleich zurzeit noch nicht möglich. Aufgrund der von der Jahreszeit abhängigen Vegetationsstände ist ein Vergleich zwischen den UAS Befliegungen getrennt nach Frühjahr (0114, 0214, 0315) und Herbst (1114) sinnvoll. Es sind zunächst die

Differenzen zwischen den Mittel- und Median-Werten aller Testflächen gebildet worden. Der robuste Median glättet bspw. an jenen Stellen das Modell, wo ein Tagesbruch entstanden ist. Der Mittelwert hingegen erfasst diese großen Abweichungen und wird verzerrt. Die Größe der Differenz kann somit auf eine mögliche Verdachtsfläche hinweisen. Abbildung 15 zeigt am Beispiel eines Tagesbruchs innerhalb der Testfläche Wiese\_11 die Unterschiede zwischen Mittelwert und Median für die Epochen 1114-0114 und 0315-0214.

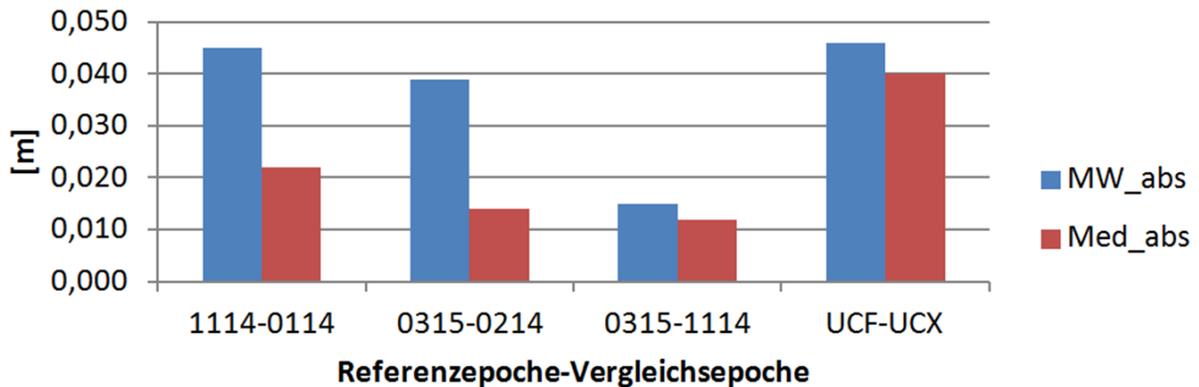


Abb. 15: Vergleich der Höhendifferenzen im Bereich eines Tagesbruchs: UAS zu UAS, UCF zu UCX)

0315-1114 und UCF-UCX zeigen keinen großen Unterschied zwischen Mittelwert und Median. Die Differenz der UAS Flüge 0315-1114 sollte keinen Tagesbruch mehr aufweisen, da die Flüge nach der Sanierung der Fläche durchgeführt wurden. Die Differenz der UltraCam Bildflüge könnte aber einen Unterschied für den Bereich um den gefallenen Tagesbruch zeigen, jedoch ist hier aufgrund der unterschiedlichen GSD und dem großen Rauschen der UCX Punktwolke eine signifikante Detektion des Tagesbruchs nicht möglich (siehe auch innere Genauigkeit UCX).

Doch nicht nur ein Tagesbruch, auch Vegetationswechsel oder verschobene Gegenstände können den Mittelwert verzerrten, was eine Lokalisierung eines Tagesbruchs alleine über die Differenzen erschwert. Die Min- und Max-Werte sind beim Material Wiese für die Detektion von Tagesbrüchen ungünstig, da diese ebenso leicht durch vereinzelte, hohe Vegetation verfälscht werden können. Die hohen Max-Werte beim UCF-UCX-Vergleich für das Material Asphalt resultieren aus dem starken Rauschen der UCX. Der Abbildung 16 kann entnommen werden, dass, unabhängig vom Sensor, gemittelte Höhenunterschiede von weniger als 6 cm detektiert wurden und 1,5 bis 3 cm den Massendurchschnitt bilden. Höhere Werte treten tendenziell beim Material Wiese auf.

Absolute Genauigkeiten von Höhenunterschieden können nicht für die Evaluierung der Ergebnisse einer photogrammetrischen Rekonstruktion gegenüber anderen Messverfahren angegeben werden. Gerade für wiesenähnliche Flächen stellt die (unbekannte) und je nach Jahreszeit stark unterschiedliche Oberflächenrauigkeit ein noch ungelöstes Problem dar. Generell scheint ein Vergleich zwischen zwei DHM sinnvoll, die beide aus Befliegungen im Frühjahr hervorgegangen sind. Der Vorteil ist, dass noch keine "neue" Vegetation die "ältere", flach gedrückte, überragt und die Oberflächenrauigkeit somit geringer ist (Epochenvergleich 0315-0214).

Im Zuge der Umsetzung, die Passpunkte für die Georeferenzierung der Flüge zukünftig ausschließlich mit 3G+C-Antennen zu messen und der Annahme, dass damit Genauigkeiten von ca. 1 cm erreicht werden, sollten für einen Epochenvergleich (0315-0214) Höhenunterschiede als signifikant ab ca. 4 cm (versiegelte Oberfläche) und ab ca. 7 cm (Wiese) gelten.

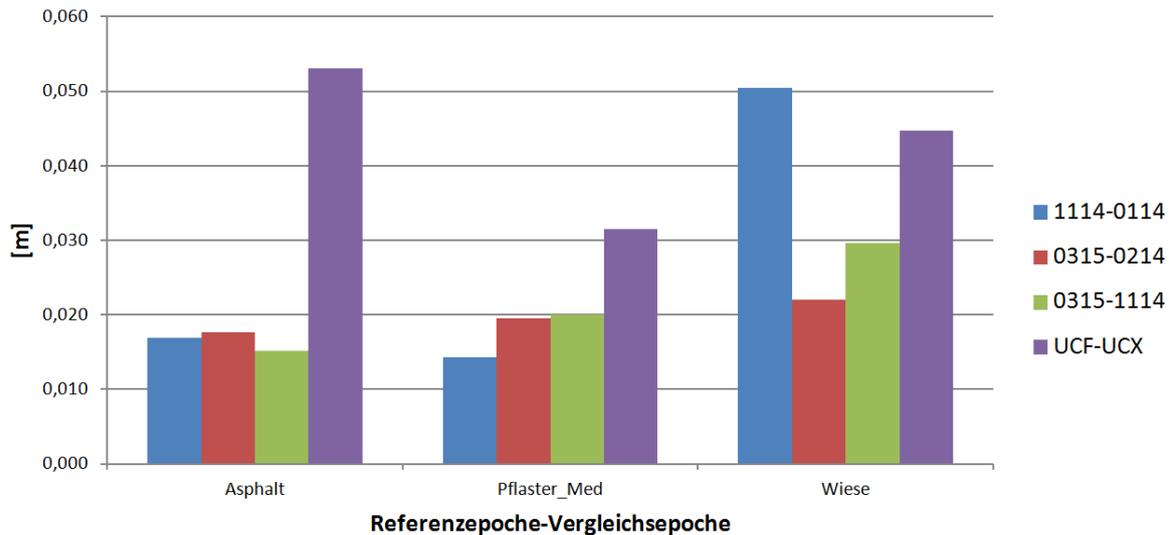


Abb. 16: Zusammenstellung der Höhendifferenzvergleiche für Testflächen und Sensoren

Es hat sich gezeigt, dass die Differenz zwischen Median und Mittelwert der Höhendifferenzen ein gutes Mittel zur Detektion von Verdachtsbereichen darstellt.

#### 4 Multitemporales-multisensorales Monitoringkonzept

Die multisensoralen und multitemporalen Untersuchungen bilden die Basis für einen Workflow zur Erfassung von Bodenbewegungen im Altbergbaubereich an Schächten der RAG. Es zeigt sich, wie wichtig grundlegende Koordinatenreferenzsysteme und hochgenaue Passpunktmessungen sowie ein mehrstufiger Ansatz zur Ableitung der Höhendifferenzen sind. Im ersten Auswerteschritt wird eine aus dem aktuellen Bildflug abgeleitete Punktwolke über Testflächen dahingehend analysiert, wie gut die Punktwolke die erfasste Oberfläche repräsentiert und mit welchem Punktrauschen bzw. welchen Messungenauigkeiten die unterschiedlichen Oberflächen (Asphalt, Wiese, etc.) erfasst wurden. Mit diesen Parametern können im zweiten Schritt die absoluten Differenzen an den Schächten ermittelt und bewertet werden. In Form eines Protokolls als PDF Datei können so die Differenzen und daraus abgeleiteten Ergebnisse dargestellt werden (siehe Abb. 17). Die zusätzliche Darstellung von Orthophotos und Reliefdarstellungen der beiden Zeitschnitte kann bei der Bewertung von Veränderungen helfen. Eine Integration der Ergebnisse in die Schachtdatenbank der RAG und damit auch in die Digitale Service-Akte (D S A) der RAG (VOSEN ET AL. 2014) ermöglicht so einen firmenweiten Zugang und die schnelle Bearbeitung im Falle einer Veränderung, bzw. eines Tagesbruchs.

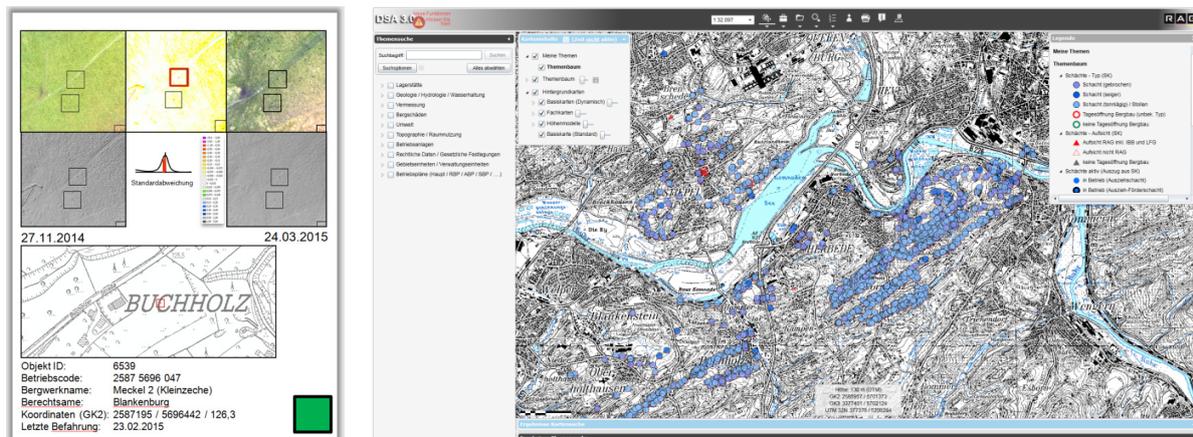


Abb. 17: Protokoll als PDF (links), Digitale Service-Akte der RAG mit dargestellten Schächten (rechts)

## 5 Ausblick

In 2015 und 2016 wurden und werden anhand einer Fläche von 33 km<sup>2</sup> erste Erfahrungen mit dem vorgestellten Workflow gesammelt. Ziel ist es, die jährlichen Begehungen von Tagesbrüchen auf ein Minimum zu reduzieren und durch einen photogrammetrischen Workflow weitgehend zu ersetzen. Die Untersuchungsfläche wird ab 2017 auf 230 km<sup>2</sup> steigen. Bei dieser Flächengröße wird von einem jährlichen Datenvolumen von 100 Terabyte ausgegangen. Das stellt die RAG neben den inhaltlichen Herausforderungen vor ganz neue Herausforderungen, wie z.B. an die Hard- und Software, die Datenspeicherung, das Datenhandling und die Netzwerkumgebung.

## 6 Literaturverzeichnis

- ABSMON: RAG Forschungsprojekt FE 0760 „Monitoring des Altbergbaubereichs über a) hochpräzise GPS- und satellitengestützte Referenznetze unter Berücksichtigung der Risikoanalyse des untertägigen Grubenwasseranstieges und b) der Entwicklung eines Echtzeit-Schachtinspektionssystems (ABSMon)“. Forschungsprojekt der RAG, 06-2012 bis 07-2015, unveröffentlicht.
- EBERHARDT, L., 2015: Untersuchungen multitemporaler und multisensoraler 3D-Punktwolken für Altbergbaubereiche der RAG. Diplomarbeit an der Fakultät Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.
- HAGER, S. & WOLLNIK, F., 2014: Monitoring im Altbergbau der RAG Aktiengesellschaft. 14. Altbergbau-Kolloquium, G. Meier (Hrsg.), 06. bis 08. November 2014, Gelsenkirchen, Technische Fachhochschule Georg Agricola (TFH) Bochum, 349-357.
- GILBLOM, D. L., YOO, S., K. & VENTURA, P., 2003: Operation and performance of a color image sensor with layered photodiodes. SPIE AeroSense 2003 - April 22, 2003 - Orlando, Florida, USA.
- GREIWE, A. & GEHRKE, R., 2013: Foveon Chip oder Bayer Pattern - geeignete Sensoren zur Aerophotogrammetrie mit UAS. Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik - Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2013, Luhmann, T. & Müller, C. (Hrsg.), Wichmann Verlag, 334-343.

- GPS-RICHTLINIEN, 2002: Richtlinien zum Einsatz von satellitengeodätischen Verfahren im Vermessungspunktfeld - GPS - Richtlinien - vom 02.09.2002, in der Fassung vom 15.04.2003 36.3 – 7132, Stand v. 20.09.2007 37-51.12.01 - 7132. Herausgeber: Innenministerium des Landes Nordrhein-Westfalen, Herstellung und Vertrieb: Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen 2002. [http://www.katastermodernisierung.nrw.de/documente/broschuerenerlasse/GPS\\_Richtlinie\\_n\\_%2020\\_09\\_07.pdf](http://www.katastermodernisierung.nrw.de/documente/broschuerenerlasse/GPS_Richtlinie_n_%2020_09_07.pdf) (abgerufen am 29.04.2016).
- LUHMANN, T., 2010: Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen, Methoden und Anwendungen. 3., völlig neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Wichmann. ISBN-13: 978-3879074792
- SPRECKELS, V., 2003: Einführung fester Transformationsparameter vom ETRS'89 zum Gauß-Krüger-Koordinatensystem über NWREF-Punkte zur einheitlichen Führung der Koordinaten und GIS-Datenbestände der Deutschen Steinkohle AG (DSK AG). Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V., Band 12, 23. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, FH Bochum, 9.-11. September 2003, 145-156.
- STUDIE 193, 2013: RAG-Studie 193. Einsatz von UAV und Sensoren zur Geländeerfassung, Bericht. Hg. v. Ansgar Greiwe, Fachhochschule Frankfurt/Main. 23.08.2013. unveröffentlicht.
- STUDIE 196, 2013: RAG-Studie 196. CIR-UAS Datenerhebung mit UAV und CIR-Kameras, Bericht Hg. v. Ansgar Greiwe, Fachhochschule Frankfurt/Main. 29.11.2013, unveröffentlicht.
- STUDIE 200, 2014: RAG-Studie 200. MultiCam - Geländeerfassung durch einen Mehrkamera-Sensorkopf. 4 Berichte. Hg. v. Ansgar Greiwe. Steinbeis Transferzentrum Geoinformatik. Nordkirchen. 05.12.2014, unveröffentlicht.
- VERHOEVEN, G.J.J., 2010: It's all about the format – unleashing the power of RAW aerial photography. *International Journal of Remote Sensing* **31** (8), 2009-2042.
- VOSEN, P., KOSŁOWSKI, T., FISCHER, P. & MUSIEDLAK, J., 2014: DSA 2.0 – Erweiterung der Integrations- und Informationsplattform der RAG für Geodaten. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, Heft 2014-1. 15. Geokinematischer Tag, 15.-16. Mai 2014, Freiberg, 156-167.