

Sohlaufnahme durch bewegte Wasseroberfläche mittels Laserscanning

Florian Hinkelammert, Fabian Friedl und Volker Weitbrecht

Zusammenfassung

Eine der Hauptaufgaben von hydraulischen Modellversuchen mit beweglicher Sohle ist die Bereitstellung von verlässlichen Informationen über die zeitliche Sohlentwicklung während charakteristischer Abflussszenarien. Die zur Verfügung stehenden Messtechniken verlangen meist trockene Modelloberflächen und erlauben keine Erfassung der Oberflächentopographie während der Abflussereignisse. Sohlaufnahmen in Zwischenstadien eines Versuchs bedingen die Entleerung der hydraulischen Modelle sowie eine aufwendige Modellsteuerung. Aufgrund dieser Versuchsunterbrüche kann zudem eine Beeinflussung der Sedimentmorphologie nicht ausgeschlossen werden. Ein an der VAW seit 2015 verfügbarer terrestrischer Laserscanner erlaubt aufgrund der verwendeten Wellenlänge die Erfassung der Sohlagen durch bewegte Wasseroberflächen und hilft somit, diese Datenlücke zu schliessen. Dazu muss bei der Datenauswertung die Brechung des Lichtstrahls beim Auftreffen auf die Grenzfläche Luft/Wasser korrigiert werden. Dynamische Entwicklungen der Sohlenmorphologie können auf diese Weise in regelmässigen Intervallen während der Versuchsdurchführung erfasst werden.

1 Einführung

Die Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich betreibt massstäbliche hydraulische Modellversuche, in welchen das laufende Geschiebe sowie die bewegliche Flusssohle mittels skaliertes Sand-Kiesmischungen oder Ersatzmaterial nachgebildet werden. Eine der Hauptaufgaben solcher flussbaulicher Modelle ist die Lieferung möglichst exakter Informationen über die Sohlentwicklung während charakteristischer Abflussereignisse.

Stand der Technik ist die Aufnahme der Sohlagen vor sowie nach einem Versuchsdurchlauf mittels Lasertriangulation (LDS) oder terrestrischem Laserscanning (TLS). Beide Messmethoden wurden für die Anwendung auf trockenen Oberflächen entwickelt und erlauben keine Erfassung der Sohlagen während der Versuchsdurchführung. Deshalb bedingen Sohlaufnahmen in Zwischenstadien eine Unterbrechung der Versuche, aufwendige Entleerungen der hydraulischen Modelle sowie die anschliessende kontrollierte Wiederaufnahme der Versuchsganglinien. Neben dem hohen Zeitbedarf lassen sich Beeinflussungen der Morphologie dadurch nicht immer ausschliessen.

Vermessungen der trockenen Modelloberflächen erlauben somit lediglich die Beurteilung der Sohlentwicklung über die gesamte Versuchsdauer sowie die aufwendige Aufnahme der Oberflächentopographie an ausgewählten Zeitpunkten der Versuche. Wichtige Informationen über dynamische Prozesse, wie die Entwicklung fortschreitender Geschiebefronten sowie die Bildung von Kolken oder Auflandungskörpern während Hochwasserspitzen, sind mit diesem Ansatz nicht verfügbar.

Für die Aufnahme der Oberflächentopographie durch bewegte Wasseroberflächen existieren im wasserbaulichen Versuchswesen keine Standardlösungen, welche den hohen Genauigkeitsanforderungen in hydraulischen Laboratorien gerecht werden. Eine Ausnahme bilden

photogrammetrische Verfahren, welche durch die Wasseroberfläche Gitterraster oder ähnliche Muster auf die Sohle projizieren (Frank und Hager, 2014). Deren Empfindlichkeit auf Oberflächenwellen erlaubt jedoch nur Messungen bei ruhiger Wasseroberfläche und schränkt die Anwendbarkeit im wasserbaulichen Versuchswesen ein. Die Aufnahme von Abflüssen in Grossmodellen setzt bei diesen Verfahren sehr kostenintensive Messeinrichtungen voraus.

Das an der VAW seit Frühjahr 2015 verfügbare TLS-Gerät "Leica ScanStation P15" erlaubt aufgrund der verwendeten Wellenlänge die Erfassung der Sohllagen durch bewegte Wasseroberflächen und schliesst diese Datenlücke. Die optische Brechung beim Auftreffen des Lichtstrahls auf die Grenzfläche Luft/Wasser muss im Zuge der Datenauswertung korrigiert werden. Auf diese Weise können dynamische Prozesse während der Versuchsdurchführung ohne Unterbrechung der Ganglinien erfasst werden. Im vorliegenden Beitrag, der in überarbeiteter Form im Journal of Hydraulic Research eingereicht wurde (Friedl *et al.*, 2016), werden ausgewählte Messergebnisse, die Korrektur der Lichtbrechung sowie die Erfahrungen der VAW in der Anwendung des P15 vorgestellt.

2 Methodik

2.1 Leica ScanStation P15

Der TLS Leica ScanStation P15 (P15) verfügt über eine Distanzgenauigkeit von ≤ 1 mm sowie eine 3D-Positionsgenauigkeit von 3 mm bei einer Messdistanz von 40 m (Leica Geosystems AG, 2015). Der P15 arbeitet mit einem Laufzeitmesssystem in Kombination mit der "Waveform Digitizing" – Technologie (WFD) von Leica. Bei der Laufzeitmessung wird vom TLS ein Lichtstrahl ausgesendet und vom Zielobjekt reflektiert. Der TLS misst die Zeitspanne zwischen der Aussendung und dem Empfang des reflektierten Signals und berechnet auf dieser Grundlage die Distanz zum Zielobjekt.

Die vom P15 verwendete Wellenlänge von 808 nm ermöglicht Messungen durch bewegte Wasseroberflächen und somit auch während dem Betrieb von hydraulischen Modellen. Durch die Gewährleistung der Laserklasse 1 ist der P15 für den alltäglichen Einsatz in wasserbaulichen Labors geeignet. Neben der Montage auf einem Dreibeinstativ kann der P15 auch über Kopf (z.B. an einem Kran hängend) betrieben werden.

Die von TLS erreichbaren Messgeschwindigkeiten sind von der gewünschten räumlichen Auflösung, dem gewählten Messfenster sowie der Qualitätsstufe (Rauschreduktion) abhängig. Der P15 bietet sieben Auflösungen (angegeben für eine Messdistanz von 10 m) sowie vier Qualitätsstufen an. Für die Anwendung in hydraulischen Modellen haben sich räumliche Auflösungen von 3.1 mm und 6.3 mm bewährt, welche bei einer vollständigen 360°-Aufnahme Messzeiten von ca. 27 Min. (37.9×10^6 Messpunkte) bzw. 13.5 Min. (151×10^6 Messpunkte) benötigen.

2.2 Versuchsaufbau

Die Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des P15 wurden in einer Versuchsrinne mit trapezförmigen Querschnitt (Länge 35 m, Breite 2 m, Sohlgefälle 0.17%) durchgeführt. Die Sohle wurde mit einer der Uferrauheit entsprechenden Kiesmischung mit einem Maximaldurchmesser von $d_{\max} = 4$ mm fixiert.

Der Zufluss wurde mittels MID mit einer Genauigkeit von $\pm 0.5\%$ gesteuert, der Einlaufbereich war mit einem Strömungsgleichrichter versehen. Die untere Randbedingung wurde durch ein

eingestautes Auslaufbecken kontrolliert, dessen Wasserspiegel mit einem strömungsberuhigten Ultraschallsensor (US) erfasst wurde. Durch Kopplung dieser Wasserspiegelmessung mit einem gesteuerten Schieber konnte der Wasserstand als untere Randbedingung präzise geregelt werden. Dies ermöglichte die Gewährleistung von Normalabflussbedingungen bei sämtlichen Versuchen. Die Wasserspiegel wurden durch 6 US mit einer Genauigkeit $< 1\%$ erfasst.

Die Rinne war mit einer motorisierten, 2-axialen Messschiene mit einer Positionierungsgenauigkeit < 1 mm ausgerüstet. Der darauf montierte Laserdistanzsensor (LDS) arbeitete mit Lasertriangulation und verfügte über eine Messgenauigkeit von < 1 mm. Die LDS-Messdaten wurden flächig mit einer Auflösung von $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ aufgenommen.

Bei sämtlichen Versuchen wurde der P15 neben der Versuchsrinne auf einem Dreibeinstativ montiert, auf halbem Weg zwischen Ein- und Auslauf. Es wurden keine Versuche mit Überkopfmessung durchgeführt. Die maximale Messdistanz mit dem P15 betrug 14.5 m bei einem Einfallswinkel $\Theta_a = 80^\circ$ (Abb. 1). Der Messbereich von $4\text{ m} \times 25\text{ m}$ konnte bei einer Auflösung von 6.3 mm innerhalb von 2 Min. aufgenommen werden (Anzahl Messpunkte: 1.5 Mill.). Bei einer höheren Auflösung von 3.1 mm wurden 5.7 Mill. Punkte innerhalb 3.5 Min. eingemessen.

2.3 Korrektur der Lichtbrechung

Die vom TLS ausgesandten Lichtstrahlen werden an der Grenzfläche Luft/Wasser durch Brechung abgelenkt, im Wasserkörper durch Streuung abgeschwächt und von der Sohle wieder reflektiert. Die Eindringtiefe von Lichtstrahlen in Wasser hängt primär von der Wellenlänge des Signals, also dem verwendeten Messgerät, ab. Die Wellenlänge ist daher eine wichtige Kenngröße für die erfolgreiche Erfassung von Oberflächentopographien durch Wasseroberflächen.

Die Brechungsindex n ist durch das Verhältnis zwischen dem Einfallswinkel Θ_a sowie dem Brechungswinkel Θ_w definiert zu (Abb.1)

$$n = \frac{\sin\theta_a}{\sin\theta_w} \quad [1]$$

Dabei ist n von der Temperatur, der Wellenlänge und den Dichteigenschaften der jeweiligen Medien abhängig. Im hydraulischen Versuchswesen kann in den meisten Fällen ein konstanter Wert von $n = 1.33$ angenommen werden, da n über einen breiten Temperaturbereich von $0 - 25^\circ\text{C}$ sowie Schwankungen der Salinität von $0 - 40\text{ PSU}$ nur um ± 0.007 variiert (Millard und Seaver, 1990; Daimon und Masumura, 2007).

Die Lichtbrechung an der Grenzschicht Luft/Wasser führt zu einer verzerrten Messung von Topographien unter der Wasseroberfläche ($x|z$, Abb.1). Diese Verfälschung kann im Rahmen der Datenauswertung mit einem Verfahren nach Smith *et al.* (2012) korrigiert werden. Die vertikale Distanz z_w (Abb.1) zwischen der Wasseroberfläche und der Referenzebene des TLS ist hierfür der massgebende Parameter. Die Kenntnis der Lage des Wasserspiegels ist somit eine Grundvoraussetzung für die Korrektur der Lichtbrechung.

In der vorliegenden Studie wurde z_w in der Versuchsrinne an 6 charakteristischen Punkten mit US, welche zur Positionsbestimmung mit Leica Targets gekoppelt waren, gemessen. Durch Inter- und Extrapolation wurde aus diesen Daten für jeden Laser-Messpunkt die Lage des

Wasserspiegels ermittelt. Daraufhin wurde für jeden Messpunkt die Korrektur nach folgender Methodik durchgeführt (Smith *et al.*, 2012):

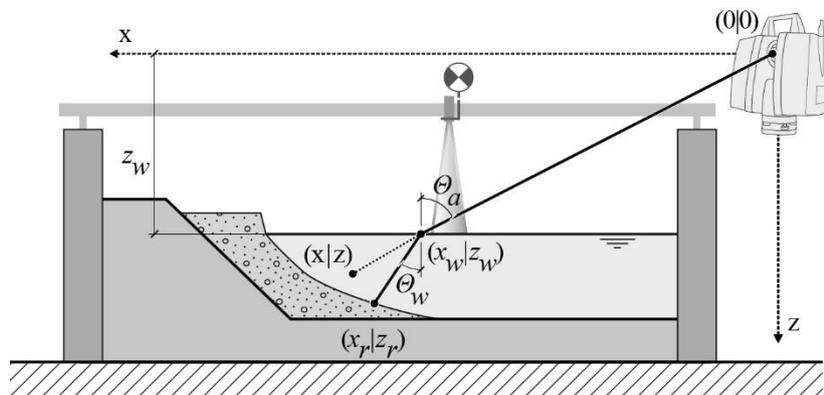


Abb. 1 Querschnitt des Versuchsaufbaus (Blick in Fließrichtung). Zusätzlich zum P15 ist ein Leica Referenzpunkt gekoppelt an einen Ultraschallsensor zur Erfassung der Wasseroberfläche dargestellt; $(x_w|z_w)$ Auftreffpunkt des Lichtstrahls auf Wasseroberfläche; $(x|z)$ scheinbare Lage des Messpunkts unter der Wasseroberfläche; $(x_r|z_r)$ reale Position des Messpunkts

Es wird für jeden scheinbaren Messpunkt $(x|z)$ der Einfallswinkel θ_a des Lichtstrahls bestimmt

$$\theta_a = \tan^{-1} \frac{x}{z} \quad [2]$$

Die unbekannte Koordinate x_w des Auftreffpunkts ergibt sich aus

$$x_w = z_w \tan \theta_a \quad [3]$$

Schliesslich wird die reale Position des Messpunkts ermittelt

$$z_r = \frac{\cos \theta_w (x - x_w)}{n \sin \theta_a} + z_w \quad [4]$$

$$x_r = \frac{(x - x_w)}{n^2} + x_w \quad [5]$$

2.4 Auswertung

Die Rohdaten der jeweiligen Scans wurden mit der proprietären Leica-Software Cyclone (Version 9.1) bearbeitet. Weitere Auswertungen wurden mit der Open-Source-Software CloudCompare (Version 2.6.1) sowie Matlab (Version 2014a) durchgeführt. Die Gegenüberstellungen von Punktwolken aus TLS und LDS Messungen wurden über den in CloudCompare implementierten Algorithmus „Multiscale Model to Model Cloud Comparison“ (M3C2) durchgeführt (Lague *et al.*, 2013). M3C2 ermöglicht die Berechnung von orthogonalen Abständen zwischen zwei Punktwolken ohne Vermaschungs- oder Rasterungsschritte. Die Methode ist robust gegenüber Datenlücken sowie Veränderungen der Punktdichten. Für spezifische Fragestellungen und die generelle Validierung der Auswertungsmethodik wurde die proprietäre Software Geomagic (Version 2014) eingesetzt.

2.5 Versuchsprogramm

Die Eignung des P15 für den Einsatz in hydraulischen Modellen sowie die gewählte Korrektur- und Auswertungsmethodik wurden mit folgendem Versuchsprogramm untersucht:

1. Vermessung einer festen Gerinnesohle:
Die feste Sohle der Versuchsrinne wurde mit dem P15 im trockenen Zustand sowie unter Normalabflussbedingungen bei Wassertiefen von $h_w = 76$ mm, 100 mm und 150 mm und entsprechenden Durchflüssen $Q_0 = 73$ l/s, 114 l/s und 225 l/s vermessen.
2. Scan eines Halbzylinders mit bekannter Geometrie:
Ein Halbzylinder mit einem Durchmesser von 51 ± 0.1 mm wurde auf der Gerinnesohle befestigt und bei einer Wassertiefe von $h_w = 100$ mm ($Q_0 = 114$ l/s, $F = 0.53$) mittels P15 vermessen.
3. Fallstudie „Künstliche Kiesschüttung“:
Im Rahmen eines laufenden Forschungsprojekts an der VAW zum Erosionsverhalten von künstlichen Kiesschüttungen (Friedl *et al.*, 2015) wurde der P15 unter typischen Versuchsbedingungen getestet. In einem definierten Bereich der Rinne wurde eine bewegliche, künstliche Kiesschüttung mit einem mittleren Korndurchmesser $d_m = 1.4$ mm nachgebildet. Ein Zwischenzustand des Versuchs wurde im Modell fixiert und mittels LDS sowie P15 trocken vermessen. Daraufhin wurde dieselbe Oberflächentopographie mit dem P15 durch die Wasseroberfläche aufgenommen.
4. Sensitivitätsanalyse:
Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden die Einflüsse der Parameter Fliesstiefe h_w , Brechungsindex n sowie Einfallswinkel Θ_a auf die Korrektur der Lichtbrechung untersucht.

3 Ergebnisse

Die skalierten Sand-Kiesmischungen in hydraulischen Feststofftransportmodellen von alpinen Mittelland-Flüssen zeigen meist d_m -Werte in Bereich von 1 - 5 mm. Als Richtwert für die zu erreichende Genauigkeit des P15 sowie die Beurteilung des Erfolgs der Korrektur der Lichtbrechung wird daher der mittlere Korndurchmesser d_m der Fallstudie angesetzt.

Im Zuge der Auswertungen wurden aus den rohen Vermessungsdaten (Punktwolken) weder Ausreisser entfernt, noch Verfahren zur Rauschreduktion angewendet. Es wurden keine Teilproben durch Reduktion der Punktdichte (Ausdünnung) erstellt.

3.1 Trockenmessung / Messung durch Wasseroberfläche

Nach der Korrektur der Lichtbrechung wurden die Punktwolken der trockenen Messung sowie der Messung durch die Wasseroberfläche mittels M3C2 gegenübergestellt. Abb. 2 zeigt die absoluten Abweichungen in vertikaler Richtung bei einer Wassertiefe $h_w = 100$ mm als Funktion des Einfallswinkels Θ_a . Der Mittelwert sowie der Median für Eintrittswinkel $44^\circ \leq \Theta_a < 70^\circ$ liegen unter dem definierten Grenzwert von 1.4 mm. Ab einem Eintrittswinkel von 70° liegt der Median über dem geforderten Grenzwert von 1.4 mm und nimmt in weiterer Folge mit steigendem Eintrittswinkel stark zu. Die Auswertungen für die beiden anderen untersuchten Wassertiefen ($h_w = 76$ und 150 mm) zeigen ähnliche Ergebnisse und bestätigen den Grenzwert von 70° . Die Resultate zeigen deutlich, dass bei Laserscans durch Wasseroberflächen Ergebnisse im Genauigkeitsbereich des vorliegenden mittleren Korndurchmessers erreicht werden können.

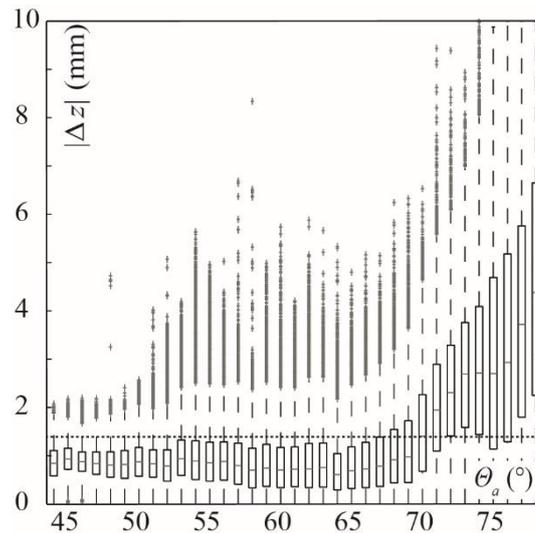


Abb. 2 Absolute vertikale Abweichungen zwischen trockenem Scan und korrigiertem Scan durch Wasseroberfläche ($h_w = 100$ mm, $Q_0 = 114$ l/s, $F = 0.53$), (...) Grenzwert von $|\Delta z| = 1.4$ mm

3.2 Bekannte Geometrie (Halbzylinder)

Für die Auswertung der Messergebnisse des in der Rinne montierten Halbzylinders wurden nur dem P15 zugewandte Messpunkte berücksichtigt. „Geisterpunkte“ auf den abgewandten Seiten des Halbzylinders oder in den Randbereichen wurden nicht in die Auswertung mit einbezogen.

Mittels CloudCompare und Matlab wurden in einem Abstand von 10 mm Schnitte der Punktwolke senkrecht zur Zylinderachse erstellt. In diese Schnitte wurden jeweils Kreise mit einem dem Halbzylinder identischen Durchmesser eingepasst. Daraufhin wurden die radialen Abweichungen zwischen den gescannten Datenpunkten und dem virtuellen Kreisbogen ermittelt (Abb. 3). Die mittlere radiale Abweichung betrug in sämtlichen Querschnitten $< \pm 1.3$ mm.

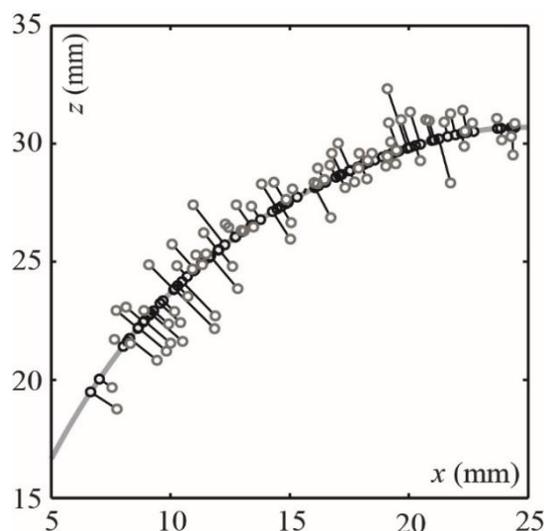


Abb. 3 Schnittdarstellung der bekannten Geometrie des Halbzylinders (graue Linie) und der Messpunkte (graue Punkte); schwarze Linien: Radialabstand zwischen Punkten auf Zylinderoberfläche (schwarze Punkte) und Messpunkten ($h_w = 100$ mm, $Q_0 = 114$ l/s, $F = 0.53$)

Zur Validierung dieses Ansatzes wurde in Geomagic in eine Stichprobe der Punktwolke (7384 Messpunkte) eine 3D-Darstellung des Zylinders eingepasst. Der Vergleich der Zylinder-

oberfläche und der Messpunkte zeigte eine mittlere radiale Abweichung von ± 1.4 mm. Dies bestätigt die anhand der Gegenüberstellung von trockenen Scans und Scans durch die Wasseroberfläche ermittelten Ergebnisse.

3.3 Fallstudie: Seitenerosion

Die seitliche Erosion künstlicher Kiesschüttungen führte im Laborversuch zu charakteristischen Topographien mit steilen Böschungen. Die teilweise erodierte Kiesschüttung wurde im Modell mit einer dünnen Zementschicht fixiert und in einem ersten Schritt trocken mittels LDS sowie P15 vermessen. Daraufhin wurde dieselbe Oberflächentopographie durch die Wasseroberfläche ($h_w = 100$ mm, $Q_0 = 114$ l/s) mit dem P15 aufgenommen. Abb. 4 vergleicht die drei Messmethoden anhand einer Schnittdarstellung der erodierten Kiesschüttung.

Durch die vertikale Messrichtung des LDS werden steile Ufer nur mit wenigen Messpunkten erfasst. Aufgrund der höheren räumlichen Auflösung des P15 sowie dessen seitlicher Aufstellung neben der Versuchsrinne werden die steilen Uferbereiche in den Scandaten besser dargestellt. Aus diesem Grund sind in diesen Bereichen mit bis zu 10 mm die höchsten Abweichungen zwischen den Daten des LDS und des TLS festzustellen.

Ohne Berücksichtigung der steilen Ufer in der Auswertung beträgt die absolute vertikale Abweichung zwischen LDS und P15 für die trockene Aufnahme < 1.3 mm und für die Aufnahme durch die Wasseroberfläche < 1.6 mm.

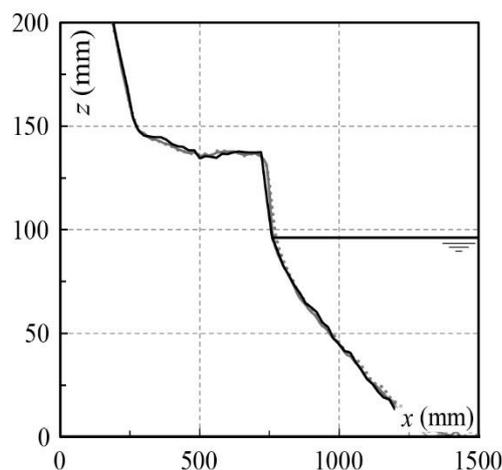


Abb. 4 Schnittdarstellung der erodierten Kiesschüttung (Blick in Fließrichtung); (—) LDMS; (---) TLS trocken; (···) TLS durch Wasseroberfläche

3.4 Sensitivitätsanalyse

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wurden die Auswirkungen von potentiellen Messfehlern auf die Korrektur der Lichtbrechung untersucht. Diese Analyse wurde mit idealisierten Daten auf Basis einer virtuellen Sohlebene (Masse: 2 m x 30 m) unter Annahme einer optimal ruhigen Wasseroberfläche mit einer Wassertiefe von 100 mm durchgeführt. Ausgehend von der idealisierten virtuellen Sohlebene wurden Abweichungen aufgrund von fehlerhaften Messungen oder Definitionen der Parameter Fließtiefe h_w , Brechungsindex n sowie Einfallswinkel Θ_a berechnet. Als Referenz dienten die Berechnungsergebnisse für eine virtuelle Wassertiefe von $h_w = 100$ mm mit einem Brechungsindex $n = 1.33$.

In einem ersten Schritt wurde h_w um ± 2 mm sowie ± 4 mm variiert und der Fehlerwert in Bezug auf den Einfallswinkel Θ_a ermittelt. Abb. 5a zeigt, dass die absoluten vertikalen Abweichungen bis zu einem Einfallswinkel von 70° unter dem Grenzwert von 1.4 mm bleiben. Ab einem Einfallswinkel grösser 60° ist ein starker Anstieg der Abweichungen festzustellen.

Der Einfluss des gewählten Brechungsindex wurde durch eine Variation von $n = 1.32$ sowie $n = 1.34$ untersucht. Dieser Wertebereich deckt eine grosse Bandbreite von Dichteunterschieden ab. Wie in Abb. 5b dargestellt ist n ein robuster Parameter. Die alternativen Werte für n führten zu Fehlern von max. 1 mm.

Bei der Fallstudie zur künstlichen Kiesschüttung wurde eine maximale Wasserspiegelneigung von $1.14\% \cong 0.65^\circ$ festgestellt. Dieser Wert diente als Grundlage für die Untersuchung des Einflusses des Einfallswinkels anhand einer Variation von Θ_a um $\pm 0.65^\circ$. Mit einer Abweichung von rund 1.4 mm im Bereich von $45^\circ < \Theta_a < 80^\circ$ ist der Einfallswinkel der empfindlichste Parameter der durchgeführten Sensitivitätsanalyse (Abb. 5c).

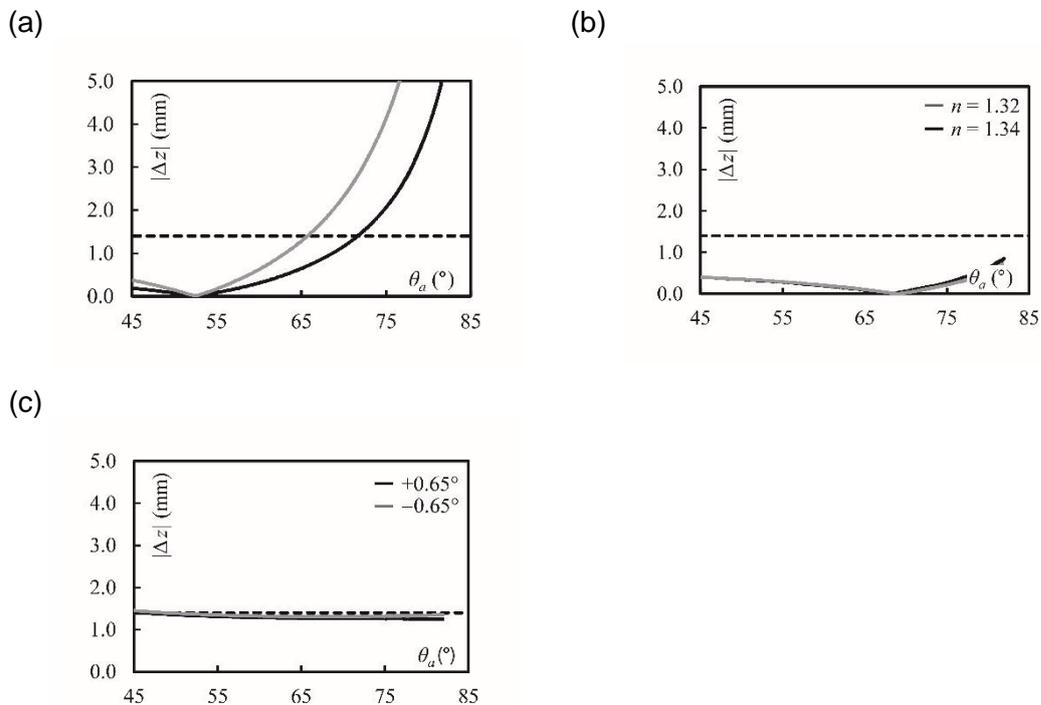


Abb. 5 Absolute vertikale Abweichungen in Bezug auf den Einfallswinkel für: (a) $h_w = 100 \pm 2$ mm (—) und ± 4 mm (---); (b) $n = 1.33 \pm 0.01$; (c) $\Theta_a \pm 0.65^\circ$. (- -) Grenzwert von $|\Delta z| = 1.4$ mm

4 Anwendungsgrenzen & Ausblick

Die notwendige Korrektur der Messwerte aufgrund der Lichtbrechung bedingt die exakte Kenntnis der Wasserspiegellage. In der vorliegenden Untersuchung mit Normalabflussbedingungen lieferte die Messung der Wasserspiegel durch 6 US sowie die Interpolation der Werte auf die jeweiligen Punkte der Laserscans gute Ergebnisse. Bei komplexeren Strömungsbedingungen sind für eine erfolgreiche Korrektur evtl. höher aufgelöste Informationen zu den herrschenden Abflusstiefen notwendig. Dies könnte durch eine grössere Zahl von US oder eine alternative Methode zur flächigen Erfassung der Wasserspiegel, beispielsweise auf photogrammetrischer Basis, erreicht werden.

Die Gegenüberstellung der P15-Messdaten bei trockener Modelloberfläche sowie durch die Wasseroberfläche zeigte deutlich den negativen Einfluss von Einfallswinkeln $> 70^\circ$ auf die Korrektur der Lichtbrechung. Eine gute Alternative stellt hier die über Kopf Montage des TLS dar. Auf diese Weise werden zu flache Einfallswinkel vermieden und der Messbereich für plausible Korrekturen der Lichtbrechung vergrößert.

Die maximale Eindringtiefe der Lichtstrahlen in den Wasserkörper ist stark von der Wellenlänge des verwendeten TLS sowie von der Trübung abhängig. In den Versuchen der VAW wurde die Korrektur der Lichtbrechung bis dato erfolgreich für Wassertiefen bis zu 300 mm bei relativ geringer Trübung (quantitativ nicht gemessen) angewandt. Die Feststellung der maximal möglichen Messtiefe in Abhängigkeit verschiedener Trübungsintensitäten ist Gegenstand weiterer Untersuchungen.

5 Schlussfolgerungen

Die Leica ScanStation P15 mit einer Wellenlänge von 808 nm ist unter typischen Laborbedingungen für die Aufnahme von Topographien durch bewegte Wasseroberflächen gut geeignet. Der Fokus dieser Studie lag auf flussbaulichen Modellversuchen mit Fliesstiefen von bis zu 150 mm, Froude-Zahlen bis zu 0.57 sowie Modellabmessungen von 4 m x 25 m.

Die Qualität und Genauigkeit der mittels Leica P15 aufgenommenen Daten entsprach auf trockenen Oberflächen den Referenzdaten, welche mittels Laserdistanzsensor (Lasertriangulation) aufgenommen wurden. Die Korrektur der Lichtbrechung wurde in 3 Testszenarien erfolgreich durchgeführt und ergab einen mittleren absoluten Höhenfehler von 1.4 mm für Scans auf trockenen Oberflächen und durch bewegte Wasseroberflächen.

Die seitliche Erosion einer Kiesbank sowie Sedimentablagerungen konnten in einer Fallstudie während der Versuchsdurchführung in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung aufgenommen werden. Die vorgestellte Methodik erlaubt somit, die Aufnahme von Sohltopographien während instationärer, morphodynamischer Prozesse und schliesst somit eine Datenlücke im hydraulischen Versuchswesen. Weitere Entwicklungen, wie beispielsweise die Anwendung bei hochdynamischen Prozessen, wie etwa Damnbrüche oder die flächige Aufnahme der Wasserspiegel, sind Gegenstand laufender Untersuchungen.

Literatur

- Daimon, M., Masumura, A. (2007). Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region. *Applied Optics* 46(18), 3811–3820.
- Frank, P., Hager, W.H. (2014). Spatial dike breach: Accuracy of photogrammetric measurement system, in: A.J. Schleiss, G. De Cesare, M.J. Franca, M. Pfister (Eds.). *Proc. River Flow 2014*. Taylor & Francis Group, London, 1647–1654.
- Friedl, F., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2015). The role of bank erosion in restoration works in gravel-bed rivers, in: E-Proc. 36th *IAHR World Congress*, The Hague, the Netherlands, 1–12.
- Friedl, F., Schneider, J., Hinkelammert, F., Weitbrecht, V. (2016). Through-water terrestrial laser scanning in hydraulic scale models: proof of concept. *J. Hydraulic Research*, in preparation.

- Jerlov, N.G. (1976). *Marine optics*, Elsevier Oceanography Series, Amsterdam, 2nd rev. and enlarged ed. doi:10.1016/S0422-9894(08)70794-3.
- Millard, R.C., Seaver, G. (1990). An index of refraction algorithm for seawater over temperature, pressure, salinity, density, and wavelength. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* 37(12), 1909–1926. doi:10.1016/0198-0149(90)90086-B.
- Lague, D., Brodu, N., Leroux, J. (2013). Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 82(1), 10–26. doi:10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
- Leica Geosystems AG (2015). Leica ScanStation P15 – Ihr Einstieg in das präzise Laser-scanning. Broschüre und technisches Datenblatt. www.leica-geosystems.com.
- Smith, M., Vericat, D., Gibbins, C. (2012). Through-water terrestrial laser scanning of gravel beds at the patch scale. *Earth Surface Processes and Landforms* 37(4), 411–421. doi:10.1002/esp.2254.

Anschrift der Verfasser

Florian Hinkelammert
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich
Hönggerberggring 26
8093 Zürich
hinkelammert@vaw.baug.ethz.ch

Fabian Friedl
friedl@vaw.baug.ethz.ch

Dr. Volker Weitbrecht
weitbrecht@vaw.baug.ethz.ch