

# Terrestrische Laser-Bathymetrie mit MS50

Autor(en): **Serantoni, Eugenio / Olgiati, Luca / Wieser, Andreas**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement =  
Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire =  
Geomatca Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio**

Band (Jahr): **113 (2015)**

Heft 10

PDF erstellt am: **23.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-583592>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Terrestrische Laser-Bathymetrie mit MS50

Terrestrische Laserscanner mit Trägerwellen im Bereich des sichtbaren Lichts eignen sich unter bestimmten Bedingungen für Messungen durch Wasser und damit für die Aufnahme von Gewässersohlen. Wir fassen am Beispiel der Leica MS50 Ergebnisse einer theoretischen und experimentellen Untersuchung zusammen, die die Verfügbarkeit und Genauigkeit derartiger Messungen mit ausgewählten Scannern zeigen sollte. In den Versuchen hat sich gezeigt, dass es möglich ist, mit diesem Instrument durch einige dm dicke Wasserschichten zu messen und dabei Standardabweichungen im Bereich weniger mm zu erreichen. Die erreichbare Genauigkeit liegt etwas über diesen Werten und ist vor allem durch die Unsicherheit der Bestimmung der Wasseroberfläche beschränkt.

*E. Serantoni, L. Olgjati, A. Wieser*

## 1. Einleitung

Airborne Laserscanning ist mittlerweile auch als Methode für die berührungslose Erfassung von Gewässersohlen etabliert, z.B. Gao (2009). Vor allem bei relativ seichten Gewässern stellt die so genannte Laser-Bathymetrie eine effiziente Alternative zur Aufnahme mit Echolotsystemen dar. Unter Umständen ist sie sogar die einzig anwendbare Methode. Ihr Einsatz ist in der Regel jedoch mit hohen Kosten und planungsbedingten Vorlaufzeiten verbunden, Genauigkeit und räumliche Auflösung sind durch Flughöhe, Strahldivergenz und weitere Parameter beschränkt, und Abschattungen durch Vegetation oder Gebäude können die Vollständigkeit der Erfassung beeinträchtigen.

Für kleinräumige und besondere Aufgabenstellungen ist die terrestrische Laser-Bathymetrie, also die Vermessung des Gewässergrundes mit einem terrestrischen Laserscanner, eine naheliegende Variante, z.B. Smith et al. (2012), Smith und Vericat (2014). Sie birgt zwei besondere Herausforderungen: (i) die Extinktion bzw. Absorption, die den maximal möglichen Signalweg im Wasser und damit die maximale Gewässertiefe bei der

Bathymetrie beschränken, und (ii) die Refraktion, insbesondere an der Luft-Wasser-Grenze, die eine rechnerische Korrektur der gemessenen Winkel und Distanzen erforderlich macht. Wie Abbildung 1 zeigt, eignen sich nicht alle Wellenlängen der optischen Strahlung gleichermaßen für die Messung durch Wasser: Während die Intensität blaugrünen Lichts mit einer Wellenlänge von ca. 500 nm erst nach ca. 30 m Lichtweg durch das Wasser um 50 % reduziert wird (Halbwertsschichtdi-

cke), reichen bei 1400 nm Wellenlänge, also nahem Infrarot, dafür bereits 0.6 mm. Im Falle der luftgestützten Bathymetrie wird dementsprechend für die Messung durch Wasser üblicherweise grünes Licht verwendet.

In der Abbildung sind die ungefähren Trägerwellenlängen ausgewählter Instrumente eingetragen. Obwohl diese Werte allein nicht ausreichen, um die maximale Wassertiefe abzuschätzen, bei der noch erfolgreich gemessen werden kann, gibt die Abbildung ganz klare Hinweise darauf, dass terrestrische Laserbathymetrie mit einzelnen Instrumenten möglich sein dürfte, mit Instrumenten, die Infrarot als Träger für das Messsignal verwenden, jedoch nicht.

Wir haben im Rahmen einer Masterarbeit Laserbathymetrie mit ausgewählten terrestrischen Laserscannern und der Leica Multistation MS50 theoretisch und experimentell untersucht. Im vorliegenden Beitrag fassen wir die Ergebnisse mit besonderer Berücksichtigung der MS50 zusammen und zeigen, dass dieses Instrument im Nahbereich und unter bestimmten Bedingungen zur Vermessung von

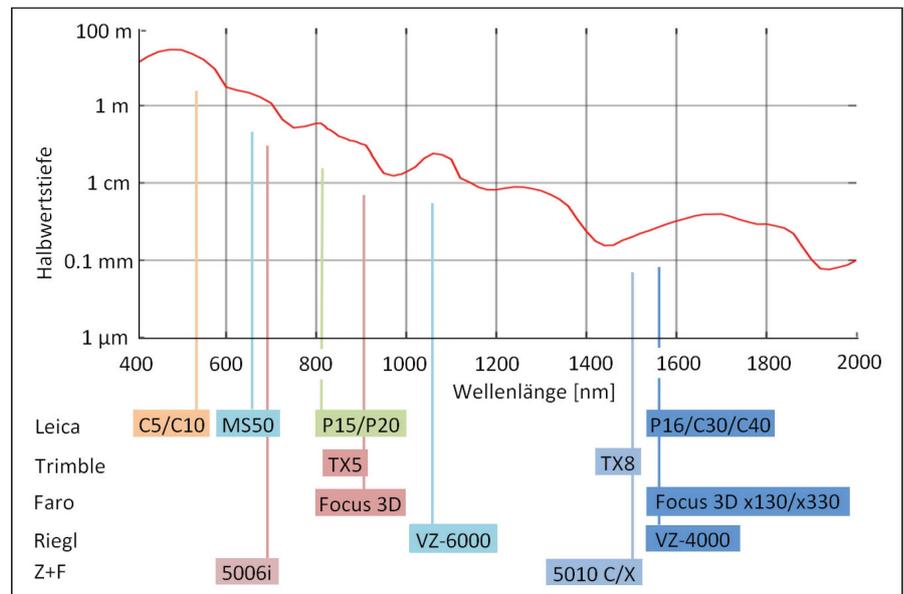


Abb. 1: Dämpfung optischer Strahlung in Wasser in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Halbwertsschichtdicke mit Daten aus Hale und Query [1973] berechnet), ungefähre Trägerwellenlänge ausgewählter terrestrischer Laserscanner. Fig. 1: Assorbimento del raggio in acqua in funzione della lunghezza d'onda (strato emivalente calcolato coi dati di Hale e Query [1973]); le lunghezze d'onda dei laser scanner scelti sono solo indicative.

1 Olgjati L. (2015) Investigation of Short-range Laser Bathymetry using Terrestrial Laser Scanners. Masterarbeit, ETH Zürich, IGP.

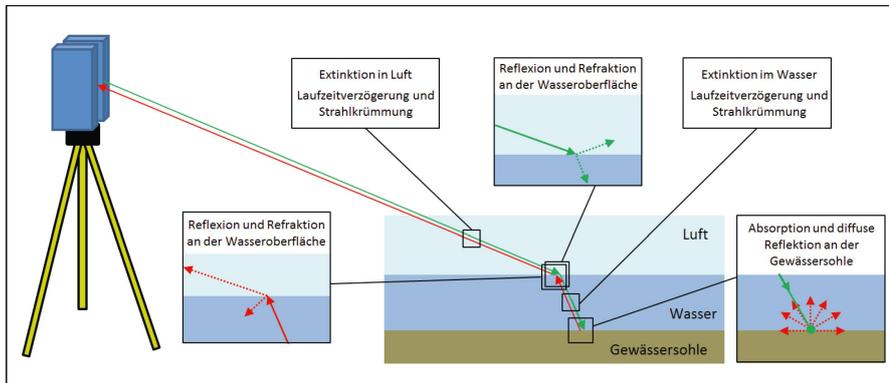


Abb. 2: Ausbreitungseffekte bei terrestrischer Laser-Bathymetrie (grün: Signalausbreitung vor Reflexion am Gewässergrund, rot: nach Reflexion am Gewässergrund).

Fig. 2: Batimetria laser terrestre: fenomeni influenzanti la propagazione del segnale (in verde il percorso del segnale sino alla riflessione sul fondale, in rosso il percorso del segnale dopo la riflessione).

Gewässersohlen durch das Wasser hindurch eingesetzt werden kann. Die experimentellen Untersuchungen wurden im Labor der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich durchgeführt, wo mit der Vermessung hydraulischer und hydrologischer Modelle auch ein realer Anwendungsfall für die untersuchte Technologie vorliegt.

## 2. Modellierung der Signalausbreitung

Das Messsignal breitet sich vom Scanner zunächst durch die Atmosphäre bis zur Wasseroberfläche aus (grün, in Abb. 2). Die Laufzeitverzögerung aufgrund der Dichte und Zusammensetzung der Luft wird durch die von EDM bekannte meteorologische Korrektur beschrieben. Bei guten Sichtbedingungen und kurzen Entfernungen (im vorliegenden Fall  $\ll 100\text{m}$ ) ist die Extinktion, also die Signalabschwächung, in der Atmosphäre vernachlässigbar, ebenso die Krümmung des Signalwegs aufgrund des Brechungsindexgradienten quer zur Ausbreitungsrichtung. Beim Auftreffen auf die Wasseroberfläche wird ein von Auftreffwinkel und Polarisation abhängiger Anteil der Strahlungsenergie reflektiert, der Rest dringt in das Wasser ein. Diese Anteile können mit Hilfe der Fresnel Gleichungen berechnet werden,

z.B. Hecht (2011). Der reflektierte Anteil steigt mit flacherem Auftreffwinkel. Für unpolarisiertes Licht und Auftreffwinkel von  $90^\circ$  (also orthogonal auf die Wasseroberfläche) bis  $12^\circ$  beträgt der reflektierte Anteil etwa 5 bis 50 %. Bei noch flacherem Auftreffwinkel wird der überwiegende Teil der Energie reflektiert. Die Änderung der Ausbreitungsrichtung am Übergang zwischen Luft und Wasser kann mit Hilfe des Snellius'schen Brechungsgesetzes modelliert werden, wenn der Einfallswinkel und der Brechungsindex des Wassers (ungefähr 1.33) bekannt sind. Dies setzt neben Luftdruck, Wassertemperatur, Salzgehalt und weiteren Parametern vor allem die Kenntnis der Wasseroberfläche relativ zum Scannerstandpunkt voraus. Sowohl die Refraktion als auch die partielle Reflexion am Übergang Luft-Wasser kann daher nur stochastisch modelliert werden, wenn die Wasseroberfläche wegen Wind und Wellen rau ist. Die Laufzeitverzögerung im Wasser ist analog zu der in Luft berechnen- und korrigierbar. Die Modellierung der Strahlkrümmung setzt die Kenntnis der Brechungsindexgradienten im Wasser voraus und gelingt numerisch mit Raytracing, wenn sie erforderlich ist. Die Signalabschwächung am Weg durch das Wasser kann mit Hilfe des Extinktionskoeffizienten (bzw. der Halbwertsschichtdicke) berechnet werden.

Am Gewässergrund wird die Strahlung im Allgemeinen diffus reflektiert, wobei es in Abhängigkeit von den Materialeigenschaften des Grundes zusätzlich zu Signalabschwächung kommt. In grober Näherung kann diese Reflexion und Abschwächung mit dem Oren-Nayar Modell beschrieben werden, z.B. Oren und Nayar (1994). Die Signalanteile, die nach der Reflexion zum Scanner zurück gelangen, unterliegen qualitativ denselben Effekten in umgekehrter Reihenfolge (rot in Abb. 2).

Die Signalabschwächung durch Extinktion sowie die Verluste durch partielle Reflexion an den Schichtgrenzen wirken sich in erster Linie auf das Signal-Rauschverhältnis und damit auf die Verfügbarkeit der Messungen (maximale mögliche Reichweite im Wasser) sowie auf die Präzision der Messwerte aus. Diese Aspekte werden hier nicht weiter theoretisch betrachtet.

Wie Abbildung 3 zeigt, wirken sich die Richtungsänderungen und Laufzeitverzögerungen durch Refraktion im Wasser dagegen sehr stark auf die Messwerte aus und müssen unbedingt durch entsprechende Reduktionen korrigiert werden. Je nach Auftreffwinkel und Wassertiefe können diese Effekte nämlich ein Vielfaches der Wasserhöhe betragen (siehe Abb. 3). Die Korrektur setzt die zumindest näherungsweise Berechnung des Schnittpunktes zwischen Signalweg und Wasseroberfläche voraus. Sie muss im Postprocessing an die betreffenden Punktwolken angebracht werden.

## 3. Experimentelle Anwendung

Um die Korrekturfunktionen und die praktische Einsetzbarkeit einer MS50 für terrestrische Laserbathymetrie zu überprüfen, wurden Aufnahmen eines Kanals im Labor der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) durchgeführt. Der Kanal (Abb. 4) ist ca. 30 m lang, an der Sohle 2 m breit, hat ein Längsgefälle von 1.7‰, konstanten Querschnitt und weitgehend homogene Oberflächen. Die MS50 befand sich etwa

3 m über der Wasseroberfläche. Durch den Aufbau im Labor konnten Referenzmessungen ohne Wasser sowie Messungen bei verschiedenen, bekannten Wasserständen durchgeführt werden. Dies liess nicht nur die Beurteilung der Präzision sondern auch der Genauigkeit der Aufnahmeresultate zu. Darüber hinaus konnten unterschiedliche Ansätze zur Ermittlung der Wasseroberfläche aus den Scans selbst, also ohne externe Zusatzinformation, erprobt werden. Im Betrieb der Anlage durch die VAW wird der Kanal auch Sedimente enthalten. Die erfolgreiche Aufnahme der Sohle mittels Laserscanning durch das Wasser hindurch reduziert den Aufwand für Versuche deutlich, weil geometrische Informationen, wie die Quantifizierung von Sedimentumlagerungen, einfach und ohne grossen Zeitverlust erhalten werden.

Zur Bestimmung einer Referenz wurde der Kanal zunächst ohne Wasser und in trockenem Zustand mit drei verschiedenen Instrumenten gescannt (Leica P15, Zoller+Fröhlich 5006i, MS50). Die resultierenden Punktwolken wurden mit Hilfe von Kugeltargets beiderseits des Kanals registriert und in Geomagic weiter bearbeitet (Ausreisserelimination, Triangulierung). Die vertikalen Abweichungen der Punkte aus den einzelnen Scans von der so abgeleiteten Referenz haben RMS-Werte von jeweils ca. 1.3 mm. Verschiedene Aufbauten, die den Kanal queren (siehe Abb. 4), schatten Teile des Kanals selbst ab. Die Punkte auf diesen Aufbauten wurden vor der Analyse aus den Scans entfernt, und in den abgeschatteten Bereichen stehen keine Referenzdaten zur Verfügung, sodass diese Bereiche auch später nicht in die Analyse einbezogen wurden. Aus Gründen der Einfachheit wurde für die vorliegenden Experimente jeweils nur von einem Standpunkt aus gescannt. Für den Vergleich von Scans, die zu unterschiedlichen Zeiten und bei unterschiedlichen Wasserständen aufgenommen wurden, haben wir ebenfalls die sechs Kugeltargets beiderseits des Kanals verwendet, die über die Dauer der Experimente hinweg aufgebaut blieben.

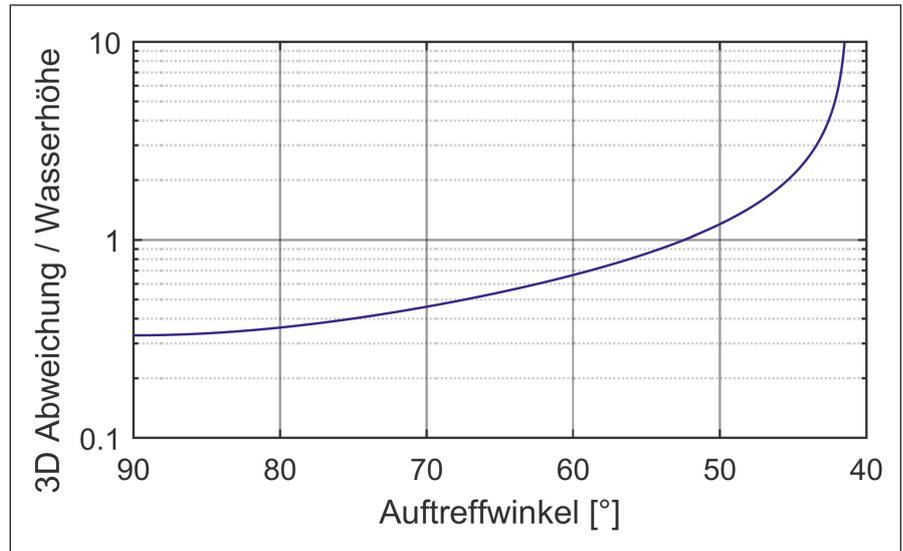


Abb. 3: 3D-Abweichung zwischen scheinbarem und wahren Punkt auf der Gewässersohle in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel bei perfekt horizontaler Wasseroberfläche und Gewässersohle.

Fig. 3: *Deviazione 3D fra i punti misurati ed i corrispondenti punti realmente sul fondale in funzione dell'angolo di incidenza nel caso in cui sia il fondale che la superficie dell'acqua siano perfettamente orizzontali.*

Abbildung 5a zeigt, dass die Punktwolke beim Scannen durch Wasser mit zunehmendem Abstand vom Scanner und damit zunehmend flacherem Winkel zwischen Laserstrahl und Wasseroberfläche immer weiter über der tatsächlichen Gewässersohle (Referenzmodell) liegt, wobei die Abweichungen hier mit 150 mm Wasserhöhe bis zu 120 mm betragen. Nach Berücksichtigung der Brechung am Übergang Luft-Wasser sowie der zusätzlichen Laufzeitverzögerung im Wasser (geometrische Korrekturen) repräsentiert die Punktwolke die Gewässersohle dagegen mit wesentlich höherer Genauigkeit (Abb. 5b). Die betreffenden Grössenordnungen und der Effekt der Korrektur sind in Abbildung 6 an einem willkürlich ausgewählten Längsprofil des Kanals veranschaulicht.

Diese experimentellen Resultate sind in Abbildung 7 statistisch zusammengefasst, wobei die Punktwolke aus Abbildung 5 dafür in Abhängigkeit der horizontalen Entfernung vom Scanner in Klassen eingeteilt und für jede Klasse Mittelwert und Standardabweichung berechnet wurde. Zusätzlich zeigt die Abbildung den Bias (Mittelwert der Abwei-

chungen) der korrigierten Höhenwerte sowie die Auftreffwinkel der Laserstrahlen auf der Wasseroberfläche. Bis zu einem Auftreffwinkel von ca. 11° (Distanz 16 m) liegen Mittelwert und Standardabweichung weitgehend unter 5 mm, im Nahbereich und bei Auftreffwin-



Abb. 4: Hydrologisches Modell eines Kanals im Labor der VAW.

Fig. 4: *Modello idraulico di un canale nel laboratorio del VAW.*

keln von über 20° entspricht die Qualität der korrigierten Punktwolke sogar annähernd jener, die bei Scan ohne Wasser erzielt wird.

Je flacher die Laserstrahlen auf die Wasseroberfläche treffen, umso grösser werden jedoch die Abweichungen. Im vorliegenden Experiment erreichen sie bei ca. 5° Auftreffwinkel, wo Messung noch immer möglich ist, bereits etwa 20% der Wassertiefe. Während die mit flacherem Winkel zunehmende Streuung der Werte zu erwarten ist, deutet die in Abbildung 7 erkennbare Systematik darauf hin, dass die geometrische Korrektur der Messdaten noch verbessert werden kann.

Die Strahlkrümmung im Wasser, die Neigung der Wassersohle, eine inkorrekte Schätzung des Brechungsindex und ungenaue Messung der Wasserhöhe erklären nach unseren bisherigen Untersuchungen weder für sich alleine noch in ihrer Überlagerung diese verbleibende Systematik. Weitere Untersuchungen werden klären, ob sie auf Wasseroberflächenrauheit (Wellen, Kräuselungen) oder auf Materialeffekte am nassen Boden zurückzuführen ist und rechnerisch noch reduziert werden kann.

Eine theoretische Abschätzung hat uns gezeigt, dass die für die Korrektur erforderliche Bestimmung der Wasseroberfläche – im Detail des Durchstosspunktes des Laserstrahls durch die Wasseroberfläche sowie der Richtung des Normalvektors der Wasseroberfläche an diesem Punkt – unter allen Einflüssen den grössten Beitrag zur Unsicherheit der korrigierten Punktkoordinaten liefert. Ansätze, die Wasseroberfläche und ihren Normalvektor aus den Punktwolken selbst zu extrahieren, etwa durch Identifikation von abrupten Änderungen der Signalintensität, durch Deformationsanalyse zwischen Punktwolken, die bei unterschiedlichen Wasserhöhen erhalten wurden, oder durch Lokalisierung von Knicken in ansonsten weitgehend planaren Teilmenge der Punktwolken, sind nur bei stehendem Gewässer mit ruhiger Wasseroberfläche (Windstille) sowie bei Oberflächen mit passenden geometrischen und radiometrischen Eigenschaften

erfolgsversprechend. Im Fall der MS50 ist es uns auch nicht gelungen, die Wasseroberfläche durch Analyse von Mehrfachreflexionen oder lokale Streuungsmasse innerhalb der Punktwolke zu identifizieren. Wir haben im obigen Anwendungsfall die Wasserhöhe mit dem Ultraschallsensor des Wasserströmungsregelungssystems gemessen und die Wasseroberfläche als flach angenommen.

Vorerst setzt die terrestrische Laserbathymetrie mit MS50 also eine ruhige und horizontale Wasseroberfläche (stehendes Gewässer) voraus, deren Lage in der Punktwolke gesondert bestimmt werden muss, etwa durch Einbringen eines Prüfkörpers (Messlatte oder ähnliches), der teilweise aus dem Wasser herausragt und sowohl unter als auch über Wasser in der Punktwolke erkennbar ist.

## 4. Zusammenfassung

Terrestrische Laserscanner mit Trägerwellenlängen im grünen bis roten Bereich des sichtbaren Lichts können im Nahbereich und mit gewissen Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit auch für Messungen durch Wasser eingesetzt werden. Wir haben das hier vor allem am Beispiel der Leica MS50 gezeigt. Bei einer Wasserhöhe von 150 mm haben wir dabei für die Erfassung der Gewässersohle durch das Wasser hindurch bei Einfallswinkeln über 11° Standardabweichungen und Verzerrungen von wenigen mm gefunden. Weitere Untersuchungen sollen helfen, die maximalen Wassertiefen in Abhängigkeit relevanter Instrumentenparameter, Wasserqualität und Bodenbeschaffenheit abzuschätzen, bei denen terrestrische Laserbathymetrie noch gelingt, sowie die Ursachen für den verbleibenden Bias zu klären.

Während dies keine neue Standardanwendung für terrestrische Laserscanner eröffnen dürfte, kann die Erweiterung des Anwendungsbereichs der Scanner gleichwohl ermöglichen, besondere Projekte effizienter zu bearbeiten. Anwendungen ergeben sich neben der oben vorgestellten Vermessung hydrologischer

Modelle voraussichtlich auch in der nahtlosen Aufnahme ufernaher Böschung- und Sohlenbereiche stehender Gewässer sowie in der Aufnahme von teilweise unter Wasser liegenden Einbauten.

### Dank

Die Autoren bedanken sich bei der VAW, insbesondere bei Herrn Fabian Friedl, für die Anregung zu dieser Untersuchung und die Unterstützung bei den Messungen.

### Literatur:

Gao J (2009) Bathymetric mapping by means of remote sensing: methods, accuracy and limitations. *Progress in Physical Geography* 33(1), 103-116.

Hale GM, Query MR (1973) Optical Constants of Water in the 200-nm to 200- $\mu$ m Wavelength Region. *Applied Optics* 12/3, 555-563.

Hecht E (2011) *Optics*, Addison Wesley, 113-116.

Oren M, Nayar SK (1994) Generalization of Lambert's reflectance model. *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 239-246.

Smith MW, Vericat D (2014) Evaluation shallow-water bathymetry from through-water terrestrial laser scanning under a range of hydraulic and physical water quality conditions. *River Res. Applic.* 39, 905-924.

Smith M, Vericat D, Gibbins C (2012) Through-water terrestrial laser scanning of gravel beds at the patch scale. *Earth Surf. Process. Landforms* 37, 411-421.

Eugenio Serantoni

Luca Olgiati

Prof. Dr. Andreas Wieser

Geosensors and Engineering Geodesy

Institute of Geodesy and Photogrammetry  
ETH Zürich

Stefano-Franscini-Platz 5

CH-8093 Zürich

wieser@geod.baug.ethz.ch