

Laserbathymetrie in Gebirgsbächen

Michaela Wörndl, Stefan Jocham

Der Einsatz grüner Laserpulse bei Airborne LiDAR Systemen ermöglicht es, das Gelände von Gewässern auch unterhalb des Wasserspiegels zu vermessen. Punktdichten unter Wasser von 20 bis 40 Punkten pro m^2 können dadurch erreicht werden. Unterschiedliche Laufzeiten der Lasersignale in Luft in Wasser werden bei einer Refraktionskorrektur im Postprocessing berücksichtigt.

Die erhaltenen Punktwolken stellen eine topographische Information dar, die sich in der Regel wesentlich von üblicherweise verfügbaren Geometrieinformationen über die Sohle von Gebirgsbächen unterscheidet. Waren bisher lediglich Informationen über die Makrostrukturen der Gerinneläufe flächendeckend verfügbar, so liefert die Laserbathymetrie auch ein flächendeckendes Bild von Sohlformen mesoskaliger Größenordnungen. Step-Pool-Formationen, Pools und Riffles, sowie einzelne Blöcke mittlerer Durchmesser werden gut erkennbar. Besonders für die Ausbildung von mittelgroßen Turbulenzen, die sich als Formrauheit auf das Abflussgeschehen auswirken, sind solche Sohlstrukturen von Bedeutung. Die Hydraulik in Gebirgsbächen wird häufig von derartigen Formrauheiten gegenüber der Oberflächenrauheit, welche durch die Verteilung der Korngrößen des Sohlmaterials bestimmt ist, dominiert.

Unter Zuhilfenahme numerischer Simulationsprogramme wird die Eignung der Daten aus der Laserbathymetrie zur Ermittlung /Abschätzung von Formrauheiten und Turbulenzen in Gebirgsbächen untersucht. Herausforderungen dabei sind die Erstellung/Identifikation bestgeeigneter Berechnungsnetze bzw. generell eine gut geeignete Umsetzung der Daten in den Berechnungsprogrammen. Eine weitere Anforderung stellt die Unterstützung und Prüfung der Berechnungen mit angemessen aufgelösten Feldmessungen von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten dar.

Stichworte: Bathymetrie, Airborne Laserscanning, Airborne Hydromapping, Formrauheit, Abflusssimulation

1 Airborne Hydromapping

Airborne Hydromapping (AHM) ist eine Form des Airborne Laserscanning (ALS), bei welcher Gelände und Vegetation, sowohl durch das Medium Luft, als auch durch das Medium Wasser, vermessen werden. Es unterscheidet sich von ALS durch die Wellenlänge des Laserpulses. Es wird kein Signal im infrarotna-

hen Wellenlängenbereich ausgesandt, sondern im grünen Bereich des elektromagnetischen Spektrums ($\lambda = 532 \text{ nm}$). Dabei wird das Licht nicht zur Gänze an der Wasseroberfläche reflektiert und kann, je nach Trübegrad des Wasserkörpers, in eine bestimmte Tiefe eindringen.

Generell wird beim Laserscanning über die Laufzeit reflektierter Laserpulse die Lage der reflektierenden Oberflächen bestimmt. Die Stärke der Methode ist die rasche und flächendeckende Erfassung von Geometrien großer Gebiete. Ein Eindringen der Pulse in Wasserkörper ermöglicht die Vermessung auch unter der Wasseroberfläche. Unterwassergeometrien können flächendeckend mit einer Punktdichte von 20-50 Punkten/m² vermessen werden (Kinzel et al., 2013; Steinbacher et al., 2012; Aufleger et al., 2013). Die unterschiedlichen Laufzeiten des Laserpulses in den Medien Luft und Wasser müssen in einem Postprocessing der Messdaten berücksichtigt werden. Dies geschieht, indem für die unter Wasser befindlichen Punkte eine Refraktionskorrektur berechnet wird. Die Information über die Lage des Wasserspiegels, und somit auch darüber, welche Punkte zum Zeitpunkt der Vermessung unter Wasser lagen, entstammt ebenfalls aus dem reflektierten Signal der grünen Laserpulse (Abbildung 1) (Mandlburger, 2011). Abbildung 1, links, zeigt schematisch den Vergleich zweier Laservermessungen, einmal mit dem Signal im infrarotnahen Wellenlängenbereich und einmal mit einem Signal im grünen Wellenlängenbereich. Abbildung 1, rechts zeigt Ergebnisse einer AHM Laservermessung, mit (mitte) und ohne (rechts) dem zusätzlich gemessenem Wasserspiegel. Zum Vergleich ist zusätzlich ein Luftbild abgebildet (links).

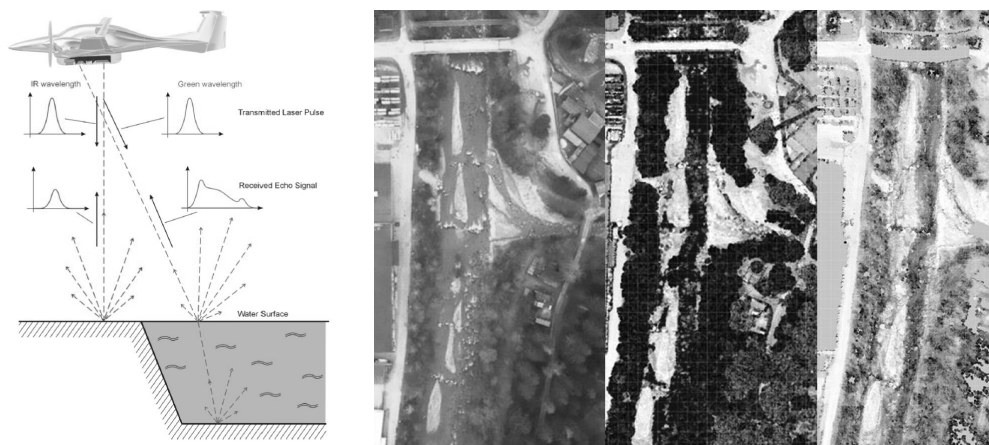


Abbildung 1: Links: Schematische Darstellung der Signale bei ALS (infrarotnaher Wellenlängenbereich, links) und bei AHM (grüner Wellenlängenbereich, rechts) (Mandlburger, 2011). Rechts: Luftbild (l), AHM – Laservermessung der Sohle mit (m) und ohne (r) gemessenem Wasserspiegel

In klarem Wasser kann bis in mehre Meter Tiefe gemessen werden. Bei Trübe oder bei stark turbulentem Abfluss (Weißwasser) wird das Eindringen auch des grünen Laserpulses vermindert. Die maximal erzielbare Eindringtiefe liegt bei etwa einer Secchitiefe (*Steinbacher et al., 2012*). Eine Abstimmung von Flugterminen auf Abflussverhältnisse in den zu vermessenden Flüssen hat daher einen wesentlichen Einfluss auf den Erfolg von Sohlvermessungen. Grundsätzlich eignen sich Zeiten mit niedrigeren Abflüssen und außerhalb der Schneeschmelze (Trübe). Da auch die Lage des Wasserspiegels aus den Vermessungen mit einem grünen Laserpuls bestimmt werden kann, und da es auch eine wertvolle Information darstellt, mit welcher Wassertiefe ein bestimmter Abfluss in einem Gerinne abgeführt wird, ist es jedoch auch möglich, dass ganz bestimmte Abflusszustände von Interesse sind.

2 Sohlformen und Formrauheit

2.1 Sohlformen

ALS im infrarotnahen Wellenlängenbereich liefert hochaufgelöste digitale Geländemodelle (DGMs) von Flussvorländern, die dann im Bereich der Gerinne durch Interpolationen gröber aufgelöster, terrestrisch vermessener Daten ergänzt werden (*Steinbacher, 2012*). Während die Verläufe der Flüsse oder Makrostrukturen (Uferlinien, Seitenarme) aus diesen zu erkennen sind, bleiben Informationen über Sohlformen (Mesostrukturen) oft verborgen. Sohlformen spielen für die Sohlstabilität (Geschiebetransport) und für die Habitatstruktur in Gerinnen eine Rolle (*Rickenmann, 2006; Youchum, 2012*). Sie haben einen wesentlichen Einfluss auf den Fließwiderstand, den eine Sohle dem Abfluss entgegenbringt. Damit tragen sie auch zur Ausprägung der vorherrschenden Abflussbedingungen (Fließtiefe, Geschwindigkeit, Turbulenz, Schubspannung) bei. Ansätze zur Berücksichtigung der Fließwiderstände durch Sohlformen in 1D-, 2D- oder 3D Strömungsberechnungen stehen im Spannungsfeld zwischen einer guten Nachbildung der Realität und limitierter Datenverfügbarkeit (und Rechenleistung).

AHM Vermessungen mit grünen Laserpulsen bieten eine Alternative zu terrestrischen Messungen und eröffnen die Möglichkeit Sohlformen unter Wasser flächendeckend und möglicherweise lückenlos aufzunehmen. Abbildung 2 zeigt eine mit AHM vermessene Gewässersohle (links). Die Ausbildung von Becken und Sohlriegeln ist aus den Daten zu erkennen. Auf der rechten Seite sind zwei Querschnitte und ein Längsschnitt durch die Vermessungsdaten dargestellt.

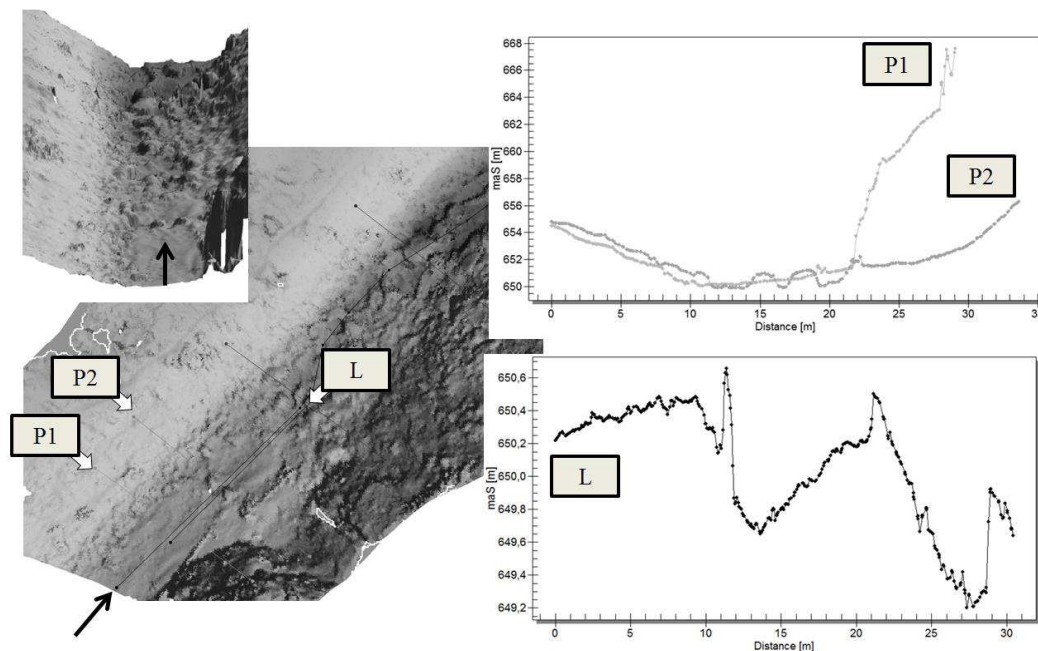


Abbildung 2: AHM Vermessung einer Flusssohle mit Querprofilen und einem Längsprofil

2.2 Formrauheit

Der Fließwiderstand in einem Gerinne lässt sich in verschiedene Anteile unterteilen (zB *Simons und Richardson, 1966; Morvan, 2008*). *Simons und Richardson (1966)* unterscheiden zwischen Oberflächenrauheit, Formrauheit und Fließwiderständen, die durch Beschleunigungen und Verlangsamungen des Abflusses hervorgerufen werden. Die Oberflächenrauheit beschreibt jenen Widerstand, der durch die Oberflächenbeschaffenheit der Sohle entsteht. Er herrscht auch dann vor, wenn es zu keinem Ablösen des Abflusses an Sohlformen kommt. Die Formrauheit ist jener Anteil, der durch Ablösungen an Sohlformen und damit einhergehende Turbulenzen mittlerer Größe entsteht. *Morvan et al. (2008)* führen eine Unterteilung in „skin drag“, „form drag“ und „shape drag“ ein. Skin drag ist der Widerstand verursacht durch die Oberflächenbeschaffenheit der einzelnen Sohlkörner. Form drag wird bestimmt durch die vorherrschende Sohlformen. Shape drag repräsentiert jenen Anteil am Fließwiderstand, der durch die generelle Form eines Flusses entsteht.

Die Berücksichtigung von Formverlusten an Sohlformen gestaltet sich, unter anderem wegen mangelnder Daten über die Formen selbst, als schwierig. In Formelbeiwerten wie dem Stickler- oder dem Manning-Beiwert ist die Berücksichtigung der Oberflächen- und der Formrauheit zusammengefasst. In numerischen Simulationen werden die Beiwerte gegen Messwerte an einem Pegel oder gegen bekannte Wasserstände kalibriert. Die Berechnungen liefern für das jeweilige Gerinne ein empirisches Modell (u.a. *Nujic, 2009; Vetsch et al., 2014*). Es handelt sich dann, je nach tatsächlicher Form der Sohle und tatsächlichem

Rauheitsverhalten, um eine stärkere oder schwächere Vereinfachung des Abflussgeschehens. Beispielsweise sind für die Abschätzung von auf die Sohle wirkenden Kräften oder für die Beurteilung von Habitateigenschaften sehr genaue Kenntnisse der Abflusseigenschaften in Gerinnen von Bedeutung (Youchum et al., 2012). Besonders in Gebirgsbächen, in welchen weit gestufte Kornverteilungen zu einer starken Ausprägung von Sohlformen führen, spielen Formverluste eine große Rolle (i.e. Jarrett, 1984; Rickenmann, 2006). Einige Beispiele für empirische Ansätze zur Berücksichtigung von Sohlformen in 1D-Berechnungen finden sich u.a. in Simons and Richardson, 1966, Jarrett, 1984, Bathurst, 1985, Rickenmann, 1996, oder Aberle und Smart, 2003. Empirische Ansätze, egal ob 1D, 2D oder 3D, bergen die Herausforderung zu klären, für welche Bedingungen die ermittelten Modelle gültig sind. Tabelle 1 zeigt die Einteilungen von Fließwiderständen nach Morvan (2008) und nach Simons und Richardson (1966).

Tabelle 1 Einteilung der Fließwiderstandsanteile in Mikro-, Meso- und Makroskala nach Morvan et al. (2008) und Simons und Richardson (1966)

Fließwiderstände (Resistance)/Rauheit (Roughness)

mikroskalig	Oberflächenbeschaffenheit, Kornrauheit	Turbulenz durch Ablösung von Sedimentkörnern, Oberflächentextur
	Skin drag ₁	Oberflächenrauheit ₂
mesoskalig	Oberflächengeometrie, Sohlformen	Turbulenz durch Ablösung von Sohlformen: Form drag und Large Scale Eddies
	Form drag ₁	Formrauheit ₂
makroskalig	Gerinneform, Meandrierung, Kurven	Turbulenz verursacht durch ungleichförmige Strömung
	Shape drag ₁	Beschleunigung und Verzögerung ₂

¹ Morvan, H., Knight, D., Wright, N., Tang, X., Crossley, A. (2008): The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulation models. Journal of Hydraulic Research, Volume 46, No. 2, pp. 191-208

² Simons, D.B., Richardson, E.V. (1966): Resistance to Flow in Alluvial Channels. Professional Paper 422-J, United States Geological Survey, Washington D.C., 1966.

3 Numerische Berechnung - Umsetzung hochaufgelöster Daten

3.1 Umsetzung der Geometrie

Mit welcher Genauigkeit numerische Modelle Abflüsse reproduzieren können, hängt maßgeblich von der Abbildung der betreffenden Geometrie ab (u.a. Bates, 2012; Conner und Tonina, 2013). Für die Nutzung der geometrischen Information in numerischen Modellen, muss diese in Berechnungsnetzen umgesetzt werden. Die Eigenschaften der Netze bestimmen Effizienz und Qualität numerischer Berechnungen (Habersack et al., 2007). Bisher war ihre Auflösung durch die Auflösung der zugrundeliegenden geometrischen Informationen limitiert. Sind bessere Informationen verfügbar, stellt sich die Frage der optimalen Netzauflösung. Das Netz muss fein genug gewählt werden, um abflussbestimmende

Geometrien abbilden zu können. Feine Netze können aber Rechenzeiten verlängern und die Stabilität einer Berechnung negativ beeinflussen (*Tu et al., 2013*). Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse einer numerischen 2D-Simulation. Allen Simulationen liegen dieselben Geometriedaten (mehrere Punkte pro m^2) zugrunde. Die durchschnittlichen Elementgrößen der Netze betragen 4 m^2 , 7 m^2 , 10 m^2 und 20 m^2 . Die Pfeile repräsentieren Geschwindigkeitsvektoren. Die Tiefen sind in Farbabstufungen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Ergebnisse für die Geschwindigkeiten sehr sensibel auf die Netzauflösung reagieren (*Posanti, 2013*).

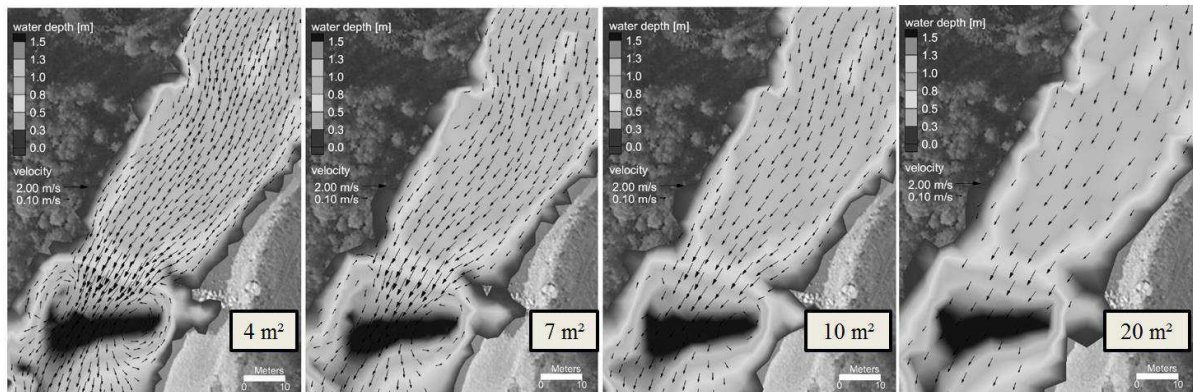


Abbildung 3: 2D-numerische Simulationen von Fließtiefen und Fließgeschwindigkeiten mit unterschiedlichen Netzauflösungen.

3.2 Vergleichsdaten

Um zu überprüfen, ob eine detaillierte Berechnung der Strömung richtig konvergiert und richtig kalibriert ist, bedarf es auch gut aufgelöster Vergleichswerte. Für Fließtiefen können diese mit AHM flächendeckend erhoben werden. Eine Bestimmung von Wasserspiegellagen im Feld ist mit vertretbarem Aufwand zu bewerkstelligen. Allerdings sind besonders Fließgeschwindigkeiten sensibel auf Netzauflösungen und Rauheitskalibrierungen (*Horrit et al., 2006; Williams et al., 2013, Posanti, 2013*). Eine Aufnahme von detaillierten Geschwindigkeitsprofilen im Feld ist somit wichtig, jedoch mit großem Arbeitsaufwand verbunden. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel eines mit ADP aufgenommenen Geschwindigkeitsprofils in einem Fließquerschnitt von variabler Tiefe (*Weber, 2015*).

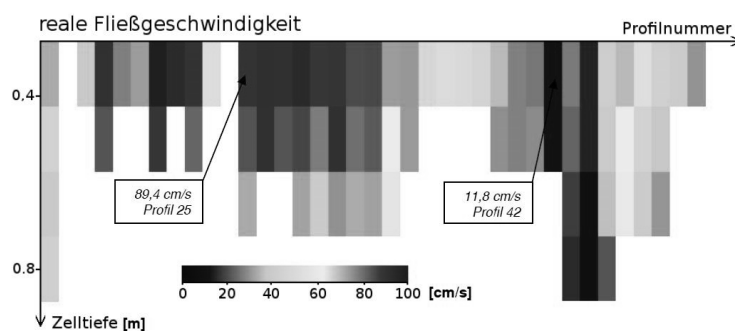


Abbildung 4: Variable Geschwindigkeiten gemessen mittels ADP (*Weber, 2015*).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vermessung von Gewässergeometrien mittels AHM eröffnet neue Möglichkeiten in der Abflusssimulation. Besonders bei der Detektion von Sohlformen lässt sich eine Stärke der Methode erkennen. Sohlformen tragen zur Gerinnerauheit bei. In Gebirgsbächen sind sie ein bestimmender Faktor für das Abflussgeschehen. Aufgrund ihres flächigen Charakters sind sie aber mit terrestrischen Vermessungsmethoden schwer zu detektieren und noch schwerer zu quantifizieren. Mit AHM eröffnet sich die Möglichkeit der besseren Erfassung dieser Formen und damit der genaueren Berechnung von Abflussgrößen, insbesondere von Fließgeschwindigkeiten. Um die Potentiale der hochaufgelöster Geometrieinformationen voll nutzen zu können, bedarf es aber auch geeigneter Berechnungsmethoden. Schwierig gestaltet sich die Beschaffung vergleichbar hochaufgelöster Kalibrier- und Validierdaten. Vor allem die Messung gut aufgelöster Fließgeschwindigkeitsdaten im Feld ist noch mit großem Aufwand verbunden.

5 Literatur

- Aufleger, M., Steinbacher, F., Baran, R., Woerndl, M. (2013): Alpine Airborne Hydromapping, In: Zhaoyin, W., Hun-wei Lee, J., Jizhang, G., Shuyou, C.: Proceedings of the 35th IAHR World Congress. Beijing: Tsinghua University Press, ISBN 978-7-89414-588-8
- Aberle, J., Smart, G. (2003): The influence of roughness structure on flow resistance on steep slopes. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 3 (2003), pp. 259-269
- Habersack, H., Hengl, M., Knoblauch, H., Tritthart, M. (2007): Fließgewässermodellierung – Arbeitsbehelf Hydrodynamik, BMLFUW (Hg.), Wien, 2007
- Bates, P.D., Anderson, M.G. (1996): A preliminary investigation into the impact of initial conditions on flood inundation predictions using a time/space distributed sensitivity analysis. *Catena* 26 (1996) 115 – 134
- Bathurst, J. (1985): Flow Resistance Estimation in Mountain Streams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 111 (4), pp. 625-643
- Conner, J.T., Tonina, D. (2013): Effect of cross-section interpolated bathymetry on 2D hydrodynamic model results in a large river. *Earth Surface Processes and Landforms* (2013)
- Horrit, M.S., Bates, P.D., Mattinson, M.J. (2006): Effects of mesh resolution and topographic representation in 2D finite volume models of shallow water fluvial flow. *Journal of Hydrology* (2006) 329, 306 – 314
- Jarrett, R.D. (1984): Hydraulics of high-gradient streams. *ASCE Journal of Hydraulic Engineering*, 110, pp. 1519-1539
- Kinzel, P.J., Legleiter, C.J., Nelson, J.M. (2013): Mapping River Bathymetry With a Small Footprint Green LIDAR: Applications and Challenges. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 49, No. 1, 2013

- Morvan, H., Knight, D., Wright, N., Tang, X., Crossley, A. (2008): The concept of roughness in fluvial hydraulics and its formulation in 1D, 2D and 3D numerical simulation models. *Journal of Hydraulic Research*, Volume 46, No. 2, pp. 191-208.
- Nujic, M. (2009): *Hydro_AS – 2D, Benutzerhandbuch*. http://www.ib-nujic.de/pageID_3459974.html [accessed 20.05.2015]
- Posanti, J. (2013): Application of Airborne Laser Hydrography data to the calibration of a 2D hydraulic model and prediction analysis, Master Thesis Universita degli studi di Trento, Trento, 2013
- Rickenmann, D. (1996): Fließgeschwindigkeit in Wildbächen und Gebirgsflüssen. *Wasser, Energie, Luft* 88 (11/12), pp. 298-304
- Rickenmann D., Chiari, M., Friedl, K. (2006): SETRAC – A sediment routing model for steep torrent channels. *River Flow 2006 – Ferreira, Alves, Leal & Cardoso (eds) © 2006 Taylor & Francis Group, London, ISBN 0-415-40815-6*
- Simons, D.B., Richardson, E.V. (1966): Resistance to Flow in Alluvial Channels. Professional Paper 422-J, United States Geological Survey, Washington D.C., 1966
- Steinbacher, F., Pfennigbauer, M., Aufleger, M., Ullrich, A. (2012): High Resolution Airborne Shallow Water Mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B1, 2012, XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia
- Tu, J., Guan-Heng, Y., Chaoqun, L. (2013): Computational Fluid Dynamics – A practical approach. © 2013, 2008, Elsevier Ltd., ISBN: 978-0-08-098243-4
- Vetsch D., Rousselot P., Volz C, Vonwiller L., Peter S., Ehrbar D., Gerber M., Faeh R., Farshi D., Mueller R., Veprek R. (2014): System Manuals of BASEMENT, Version 2.4. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW). ETH Zurich. Available from <http://www.basement.ethz.ch> [accessed 20.05.2015]
- Weber, F. (2015): Numerische 2D Modellierung eines Flussabschnittes basierend auf hochauflösenden Bathymetriedaten. Masterarbeit an der Universität Innsbruck, Innsbruck, SS 2015
- Williams, R.D., Brasington, J., Hicks, M., Measures, R., Rennie, C.D., Vericat, D. (2013): Hydraulic validation of twodimensional simulations of braided river flow with spatially continuous aDcp data. *Water Resources Research*, Vol. 49, 5183-5205, 2013
- Yochum, S.E., Bledsoe, B.P., David, G.C.L., Wohl, E. (2012): Velocity prediction in high-gradient channels. *Journal of Hydrology* 424-425 (2012), 84-98

Autoren:

DI Michaela Wörndl, DI Stefan Jocham

Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich Wasserbau
Universität Innsbruck
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck

Tel.: +43 512 507 62211
Fax: +43 512 507 94962201
E-Mail: Michaela.Woerndl@uibk.ac.at