

UAV-basierte Vermessung von Bergseen¹

Digital Elevation Models of Underwater Structures from UAV-Imagery

Christian Mulsow, Robert Kenner

Unbemannte Flugsysteme (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) haben sich in den letzten Jahren zu neuen Datenerfassungsplattformen für Geodaten entwickelt. Zumeist ausgestattet mit einer Digitalkamera, können schnell und kostengünstig Bildverbände mit einem hohen Überdeckungsgrad gewonnen werden, aus denen Orthophotos, Punktwolken und Geländemodelle für unterschiedliche Fragestellungen abgeleitet werden können.

Für hydrographische Anwendungen werden UAV verfahrensbedingt jedoch in der Regel nicht eingesetzt. Neben dem Umstand, dass der Gewässergrund in den Bildaufnahmen je nach Wassertiefe und Wassertrübung nicht immer sichtbar ist, wird der optische Abbildungsvorgang vor allem durch den Medienübergang zwischen Luft und Wasser beeinflusst, was bei Nicht-Berücksichtigung zu systematischen Abweichungen in den abgeleiteten Daten führt. Der vorliegende Beitrag beschreibt, wie durch Berücksichtigung der Mehr-Medien-Situation ein Geländemodell des Gewässergrunds eines Bergsees aus UAV-Bildaufnahmen generiert werden kann.

Schlüsselwörter: UAV, DGM, Mehr-Medien-Photogrammetrie, Refraktionskompensation

Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have evolved to powerful mapping platforms in recent years. Mostly equipped with a digital camera, images can be captured very quickly and cost-efficiently. From these usually highly overlapping UAV image sets point clouds, digital terrain models and ortho images can be derived.

For hydrographic applications, however, UAVs normally are not used. Besides the fact that depending on water depth and water turbidity the waterbed often is not visible in the images, the imaging process is affected by refraction due to the change of medium between air and water. Unconsidered refraction effects in turn lead to systematic deviations in the derived data. This contribution describes how a digital terrain model of the waterbed of a mountain lake can be generated from UAV images by considering and modeling the multi-media geometry.

Keywords: UAV, DTM, multi-media photogrammetry, refraction compensation

1 MOTIVATION

Mit der Überwachung einer Geröllhalde oberhalb des Schottensees in den 1970er-Jahren nahm die Gebirgspermafrost-Forschung in der Schweiz ihren Anfang /Haerberli 1975/. Aktuelle Untersuchungen /Kenner et al. 2017/ beschäftigen sich mit der Chronologie der geomorphologischen Prozesse (*siehe Abb. 1*). Wichtige Grundlagen

sind Kenntnisse über die Oberflächengeometrie, insbesondere die des Gewässerbodens. Bei der photogrammetrischen Erfassung müssen daher den verschiedenen optischen Medien (Wasser und Luft) Rechnung getragen werden.

¹ Der vorliegende Aufsatz ist die Zweitveröffentlichung des im Rahmen des DVW-Seminars „Hydrographie 2018 – Trend zu unbemannten Messsystemen“ veröffentlichten Tagungsbeitrags.

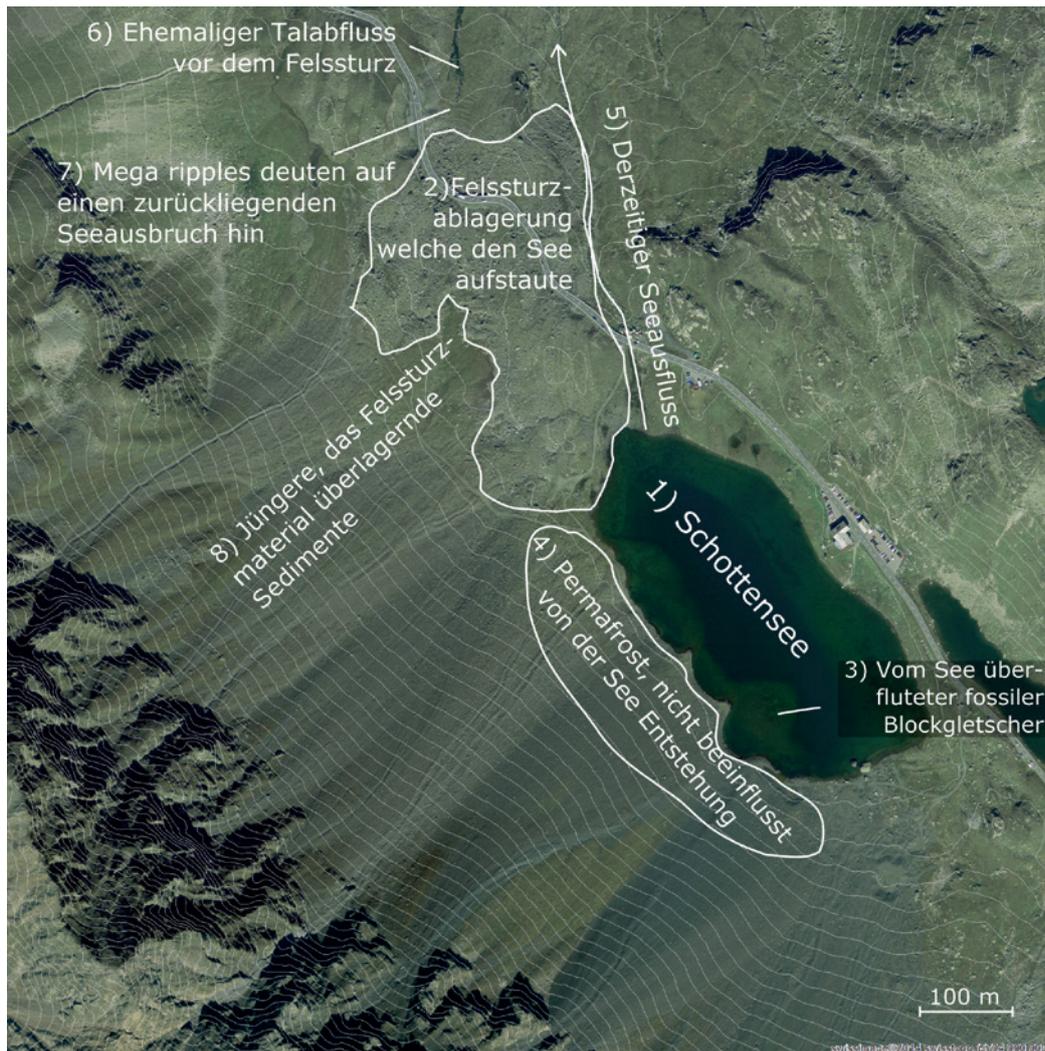


Abb. 1 | Orthophoto des Flüelapass mit Schottensee /swissimage©2014 swisstopo (5704 000 000)/. Die gekennzeichneten Formationen fassen in der Reihenfolge ihrer Nummerierung die Abfolge der geomorphologischen Prozesse in diesem Gebiet zusammen /Kenner et al. 2017/.

2 UAV-BEFLIEGUNG

Für die schnelle und kostengünstige Aufnahme wurde ein UAV-System, bestehend aus einem Oktoptopter Falcon 8 der Firma Ascending Technologies (AscTec) und einer Sony-Kamera NEX-7 (24 Mpix, 20-mm-Objektiv) verwendet /Bühler et al. 2016/. Innerhalb eines Tages wurden im September 2016 circa 300 Bilder aus einer Flughöhe von ~ 100 m über Grund aufgenommen (Bodenaufklärung ~ 2 cm). Der Bildblock weist eine Querüberlappung von 65 % und eine Längsüberlappung von 75 % auf. Näherungswerte für die Kamerapositionen wurden von der UAV-eigenen GPS/IMU-Einheit

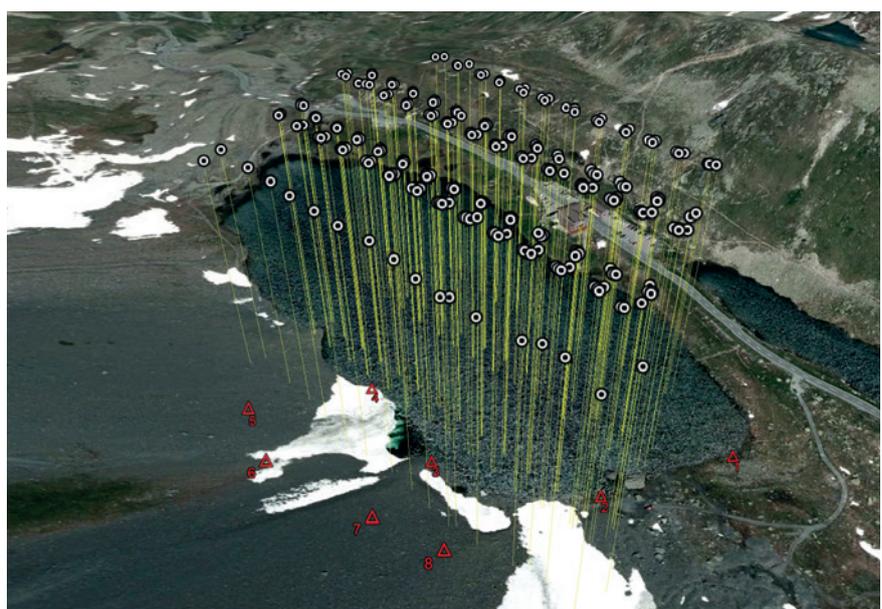


Abb. 2 | Der Schottensee mit Bildpositionen und Passpunkten /Google Earth/



Abb. 3 | Bildabdeckung und Passpunktanlage

(IMU: Inertial Measurement Unit – inertiales Messsystem) erfasst. Für die Lagerung des Blocks wurden acht Passpunkte am Boden künstlich signalisiert und mit einem Topcon-GR5-GNSS-Empfänger im RTK-Modus mit einer Absolutgenauigkeit von 10 cm (Konfidenzintervall 95 %) in Höhe und Lage eingemessen. Anhand der *Abb. 2* und *Abb. 3* ist erkennbar, dass die räumliche Verteilung der Passpunkte nicht optimal ist. Dies ist den örtlichen Gegebenheiten geschuldet. Nichtsdestotrotz sind die relevanten Geländeabschnitte (Lobe und Schutthang) hinreichend abgedeckt. Eine Signalisierung und Aufmessung von Passpunkten am Gewässerboden erfolgte aus logistischen Gründen nicht. Dieser Umstand limitiert die stabile Lagerung von Bildern mit überwiegend Wasser-Inhalten. Zudem wird eine durchgreifende Kontrolle der Lage- und Höhengenaugkeit des orientierten Bildblocks in diesen Bereichen unmöglich.

Die Qualität des aufgenommenen Bildmaterials ist alles andere als homogen zu bezeichnen. Eine Reihe von Bildern zeigen ausgeprägte Bewegungsunschärfen. Weiterhin variieren die Bildhelligkeiten. Die Gesamtheit der Bildfehler erforderte eine Reduzierung des Bildmaterials sowie eine Anpassung der Bildmess-Algorithmen.

Einige Monate nach der Befliegung wurden Kontrollpunkte am Gewässerboden mit einem GNSS-Empfänger im RTK-Modus an einem Lotstab bis zu einer maximalen Tiefe von 2,8 m aufgenommen (November 2016 durch Wasser, Dezember 2016 durch Eis). Es wurden ausschließlich Punkte im für die Untersuchungen relevanten Gebiet bestimmt (siehe *Abb. 4*).

3 AUSWERTESTRATEGIEN

Das Finden einer geeigneten Strategie zur Auswertung des vorliegenden Datensatzes gestaltete sich als evolutionärer Prozess. Dieser verlief – ausgehend von einer weitestgehend automatischen Prozessierung in einer kommerziellen Software mit all ihre Unzu-

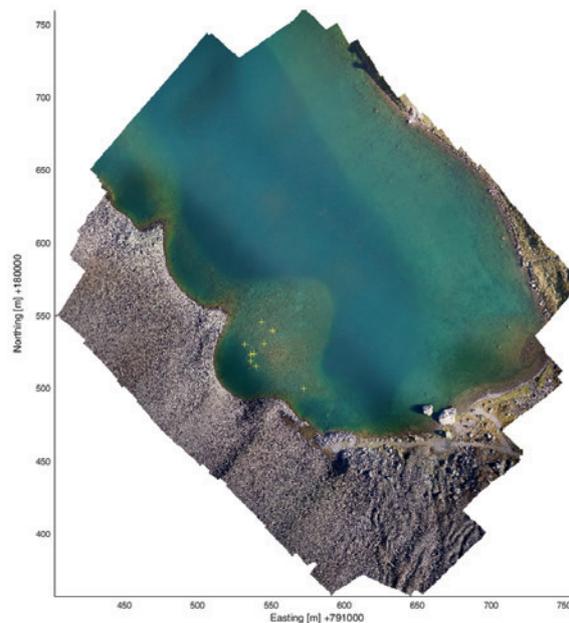


Abb. 4 | In PhotoScan (Agisoft) generiertes Orthophotomosaik mit Kontrollpunkten (gelbe Kreuze)

lässlichkeiten – bis hin zu einer maßgeschneiderten Lösung zur Ausschöpfung des vollen Potenzials des Datenmaterials. Im folgenden Abschnitt werden die einzelne Strategien separat behandelt und hinsichtlich ihrer Komplexität und Güte betrachtet.

3.1 Auswertung in kommerzieller Software

Zunächst wurde der gesamte Block in PhotoScan Pro (Agisoft) prozessiert. Die Absolutorientierung erfolgte auf Basis der Passpunkte. In der gleichen Software wurde eine georeferenzierte Punktwolke der Oberfläche sowie ein Orthophotomosaik generiert (siehe *Abb. 4*). Da innerhalb der verwendeten Software keine Modellierung von Refraktionseffekten implementiert ist, ist das extrahierte Geländemodell (DGM) nur für die Landbereiche gültig. Theoretisch sollten Unterwasserbereiche im digitalen DGM tendenziell zu geringe Tiefen aufweisen. Diese Annahme konnte durch Vergleichsmessungen an den Kontrollpunkten bestätigt werden. Die Abweichungen variierten von 0,3 m für Wassertiefen von 1,3 m bis ~ 0,8 m für Tiefen von 2,8 m. Da die Beträge der Abweichungen die angestrebte Höhengenaugkeit deutlich übersteigen, ist eine Kompensation der Refraktionseffekte notwendig. Kommerzielle Softwareprodukte beinhalten die entsprechenden Funktionalitäten nicht. Daher wurde für die weitere Prozessierung eine spezielle Software eingesetzt, welche am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung an der TU Dresden für Mehr-Medien-Szenarien entwickelt wurde /Mulsow 2010/.

3.2 Auswertung mit Refraktionskompensation

Werden Objekte durch refraktive Trennflächen unterschiedlicher optischer Medien hindurch aufgenommen, müssen die dabei

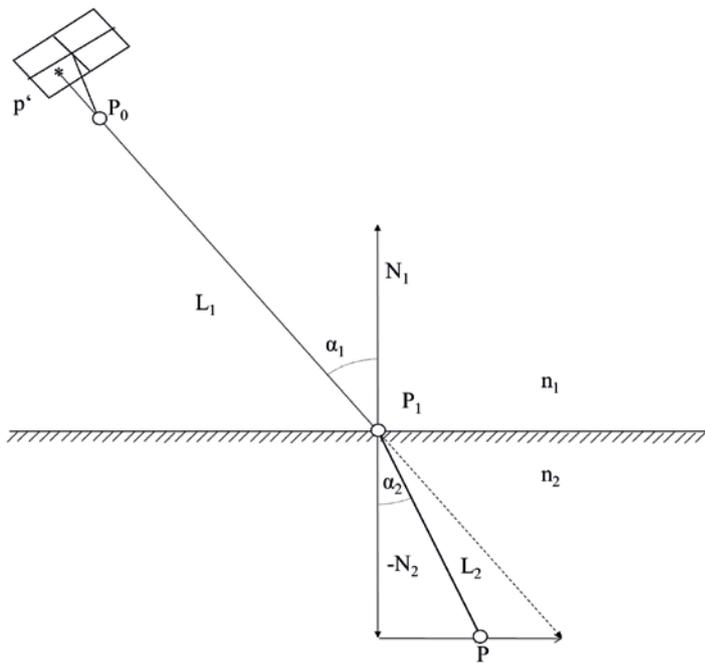


Abb. 5 | Trennflächendurchgang im Zwei-Medien-Fall

auftretenden Effekte bei der Auswertung mitberücksichtigt werden. In der konventionellen Ein-Medien-Photogrammetrie (Medium Luft) kann der optische Abbildungsvorgang als Lochkamera modelliert werden. Dabei wird angenommen, dass sich ein Objektpunkt zusammen mit dem Projektionszentrum der Kamera sowie dem zugehörigen Bildpunkt auf einer Linie befindet. Diese als Kollinearität bezeichnete Eigenschaft kann als fundamentale Grundannahme der Photogrammetrie angesehen werden. Befinden sich zwischen Aufnahmesystem und Objektpunkt weitere Medien mit unterschiedlichen Brechungseigenschaften (Mehr-Medien-Fall), gilt die Kollinearität in der Regel nicht mehr, da die Richtung des Bildstrahls beim Medienübergang verändert wird (Snelliussches Brechungsgesetz). Daher ist eine entsprechende Erweiterung des Abbildungsmodells notwendig.

In der Luftbildphotogrammetrie wurde die Mehr-Medien-Problematik seit den 1940er-Jahren diskutiert. Es wurden diverse Lösungen für die photogrammetrische Erfassung von Unterwasserstrukturen präsentiert. /Rinner 1948/ schlug die stufenweise Reduktion des Problems bis hin zum Einsatz von analytischen Plottern zur Gewässerbodenkartierung vor. Dabei sollten Refraktions-effekte entweder durch das Anbringen von Korrekturtermen an die Bildkoordinaten oder die Kamerakonstante rechnerisch kompensiert werden. Damit war es möglich, die weit verbreiteten analytischen Plotter auch zur Gewässerbodenkartierung zu verwenden. Erste praktische Anwendungen präsentierte /Tewinkel 1963/. In den darauf folgenden Jahrzehnten wurden verschiedenste Ansätze zur Kompensation von Refraktionseffekten veröffentlicht, wie die von /Freyer 1983/ oder /Butler 2002/. In der Regel werden dabei die konventionell über Vorwärtsschnitt berechneten Punktkoordinaten mit einem Zusatzterm korrigiert. Dabei müssen die innere und äußere Orientierung der Bilder sowie die Parameter der refraktiven Trennfläche bekannt sein.

Eine integrierte Lösung des Problems wurde von /Kotowski 1987/ präsentiert. In dem entwickelten Modell wird die Richtung eines Bildstrahls wie herkömmlich bildseitig durch den Bildpunkt und das Projektionszentrum festgelegt. Da die Kollinearität mit dem Objektpunkt im Mehr-Medien-Fall in der Regel nicht gegeben ist, wird anstatt des Objektpunkts der dem Projektionszentrum auf dem Abbildungsweg am nächsten liegende Trennflächendurchstoßpunkt (P_1 in Abb. 5) in das zentralperspektive Modell eingeführt. Dieses setzt wiederum voraus, dass der gesamte Abbildungspfad durch die verschiedenen Medien rekonstruiert wird (Raytracing). Die Vorteile dieses Ansatzes liegen in der Universalität, der Flexibilität sowie der einfachen Integrierbarkeit in ein Bündeltriangulationsprogramm. Eine vereinfachte Version dieses Ansatzes wurde von /Maas 2015/ für ebene Trennflächen entwickelt.

Eine Software-Implementierung des Ansatzes von Kotowski erfolgte durch /Mulsow 2010/. Da sich der Raytracing-Ansatz von Kotowski als wenig robust erwies, wurden diverse Raytracing-Algorithmen entwickelt und integriert. Die Software konnte ihre Leistungsfähigkeit bei diversen praktischen Anwendung unter Beweis stellen /Mulsow et al. 2010;/ /Mulsow et al. 2014a/. Wie bei einer konventionellen Bündellösung können alle Parameter als Unbekannte behandelt werden. Neben der inneren und äußeren Orientierung sowie den Neupunktkoordinaten können auch Trennflächenparameter und Brechungsindizes simultan mitbestimmt werden. Eine umfangreiche Beschreibung des Ansatzes erfolgt in /Mulsow et al. 2010/ und /Mulsow 2016/.

4 DATENPROZESSIERUNG

Wie eingangs erwähnt, wurden die Daten auf unterschiedliche Art und Weise prozessiert. Naheliegend war die Nutzung der in PhotoScan berechneten Orientierungen und Punktmessungen für einen Mehr-Medien-Vorwärtsschnitt zur Koordinatenberechnung von Unterwasserpunkten (siehe Abschnitt 4.1). Die Nutzung der Orientierung ist jedoch nicht unproblematisch. Daher wurden die Bilder in einem Mehr-Medien-Bündel orientiert (siehe Abschnitt 4.2). Die Strategie für die DGM-Extraktion wird im Abschnitt 4.3 erläutert.

4.1 Vorwärtsschnitt mit Refraktionskompensation

Der folgende Ansatz ist anwendbar, wenn die Orientierungen der Bilder, die Kameraparameter, die Trennfläche sowie der Brechungsindex des Zielmediums bereits vorliegen. Wie bereits oben erläutert, können die Oberflächenpunkte von Unterwasserstrukturen dann über einen Mehr-Medien-Vorwärtsschnitt bestimmt werden. Ausgehend vom Bildraum kann der Bildstrahl in den Objektraum verlängert werden. Im Schnittpunkt des Bildstrahls mit der Trennfläche Wasseroberfläche (Gerade-Ebenen-Schnitt) lässt sich über folgende Formel dessen Richtungsänderung berechnen /Glassner 1989/:

$$L_2 = \frac{L_1}{n} + \left(\frac{c}{n} - \sqrt{1 + \frac{1}{n^2} (C^2 - 1)} \right) N_1,$$

mit

$$C = -N_1 \cdot L_1 \text{ und } n = \frac{n_2}{n_1}. \quad (1)$$

L_1 = normalisierter Richtungsvektor des eintreffenden Strahls,
 L_2 = Richtungsvektor des ausgehenden Strahls (nicht normiert),
 N_1 = Flächennormale von Trennfläche T_1 in P_1 ,
 n = relativer Refraktionsindex.

Es kann also für jeden im Bild gemessenen Unterwasserpunkt ein Bildstrahl im Zielmedium Wasser berechnet werden. Als Ursprung wird der Schnittpunkt mit der Wasseroberfläche und als Richtung der gebrochene Bildstrahl eingesetzt. Über einen einfachen Geradenschnittalgorithmus können dann aus mindestens zwei korrespondierenden Bildstrahlen die Punktkoordinaten berechnet werden.

Wie oben bereits erwähnt, setzt dieses Verfahren korrekt bestimmte Orientierungs- und Kameraparameter voraus. Eine Analyse der in PhotoScan berechneten Orientierungen zeigte, dass diese nicht den Genauigkeitsanforderungen genügten. Die nicht berücksichtigte Refraktion sorgte für eine Verfälschung der Orientierungsparameter von Bildern mit überwiegender Gewässerüberdeckung sowie eine Beeinflussung der Parameter der radialsymmetrischen Verzeichnung. Letztere begründen sich aus der starken Korrelation von Refraktion und Verzeichnung bei Bildblöcken mit Aufnahmerichtungen ähnlich zur Normalenrichtung der Trennfläche und kleinen Wassertiefen relativ zur Flughöhe /Freyer et al. 1986/. Daher war es notwendig, die Orientierungen innerhalb einer Mehr-Medien-Bündeltriangulation zu bestimmen.

4.2 Mehr-Medien-Bündel

Zunächst wurde das vorliegende Datenmaterial hinsichtlich des Umfangs reduziert. Unschärfe Bilder und überbelichtete bzw. unterbelichtete Aufnahmen wurden aussortiert. Zudem wurden nur Aufnahmen im Bildblock belassen, welche für die geomorphologischen Analysen relevante Gebiete beinhalten (siehe *Abb. 6*).

Zunächst wurde der Block in LPS 9.3 (ERDAS, Hexagon) bearbeitet. Im Ergebnis standen automatisch generierte Verknüpfungspunkt-Messungen, manuell gemessene Passpunkte sowie Näherungswerte für die Orientierungen zur Verfügung. Danach erfolgte eine semi-automatische Klassifizierung der Unterwasser-Punkte. In Summe wurden 41 Bilder ausgewertet. Sechs Bilder weisen eine Wasserüberdeckung von mind. 70 % auf. Die stabile Verknüpfung gewährleisten ~ 900 Verknüpfungspunkte (davon ~ 150 Unterwasserpunkte).

Circa 8000 Bildmessungen wurden der weiteren Verarbeitung im Mehr-Medien-Bündel übergeben. Die Bündeltriangulation erfolgte in unterschiedlichen Parameterkonfigurationen:

- Ausgleichung mit sämtlichen Bildmessungen, alle Punkte als Ein-Medien-Punkte (Landpunkte) behandelt.
- Triangulation auf Basis der auf Land gemessenen Punkte, nur Bilder mit mind. 70 % Landüberdeckung.

- Ausgleichung mit festgehaltenen Kamerakalibrierparametern (aus Durchlauf II) und fixierten Bildorientierungen von bereits in Durchlauf II berechneten Bildern, Unterwasserpunkte als Mehr-Medien-Punkte behandelt.

- Simultane Bestimmung aller Unbekannten (sämtliche Orientierungen und Kameraparameter), Unterwasserpunkte als Mehr-Medien-Punkte behandelt

Die Mitbestimmung der Ebenenparameter der Wasseroberfläche sowie des Brechungsindex von Wasser schlug auf Grund von hohen Korrelationen zwischen den genannten Parametern und den Orientierungen (äußere und innere) fehl. Ursächlich dafür sind die geringen Einfallswinkel der Bildstrahlen (max. ~ 20° relativ zur Ebenennormale) sowie das geringe Verhältnis von Wassertiefen zu Aufnahmeentfernung.

Die wichtigsten Ergebnisse der einzelnen Berechnungsdurchläufe sind in *Tab. 1* aufgeführt. Anhand der mittleren Abweichungen der Höhen der Unterwasser-Kontrollpunkte kann Parameterkonfiguration Nr. III als am geeignetsten identifiziert werden.

Beim Vergleich der inneren Genauigkeiten der Koordinaten der Unterwasserpunkte fallen die niedrigen Werte für Konfiguration Nr. I auf. Dies kann mit den besseren Schnittgeometrien für diese Punkte bei Nichtberücksichtigung der Refraktion begründet werden. Da die Bildstrahlen beim Eintritt in das optisch dichtere Medium Wasser zur Oberflächennormale hin gebrochen werden, verringert sich zwangsläufig der Schnittwinkel von homologen Abbildungsgeraden /Maas 2015/. Im Durchlauf I wurden die Unterwasserpunkte wie refraktionsfreie Landpunkte behandelt und daher liegen dann größere Schnittwinkel vor. Nichtsdestotrotz sind die in Berechnung I ermittelten Höhen von Unterwasserpunkten systematisch verfälscht, wie die RMS-Werte (Root Mean Square) an den Kontrollpunkten zeigen. Wie erwartet, liegen die Restklaffungen der Bild-

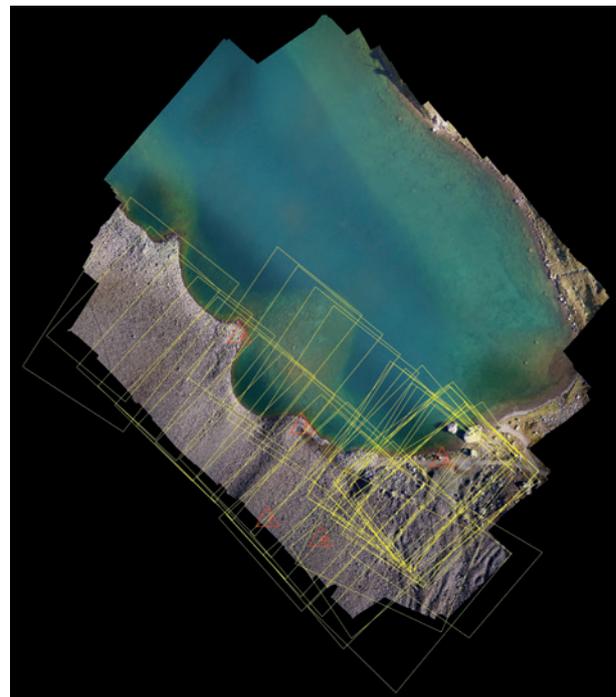


Abb. 6 | Reduzierter Bildblock, welcher im Mehr-Medien-Bündel prozessiert wurde

Genauigkeitsparameter	Parameter-Konfiguration Nr.			
	I	II	III	IV
s_0	0,48 px	0,47 px	0,49 px	0,49 px
RMS $x' y'$ Land	0,43 px/0,44 px	0,42 px/0,43 px	0,42 px/0,43 px	0,43 px/0,44 px
RMS $x' y'$ Wasser	0,44 px/0,43 px/	—	0,51 px/0,51 px	0,46 px/0,46 px
c_k	20,443 mm	20,467 mm	20,467 mm	20,441 mm
x_H	-0,0027 mm	-0,0018 mm	-0,0018 mm	-0,0030 mm
y_H	0,0584 mm	0,0552 mm	0,0552 mm	0,0587 mm
RMS X/Y/Z Land	1,7 cm/1,4 cm/4,4 cm	1,5 cm/1,2 cm/3,8 cm	1,5 cm/1,2 cm/3,8 cm	1,7 cm/1,4 cm/4,4 cm
RMS X/Y/Z Wasser	1,0 cm/1,7 cm/4,4 cm	—	0,9 cm/1,6 cm/5,3 cm	1,0 cm/1,8 cm/6,0 cm
Kontrollpunkte Unterwasser				
RMS Z	2,9 cm	—	3,5 cm	4,0 cm
RMS $Z_{\text{soll}} - Z_{\text{ist}}$	65,8 cm	—	11,8 cm	14,5 cm

Tab. 1 | Resultate der einzelnen Berechnungsdurchläufe

messungen von Unterwasserpunkten über den von Landpunkten. Dies kann zum einen mit der schlechteren Abbildungsqualität (Dispersion, Lichtabfall etc.) und zum anderen mit nicht kompensierten Restsystematiken (variierender Brechungsindex) begründet werden.

4.3 DTM-Generierung für Unterwasserbereiche

Analog zu etablierten Verfahren zur Geländemodellextraktion wurden zunächst die Bilder paarweise in Stereonormalbilder umgewandelt. Die somit von Y-Parallaxen weitestgehend befreiten Bildpaare erleichtern die Suche von homologen Punkten. Im Mehr-Medien-Fall ist diese Parallaxenfreiheit auf Grund der Refraktion nicht gegeben, da die Kernlinien als Kurven abgebildet werden. In dem vorliegenden Fall (Aufnahmerichtung nahezu parallel zur Oberflächennormalen der Trennfläche, geringe Wassertiefe im Vergleich zum Aufnahmeabstand) ist dieser Effekt hinreichend klein. Lokal kann daher die Kernlinie als Gerade angesehen werden.

Angelehnt an Standard-Matchingverfahren wurden die Suchprozesse hierarchisch gestaltet (Bildpyramiden-Ansatz). Ausgangspunkt ist ein in der Auflösung um den Faktor 5 verringertes Bildpaar. Das Referenzbild wurde zunächst in ein Zellenraster (75×50) unterteilt. Für jede Zelle erfolgte dann die Bestimmung des besten Merkmalspunkts (Harris-Operator). Diese Vorgehensweise wurde wegen einer möglichst vollständigen Erfassung des Messgebiets gewählt. Eine ausschließliche Nutzung der besten globalen Merkmalspunkte hätte zu Modell-Lücken in kontrastarmen Unterwasserbereichen geführt. Die extrahierten Harris-Punkte wurden dann über Least Squares Matching (LSM) im Stereopartner identifiziert und subpixelgenau vermessen (Patch-Größe 21×21 Pixel, Verschiebung in x und ein Maßstabsparameter). Aus den Parallaxendifferenzen wurde eine Disparitätskarte der aktuellen Auflösungsstufe gebildet. Diese diente als Näherungswert für den Suchbereich der nächst höheren Auflösungsstufe. Dieser Vorgang wurde bis

zum Erreichen der vollen Auflösungsstufe iterativ durchgeführt. Die transformierten Bildkoordinaten der homologen Punktpaare dienten dann in einem finalen Matching-Prozess in den originalen Bildern als hochgenaue Näherungswerte. Die über LSM mit vollem Parameterumfang gewonnen Bildkoordinaten können als von Refraktionseffekten unbeeinflusst angesehen werden.

Die automatische Trennung von Land- und Unterwasserpunkten erfolgte über die Analyse der Höhenwerte, welche über konventionellen (Ein-Medien-)Vorwärtsschnitt gewonnen wurden. Nur Punkte unterhalb des bekannte Wasserspiegels wurden über Mehr-Medien-Vorwärtsschnitt (siehe Abschnitt 4.1) nochmalig bestimmt. Die Berechnung erfolgten auf Basis der in Durchlauf III bestimmten Bildorientierungen und Kameraparameter.

5 ERGEBNISSE

Das Hauptziel des Projekts bestand in der Gewinnung eines DGM für den Bereich der Lobe (siehe Abb. 1). Daher konzentriert sich die Analyse der Ergebnisse auf diesen Bereich.

Die Genauigkeit kann keineswegs als homogen angesehen werden. Wie Abb. 7 zeigt, fällt die Abbildungsqualität mit steigender Wassertiefe ab. Daraus lässt sich auch ein Abfallen der Genauigkeit ableiten. Es konnten Punkte bis zu einer Wassertiefe von ca. 3,5 m hinreichend zuverlässig bestimmt werden.

Zur Verdeutlichung des Einflusses der Refraktion auf das DGM bei Nichtbeachtung wurde zusätzlich ein zweites Modell ohne Berücksichtigung der Mehr-Medien-Effekte berechnet. Wie erwartet liegt das DGM ohne Refraktionskompensation über dem eigentlichen Gewässerboden (siehe Abb. 8 und Abb. 9). Abb. 10 verdeutlicht diesen Umstand entlang eines Profils. Die Abweichungen betragen 30 % bis 40 % der eigentlichen Wassertiefe. Die Genauigkeit des DGM kann aus dem RMS der Abweichungen an den Kontrollpunkten mit 12 cm (siehe Tab. 1) abgeschätzt werden.

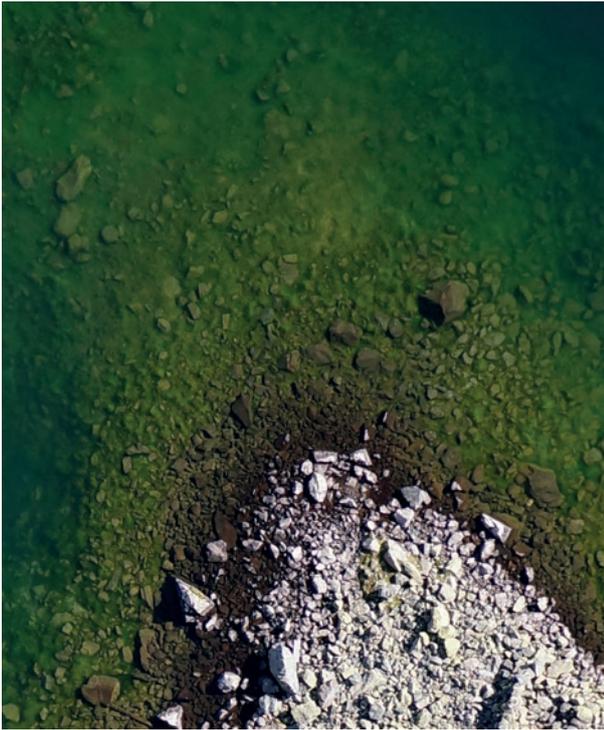


Abb. 7 | Variierende Abbildungsqualität von Land- und Unterwasserstrukturen

Zu Analysezielen wurde das DGM mit der modellierten Wasseroberfläche verschnitten und die erhaltene Linie in die Bilder projiziert. Aus dem visuellen Vergleich von berechneter und abgebildeter Wasserlinie kann auf die Stimmigkeit der Ergebnisse geschlossen werden. In *Abb. 7* und *Abb. 8* lässt sich das gute Zusammenpassen der Uferlinien erkennen.

6 FAZIT UND AUSBLICK

Der vorliegende Beitrag versucht dem potenziellen Anwender einen photogrammetrischen Workflow für die Generierung von Oberflächenmodellen von Unterwasserformationen aus Luftbildern an die Hand zu geben. Es konnte verdeutlicht werden, dass Refraktionseffekte unbedingt bei der Punktberechnung mitberücksichtigt werden müssen. Leider bieten kommerzielle Softwarelösungen keine entsprechenden Funktionalitäten. Daher wurde ein spezielles Mehr-Medien-Bündelprogramm genutzt. Die mit steigender Wassertiefe abfallende Abbildungsqualität sowie Refraktionseffekte erforderte die Anpassung bekannter Zuordnungsstrategien. Die Genauigkeit der bestimmten Unterwasserpunkte liegt wie erwartet unter denen an Land. Nichtsdestotrotz liegt die evaluierte Höhengenaugkeit mit einem RMS von 12 cm über denen anderer optischer Verfahren (z. B. Laserbathymetrie).



Abb. 8 | DGM aus Vorwärtsschnitt mit Refraktionskompensation, die magentafarbene Linie markiert die Schnittlinie von DGM und Wasseroberfläche

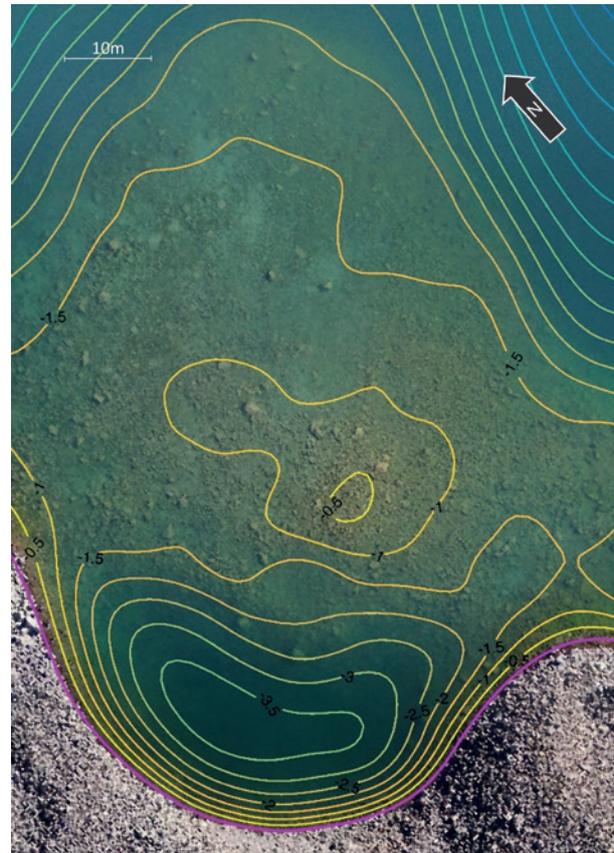


Abb. 9 | DGM aus konventionellem Vorwärtsschnitt; die Wassertiefen sind systematisch verfälscht

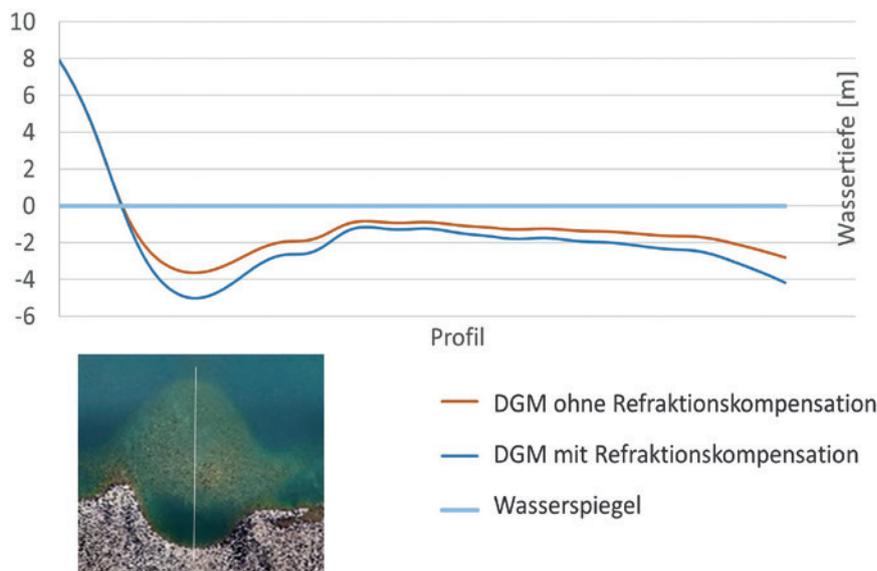


Abb. 10 | Vergleich der mit und ohne Refraktionskompensation generierten DGM-Höhen entlang eines Profils

Im Verlauf des Projektes wurden einige Möglichkeiten zur Verbesserung identifiziert. Bereits bei der Flugplanung sollten die speziellen Anforderungen an eine Unterwasserpunktbestimmung berücksichtigt werden. Für größere Triangulationswinkel sollten Objektive mit größerem Öffnungswinkel zum Einsatz kommen. Denkbar wäre auch die Nutzung von Schrägaufnahmen. Hier ist jedoch zu beachten, die Aufnahmerichtung nicht zu sehr aus der Lotrechten zu schwenken, da ansonsten Welleneffekte und Totalreflexionen die Abbildungsqualität zu stark abfallen lassen. Für eine stabilere Lagerung des Blocks sowie für eine durchgreifende Kontrolle der Ergebnisse sollten Passpunkte am Gewässerboden signalisiert und aufgemessen werden. Weiterhin sollten die Möglichkeiten der automatischen Extraktion der Wasserlinie in den Bildern untersucht werden. Wie bereits in den Abbildungen verdeutlicht, kann anhand der Helligkeits- und Farbunterschiede auf die Grenzlinie zwischen Wasser und Ufer geschlossen werden (siehe auch /Kröhnert et al. 2017/ und /Mulsow et al. 2014b/. Gute Näherungswerte für die Lage im Bild lassen sich aus dem Schnitt des DGM mit der Wasseroberfläche bereitstellen. Die extrahierte Uferlinie könnte dann in der Bündelblockausgleichung als Höhenpasspunktlinie mitgenutzt werden.

LITERATUR

- Bühler, Y.; Adams, M. S.; Bösch, R.; Stoffel, A. (2016): Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UASs): potential and limitations. In: *The Cryosphere* 10(2016)3, 1075–1088.
- Butler, J.; Lane, S.; Chandler, J.; Porfiri, E. (2002): Through-Water Close Range Digital Photogrammetry in Flume and Field Environments. In: *The Photogrammetric Record* 17(2002), 419–439. doi:10.1111/0031-868X.00196.
- Fryer, J. G. (1983): Photogrammetry through shallow water. In: *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry and Surveying* 38(1983), 25–38.
- Fryer, J. G.; Fraser, C. S. (1986): On the calibration of underwater cameras. In: *The Photogrammetric Record* 12(1986)67, 73–85.
- Glassner, A. S. (1989): *An Introduction to Ray Tracing*. Academic Press, London.
- Haeberli, W. (1975): Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). *Mitteilungen der Versuchs-*

anstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich 17, Zurich, 221 S.

Kenner, R.; Phillips, M.; Hauck, C.; Hilblich, C.; Mulsow, C.; Buhler, Y.; Stoffel, A.; Buchroithner, C. (2017): New insights on permafrost genesis and conservation in talus slopes based on observations at Flüelapass, Eastern Switzerland. In: *Geomorphology* 290(2017), 110–113.

Kotowski, R. (1987): Zur Berücksichtigung lichtbrechender Flächen im Strahlenbündel. *Schriftenreihe der DGK, Reihe C*, 330. München.

Kröhnert, M.; Meichner, R. (2017): Segmentation of environmental time lapse image sequences for the determination of shore lines captured by hand-held smartphone cameras. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W4* (2017), 1–8.

Maas, H.-G. (2015): On the Accuracy Potential in Underwater/Multimedia Photogrammetry. In: *Sensors* 15(2015)8, 18140–18152. doi:10.3390/s150818140, 2015.

Mulsow, C. (2010): A flexible multi-media bundle approach. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium*, Newcastle upon Tyne, UK.

Mulsow, C.; Maas, H.-G. (2014a): A universal approach for geometric modeling in underwater stereo image processing. *Computer Vision for Analysis of Underwater Imagery (CVAUI), ICPR Workshop*, Stockholm 2014.

Mulsow, C.; Koschitzki, R.; Maas, H.-G. (2014b): Photogrammetric monitoring of glacier margin lakes. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*.

Mulsow, C. (2016): Ein universeller Ansatz zur Mehrmedien-Bündeltriangulation. In: Luhmann, Th.; Schumacher, Chr. (Hrsg.): *Photogrammetrie – Laserscanning – Optische 3D-Messtechnik. Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2016*. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Rinner, H. (1948): Problems of two medium photogrammetry. In: *Photogrammetric Engineering* 35(1948)2, 275–282.

Tewinkel, G. C. (1963): Water depths from aerial photographs. In: *Photogrammetric Engineering* 29 (1963), 1037–1042.

Dipl.-Ing. Christian Mulsow

INSTITUT FÜR PHOTOGRAMMETRIE UND
FERNERKUNDUNG, TU DRESDEN

Helmholtzstr. 10 | 01062 Dresden
christian.mulsow@tu-dresden.de



Dr. Robert Kenner

WSL-INSTITUT FÜR SCHNEE- UND
LAWINENFORSCHUNG SLF,
DAVOS, SCHWEIZ

robert.kenner@slf.ch

