

Bathymetrischer Tiefenmesser zur UAV-gestützten Erzeugung von Gewässerprofilen

Ein Beitrag von MARTIN PFENNIGBAUER

Der Laserentfernungsmesser RIEGL BDF-1 wurde speziell für bathymetrische Vermessungsaufgaben entwickelt. Von einem UAV aus betrieben, ist das kompakte und leichte Gerät dafür geeignet, Wasseroberfläche und Boden für die Erstellung von Gewässerprofilen zu erfassen. Der Sensor besteht aus einem Laserentfernungsmesser, einer Neigungskompensation, einer IMU/GNSS-Einheit mit Antenne, einer Steuereinheit und er unterstützt die Ansteuerung externer Kameras. Der Laserentfernungsmesser sendet Laserpulse mit einer Pulswiederholrate von 4 kHz aus. Das Echosignal für jeden Laserpuls wird digitalisiert und aufgezeichnet. Nach der Datenerfassung werden die Wellenformen von einem Algorithmus verarbeitet, der auch automatisch Wasseroberfläche, Wassersäule und Bodenziele klassifiziert. Das Gerät liefert auch bei geringen Wassertiefen zuverlässige Messergebnisse mit hoher Genauigkeit.

Autor

Dr. Martin Pfennigbauer ist Produktmanager bei der RIEGL Laser Measurement Systems GmbH in Horn, Österreich.

mpfennigbauer@riegl.com

Laserbathymetrie | Laserentfernungsmesser | BDF-1 | RiCOPTER | BathyCopter | Wellenformverarbeitung

1 Einleitung

Die fluggestützte Laserbathymetrie ist ein sehr anspruchsvolles Gebiet innerhalb des Laserscanning. In den letzten Jahren hat sich eine deutliche Verschiebung von großen Instrumenten, die auf maximale Tiefenleistung abzielen, hin zu kompakteren Lösungen vollzogen, die ihre begrenzte Eindringtiefe durch deutlich höhere räumliche Auflösung und Flexibilität kompensieren. Dies ermöglicht auch den Betrieb von kleineren Flugzeugen aus. Der Einsatz auf unbemannten Flugzeugen ist der nächste wichtige Schritt und wurde bereits erfolgreich demonstriert (z. B. Pfennigbauer 2013; McLean 2015). Im Jahr 2015 präsentierte RIEGL eine neuartige Lösung für die hydrographische Vermessung mit einem sUAV (small UAV), den RIEGL BDF-1. Um den Anforderungen an geringes Gewicht und Volumen gerecht zu werden, wurden spezifische Konstruktionselemente eingesetzt. Zum einen beschränkt sich die Ablenkung des Laserstrahls auf eine aktive Neigungskompensation, die zu einem mehr oder weniger konstanten Einfallswinkel des Laserstrahls auf die Wasseroberfläche führt. Zweitens wurde ein innovatives optisches Design gewählt, um einen augensicheren Betrieb

eines nicht abgelenkten, sichtbaren grünen Lasers zu ermöglichen, der aus geringer Höhe betrieben wird. Drittens wurde eine Aufzeichnung der Echowellenform für den gesamten Messbereich implementiert, was eine Mittelwertbildung vor der Anwendung einer Entscheidungsschwelle (pre-detection averaging) in der Nachverarbeitung der Daten erlaubt und somit eine Leistungssteigerung ermöglicht, die die moderate Laserleistung und Empfängerapertur ausgleicht. Diese drei Maßnahmen führen zu einem Leistungsumfang, der mit der Klasse der sogenannten topobathymetrischen Laserscanner vergleichbar ist. Abhängig vom Bodenreflexionsgrad und der gewählten Wellenform wird eine mittlere Eindringtiefe deutlich über einer Secchi-Tiefe erreicht.

2 Messgerät

2.1 Bathymetrischer Laserentfernungsmesser

Der RIEGL BDF-1 ist ein Laserentfernungsmesser, der speziell für die Profilerzeugung bei bathymetrischen Vermessungsaufgaben entwickelt wurde (Riegl 2017a). Das Gerät ist kompakt und leicht genug, um von einem UAV aus betrieben werden zu können. Das Instrument besteht aus einem Laserentfernungsmesser mit Neigungskompensator, einer IMU (Inertial Measurement Unit) und GNSS (Global Navigation Satellite System) und kann mit bis zu zwei externen Digitalkameras ausgestattet werden.

Das Gerät sendet Laserpulse mit einer Wellenlänge von 532 nm bei einer Pulswiederholrate von 4 kHz aus. Der BDF-1 ist für den Betrieb aus niedrigen Höhen bei moderaten Fluggeschwindigkeiten konzipiert, wie sie bei Vermessungseinsätzen mit UAV oder RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) vorkommen. Der Abstand der Messungen

Spezifikationen des RIEGL BDF-1

Laserklasse	Klasse 2M nach IEC 60825-1:2014
Betriebsflughöhe	10 bis 40 m über dem Wasserspiegel
Messrichtung	abwärts gerichtet, 15° vom Nadir entfernt
Aktive Neigungskompensation	24°-Bereich
Erreichbare Secchi-Tiefe vs. Messrate in 15 m Flughöhe über der Wasseroberfläche für hohen Reflexionsgrad des Bodens	> 1,0 @ 4000 Messwerte/Sekunde (Einzelimpuls) > 1,2 @ 400 Messwerte/Sekunde (10 Impulse gemittelt) > 1,5 @ 40 Messwerte/Sekunde (100 Impulse gemittelt)
Kamera(s)	Sony Alpha 6000
IMU/GNSS-Einheit	Applanix APX-15 UAV
Betriebstemperatur	+10 °C bis +40 °C

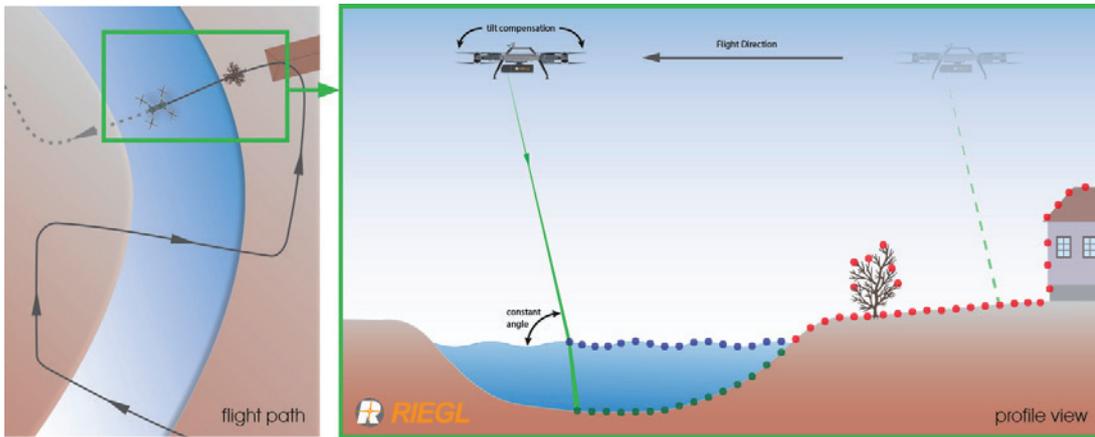


Abb. 1: Messprinzip des BDF-1

am Boden liegt im Bereich zwischen 1 cm und 10 cm, abhängig von der Fluggeschwindigkeit und der Mittelungsrate. Die wichtigsten Spezifikationen sind in der [Tabelle](#) aufgeführt (Riegl 2017b).

Durch ein innovatives optisches Design kann das Gerät als Laserprodukt der Klasse 2M eingestuft werden. Anders als bei herkömmlichen koaxialen Ausführungen, bei denen sich der Sender in der Mitte des Empfängers befindet, ist der Sendestrahl des BDF-1 ein Ring, der die Empfängeröffnung umschließt. Der Strahl wird auf eine Spotgröße von 3 cm in ca. 20 m Entfernung fokussiert. Dies führt zu einem optimierten Kompromiss zwischen der Begrenzung der Leistungsdichte, um ein gewisses Maß an Augensicherheit bei gleichzeitig guter räumlicher Auflösung zu gewährleisten.

Das Messprinzip des BDF-1 bei Betrieb mit einem UAV ist in [Abb. 1](#) dargestellt: Das UAV führt eine mäandernde Flugbahn über einem Binnengewässer (Fluss, Kanal oder See) oder einer Küstenregion durch, während der BDF-1 abwärts misst. Auf diese Weise werden Profile der Wasseroberfläche, des Bodens sowie der umgebenden Landschaft erzeugt. Die Mehrzielfähigkeit des Entfernungsmessers wird nicht nur zur Trennung der Wasseroberfläche vom Boden, sondern auch zur Durchdringung der Vegetation genutzt.

Das IMU/GNSS-Subsystem speist den Neigungswinkel der Plattform in Echtzeit in die Steuerung der Neigungskompensation ein, um einen konstanten Winkel relativ zum Nadir in Richtung der Instrumentenachse (in der Regel die Flugrichtung) aufrechtzuerhalten. Dies ermöglicht eine geringe Variation des durch den Mechanismus definierten Einfallswinkels des Laserstrahls auf die Wasseroberfläche und vermeidet somit spiegelnde Reflexionen von der Wasseroberfläche. Starke Echosignale von der Wasseroberfläche würden den Empfänger ansonsten sättigen und die Empfindlichkeit gegenüber schwachen Signalen vom Gewässerboden verringern.

Die Messdaten des Laserentfernungsmessers und des IMU/GNSS werden auf einer SD-Karte gespeichert, die nach dem Flug entnommen werden kann, um die Daten zu übertragen. Jedes 100. Echosignal wird in einen Kanal mit reduzierter Empfindlichkeit eingespeist und sofort über eine

Online-Wellenformverarbeitung ausgewertet. Die gesamten digitalisierten Echosignale für alle Messungen werden für die gesamte Reichweite von 50 m ohne Anwendung einer Schwelle gespeichert. Das bedeutet, dass die Mittelung der Wellenformen vor der Detektion in der Nachbearbeitung durchgeführt werden kann, was die Tiefenleistung erhöht.

2.2 UAV-Plattform

Das für die in diesem Beitrag vorgestellten Experimente eingesetzte UAV ist der RIEGL RiCOPTER, ein batteriebetriebener Octocopter mit einer maximalen Startmasse (MTOM) von 25 kg und einer Flugdauer von bis zu 30 Minuten bei voller Nutzlast. Es verfügt über eine redundante Flugsteuerung mit separaten, von der Sensor-Nutzlast unabhängigen Sensoren zur Positions- und Lageregelung. Die Sensor-Nutzlast beträgt bis zu 6 kg. Der BDF-1 und der RiCOPTER mit der Nutzlast des BDF-1-Sensors im Betrieb sind in [Abb. 2](#) dargestellt.

2.3 Lasermessgerät für ergänzende 3D-Daten

Für die in diesem Beitrag vorgestellten Experimente werden die bathymetrischen Profile durch einen konventionellen topographischen Laserscanning-Datensatz ergänzt, der ebenfalls von derselben UAV-Plattform stammt. Dazu wird unmittelbar vor oder nach den Flügen mit dem BDF-1 ein RIEGL VUX-1UAV (vgl. [Abb. 2](#)), ein hochmoderner UAV-Laserscanner für Vermessungsaufgaben (Riegl 2017c), mit demselben RiCOPTER geflogen. Dies liefert 3D-Referenzdaten des den Wasserkörper umgebenden Gebietes, was für die Interpretation und Verortung der BDF-1-Profile sehr wertvoll ist.



Abb. 2: RIEGL BDF-1 (links), RiCOPTER mit BDF-1 im Flug (Mitte), RIEGL VUX-1UAV (rechts)

Literatur

- Guenther, Gary C. (1985): Airborne laser hydrography, system design and performance factors; NOAA professional paper series, National Oceanic and Atmospheric Administration, 385 S.
- McLean, John W. (2015): Bathymetric Mapping from a Small UAV; Sea Technology, August 2015
- Pfennigbauer, Martin (2013): Laser scanner systems for hydrographic surveying – above and below water surface; Workshop bei der Ocean Business, Southampton, 9. bis 11. April 2013
- Phillips, D. M.; B. W. Koerber (1984): A theoretical study of an airborne laser technique for determining sea water turbidity; Australian Journal of Physics, Nr. 37, S. 75-90
- Riegl (2017a): RIEGL BDF-1, Data Sheet; RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 3. August 2017
- Riegl (2017b): BathyCopter, Preliminary Info Sheet; RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 8. September 2017
- Riegl (2017c): RIEGL VUX-1UAV, Data Sheet; RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 1. September 2017
- Wagner, Wolfgang; Andreas Ullrich, Vesna Ducic, Thomas Melzer, Nick Studnicka (2006): Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner; ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 60, Nr. 2, S. 100-112

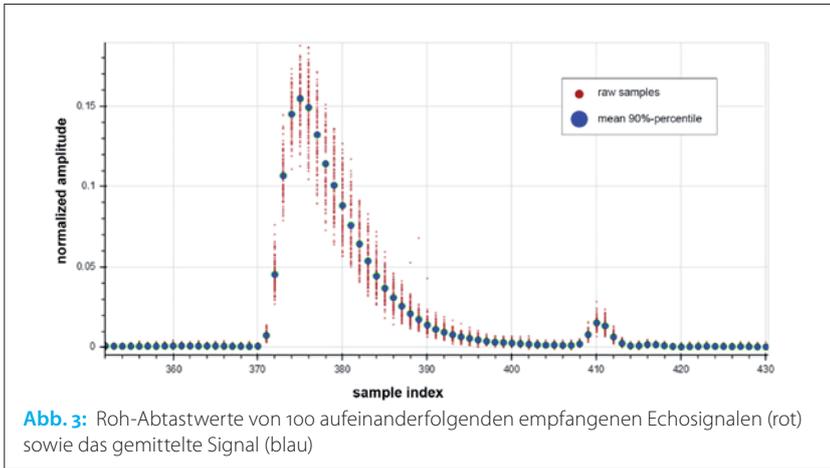


Abb. 3: Roh-Abtastwerte von 100 aufeinanderfolgenden empfangenen Echosignalen (rot) sowie das gemittelte Signal (blau)

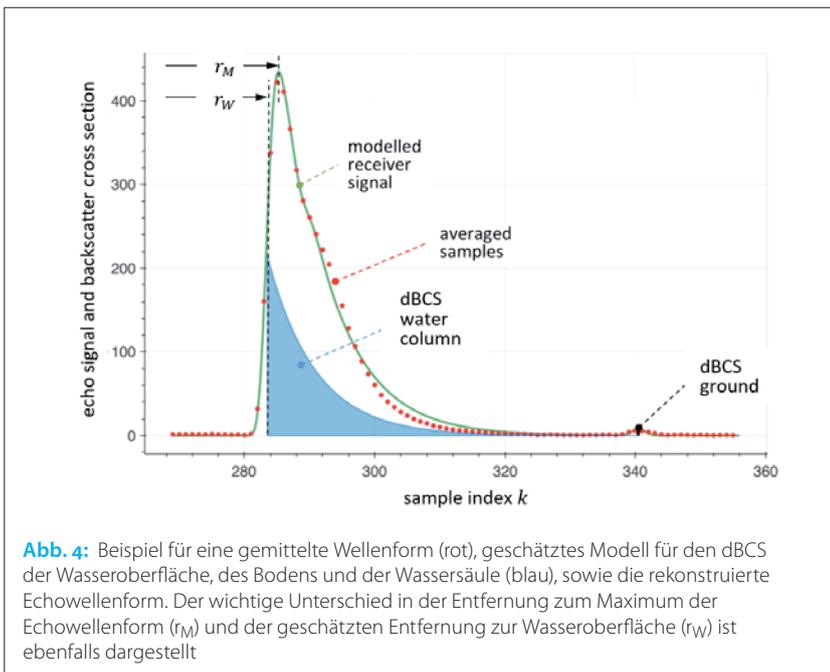


Abb. 4: Beispiel für eine gemittelte Wellenform (rot), geschätztes Modell für den dBCS der Wasseroberfläche, des Bodens und der Wassersäule (blau), sowie die rekonstruierte Echowellenform (r_M) und der geschätzten Entfernung zur Wasseroberfläche (r_W) ist ebenfalls dargestellt

3 Wellenformverarbeitung

Ein Laserstrahl, der aus einer Folge von Pulsen besteht, wird von einer luftgetragenen Plattform ausgesendet und auf den Boden gerichtet, wo er schließlich gestreut wird. Teile der rückgestreuten Pulse werden vom Empfänger des Instruments erfasst und in elektrische Signale umgewandelt, welche digitalisiert werden. Die Zeit, in der ein einzelner Impuls von der Plattform zu den Zielen und zurück zum Instrument wandert, ist aufgrund der bekannten Lichtgeschwindigkeit ein Maß für die Entfernung.

Abb. 5: Der auf einen RiCOPTER montierte RIEGL BDF-1 (links) während der Aufnahme über einem gefluteten Steinbruch (rechts)



Bei der Messung von Profilen von Gewässern sind die Echosignale vom Boden typischerweise sehr schwach und haben ein kleines Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR), das je nach Detektorausführung eine hohe Wahrscheinlichkeit für falsche Zielerfassungen oder eine geringe Erkennungswahrscheinlichkeit zur Folge hat. Die Detektion und die weitere Zielabschätzung können durch Aufsummierung der empfangenen Signale vor der Detektion deutlich verbessert werden. Dies setzt die Fähigkeit des Messsystems voraus, digitalisierte empfangene Wellenformen zu speichern. Der Schlüssel zu dieser Methode ist, dass die Standardabweichung der Abtastwerte infolge Rauschen proportional zu der Anzahl der gemessenen und gemittelten Wellenformen reduziert wird (Abb. 3). Voraussetzung für diesen Prozess ist, dass sich die Zielsituation während der Erfassung der konstituierenden Wellenformen nicht wesentlich verändert.

Die empfangene Wellenform kann mathematisch durch die Faltung des verteilten Rückstreuquerschnitts (distributed backscatter cross section, dBCS) des Ziels mit der Systemwellenform (Wagner et al. 2006) dargestellt werden. Der Rückstreuquerschnitt wird als Summe einer Kombination aus drei verschiedenen Komponenten, die jeweils unterschiedliche physikalische Zielmodelle repräsentieren, modelliert. Das dBCS einer homogen streuenden Wassersäule zeigt ein exponentielles Abklingverhalten (Guenther 1985; Phillips u. Koerber 1984). Eine rechteckförmige Funktion, die ein Ziel mit konstantem dBCS über einen bestimmten Bereich darstellt, gibt z. B. die Eigenschaften einer geneigten Fläche wieder, die aufgrund des Durchmessers des Laser-Footprints über eine Reihe von Entfernungen hinweg verschmiert erscheint, insbesondere bei der Anwendung der Mittelwertbildung von Wellenformen. Eine Dirac-förmige Funktion wird verwendet, um Ziele ohne Entfernungsausbreitung zu beschreiben, z. B. kleine punktförmige Ziele oder ebene Flächen senkrecht zum Laserstrahl. Das Modell des gesamten dBCS ergibt sich schließlich aus einer Kombination dieser drei Modelle.

Ein Beispiel für eine typische empfangene Wellenform ist in Abb. 4 dargestellt. Die Zielsituation wird durch einen schmalen Echobeitrag von der Wasseroberfläche, einen exponentiellen Zerfall von der Wassersäule und ein schmales Echo vom



Abb. 6: Repräsentative Profile, gewonnen mit dem RIEGL BDF-1 gemeinsam mit 3D-Punktwolke, aufgenommen mit einem RIEGL VUX-1 LiDAR in einer Flusslandschaft in Niederösterreich

Grund des Gewässers dargestellt. Oberflächen- und Bodenkomponenten werden als Dirac-Funktionen modelliert, die Wassersäule als exponentielles Segment. Das Modell des dBCS wird als durchgezogene blaue Linie dargestellt. Das durch Faltung des dBCS-Modells mit der Systemantwort abgeleitete Empfangssignal wird als durchgezogene grüne Linie dargestellt, die gemittelten Abtastwerte der Echowellenform sind durch rote Punkte dargestellt.

Bei der Zerlegung der Wellenform geht es darum, das optimale Modell für den dBCS des Ziels zu finden. Dieses Optimierungsproblem wird durch den Einsatz eines Levenberg-Marquardt-Algorithmus gelöst.

4 Experimentelle Ergebnisse

Experimentelle Daten wurden an Flüssen, Teichen und in Küstengebieten sowohl in Europa als auch den USA erhoben. Die Wasserkörper wiesen Secchi-Tiefen von ca. 1 m bis 25 m auf. Bei allen Akquisitionen wurde der RIEGL BDF-1 mit einem RiCOPTER in 15 m bis 20 m Höhe über der Wasseroberfläche betrieben (Abb. 5). Die Fluggeschwindigkeiten lagen bei ca. 5 m/s. 3D-Daten der Umgebung wurden jeweils mit dem RIEGL VUX-1 erfasst, der ebenfalls vom RiCOPTER aus betrieben wurde.

Die während der Erfassung aufgezeichneten Daten werden in der RIEGL RiPROCESS-Software verarbeitet. Die Verarbeitungsschritte umfassen: Mittelwertbildung einer wählbaren Anzahl von Wellenformen, Wellenformanalyse, Klassifizierung der detektierten Ziele, Georeferenzierung der Daten entsprechend der vom im RIEGL BDF-1 integrierten IMU/GNSS-Subsystem gelieferten Flugbahn und Anwendung der Brechungskorrektur für Messungen unterhalb der Wasseroberfläche.

Abschließend werden repräsentative Daten, die an verschiedenen Gewässern gewonnen wurden, vorgestellt. Die gewonnenen Daten über Flüsse in Niederösterreich und Oregon zeigen eine typische Anwendung des RIEGL BDF-1, wie in Abb. 6 und Abb. 7 dargestellt. Profile mit hoher räumlicher Dichte und hoher Genauigkeit können schnell und

sicher erfasst werden. Der alternative klassische Ansatz, mit einem GNSS-Empfänger an einem Stab durch das Flussbett zu waten, birgt Risiken (siehe z. B. das Steilufer in Abb. 8) und liefert nur spärliche Profile. Die mit dem Infrarot-LiDAR RIEGL VUX-1UAV gewonnenen Daten ergänzen die Profile um wertvolle Informationen, indem sie Punkte auf der Wasseroberfläche sowie hochauflösende und genaue Informationen über Ufer und Vegetation liefern. [↕](#)

Abb. 7: Daten von einem RIEGL BDF-1 (grün und cyan) in Kombination mit Daten von einem RIEGL VUX-1 (Graustufen) von einem Fluss in Oregon

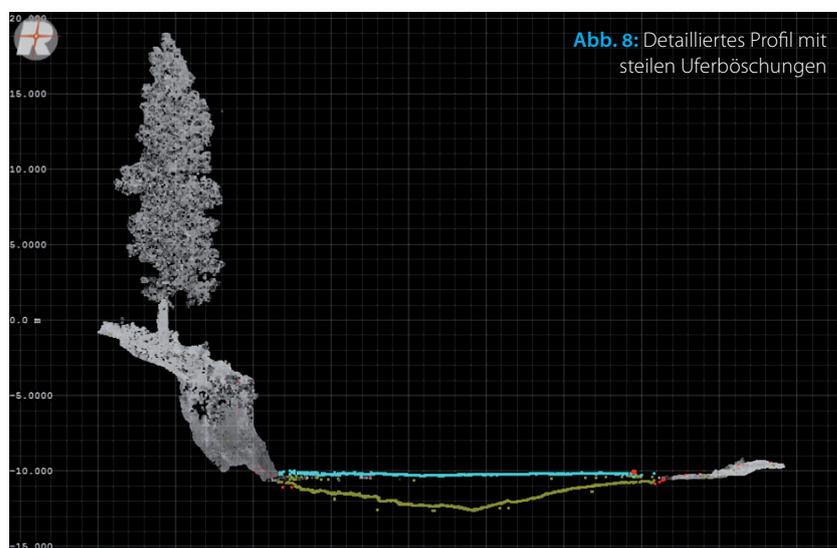
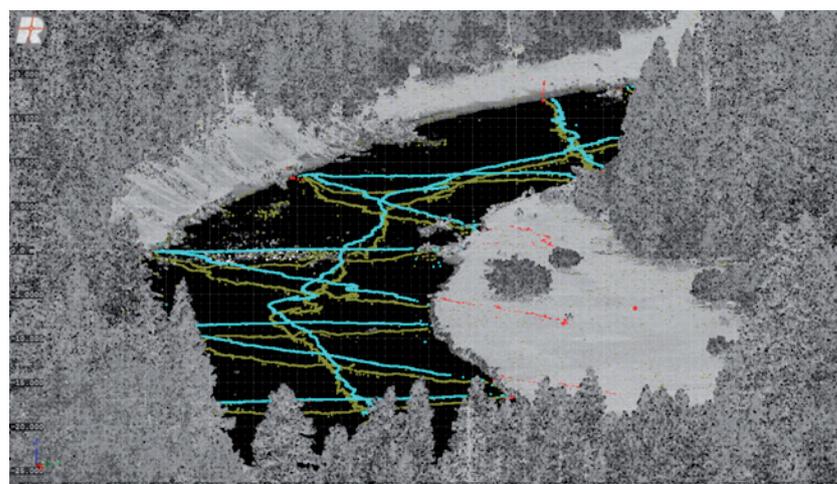


Abb. 8: Detailliertes Profil mit steilen Uferböschungen