

Multitemporale 3D-Erfassung und GIS-Analyse fluvial-geomorphologischer Prozesse mit terrestrischem Laserscanning

Martin HÄMMERLE, Markus FORBRIGER, Bernhard HÖFLE

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag zeigt das Potenzial terrestrischen Laserscannings (TLS) für die fluviale Geomorphologie. Anhand eines multitemporalen Datensatzes wird die Morphodynamik einer Kiesbank räumlich differenzierend mittels 3D-Laserscannings in-situ untersucht. Der zeitliche Abstand zwischen den beiden Aufnahmen beträgt etwa ein halbes Jahr und schließt die Schneeschmelze und Hochwasserereignisse ein, was morphologische Veränderungen der Kiesbank zur Folge hat. Aus den Daten der Scankampagnen werden detaillierte digitale Geländemodelle (0,25 m Auflösung) erstellt. Es wird eine neue Methodik zur Erstellung der Geländemodelle aus TLS vorgestellt: Vegetation- und Wasseroberflächenpunkte müssen zuerst in allen Datensätzen detektiert und entfernt werden, da diese zu ungewollten Höhendifferenzen führen. Diese Filterung wird auf Basis eines geometrischen Punkattributes (*Echo Ratio*) durchgeführt, das die räumliche Verteilung einer lokalen Punktnachbarschaft beschreibt. Die Überlagerung der beiden Modelle ergibt ein Differenzmodell, welches die sehr dynamischen Veränderungen der Kiesbank verortet und deren Größenordnung aufzeigt. Die Analyse des Differenzmodells ergibt eine Gesamterosion von 660 m³, was einem durchschnittlichen Höhenverlust von 14 cm entspricht. Eine Fehleranalyse zeigt die Limitierung der verwendeten Methoden bezüglich der minimal feststellbaren Veränderungen. Feingeoreferenzierung wird als wichtiger Schritt zur Verbesserung gleichartiger Untersuchungen erachtet.

1. Einleitung und Fragestellung

Laserscanning, auch LiDAR (*Light Detection and Ranging*) genannt, gilt als eine der modernsten Methoden zur schnellen und hochgenauen Erfassung von 3D-Geodaten (SHAN UND TOTH, 2008). Der Messvorgang beginnt mit dem aktiven Aussenden von Laserpulsen durch das LiDAR-Instrument. Über die Laufzeit eines Laserpulses wird die Distanz zum reflektierenden Objekt ermittelt. Die Kombination aus der Richtung des Laserpulses sowie der Distanz des Objektes ergibt die Polarkoordinate für einen Laserpunkt. Die Gesamtheit der Laserpunkte ergibt schließlich eine Laserpunktwolke mit echten 3D-Daten. 3D-LiDAR-Daten erlauben somit zum Beispiel die Analyse von Überhängen und Baumbeständen und eine realitätsnahe Modellierung dreidimensionaler Objekte mit senkrechten oder sich nach unten verjüngenden Bestandteilen (VOSSelman UND MAAS, 2010).

Dieser Beitrag richtet sein Augenmerk auf den Einsatz von LiDAR in der fluvialen Geomorphologie (HÖFLE UND RUTZINGER, 2011), welche einen zentralen Stellenwert hat z.B. im Naturgefahrenmanagement bei der Modellierung von Flutereignissen oder beim Biodiversitätsmonitoring fluvialer Ökosysteme (HAUER et al., 2012, VETTER et al., 2011, HÖFLE et al., 2009b, MANDLBURGER et al., 2009a, MANDLBURGER et al., 2009b, MILAN, 2009, CAVALLI et al., 2008, HERITAGE UND HETHERINGTON, 2007, DODKINS et al. 2005, HOLLAUS et al., 2005, BOOKER, 2003).

Im Studienjahr 2011/12 wurden im Rahmen zweier forschungsorientierter Studienprojekte am Lehrstuhl für Geoinformatik, Univ. Heidelberg, mittels terrestrischen Laserscannings (TLS) 3D-Vermessungen einer Kiesbank des Neckars durchgeführt. Ziel der Projekte war es, die Eignung hochauflösender, multitemporaler TLS-Daten zur Detektion und Analyse fluviomorphologischer Prozesse kleiner Ausdehnung und Prozessamplitude im Detailmaßstab zu untersuchen. Hierfür wird erstmals das geometrische Maß *Echo Ratio*, welches von der vertikalen Verteilung von Laserpunkten abgeleitet wird (HÖFLE et al., 2009a), auf TLS-

Daten angewendet. Die *Echo Ratio* wurde bereits erfolgreich bei flugzeuggestützten LiDAR-Daten zur Detektion von Gebäuden und Vegetation eingesetzt (HÖFLE et al., 2009a; vgl. HÖFLE et al., 2012).

2. Untersuchungsgebiet

Die untersuchte Kiesbank von etwa 170 m Länge und 25 m Breite befindet sich bei $49^{\circ}28'36''\text{N}$ $8^{\circ}34'32''\text{O}$ in einem Altarm des Neckars, der durch Ilvesheim bei Heidelberg fließt. Von einem Busch im zentralen Bereich der Kiesbank abgesehen, weist sie nur stellenweise krautigen Bewuchs auf, was auf eine ausgeprägte Dynamik des Flusses und saisonale Hochwasserereignisse hindeutet (Abb. 1).

Die erste TLS-Aufnahme der Kiesbank erfolgte am 18.11.2011, die zweite Kampagne folgte am 01.06.2012, so dass saisonal witterungsbedingte Pegelhochstände im Zeitraum zwischen den beiden Messungen lagen.



Abb. 1: Satellitenaufnahmen der Kiesbank zu verschiedenen Zeitpunkten zeigen die Morphodynamik der Kiesbank (a = 31.10.2000, b = 31.12.2009, c = 23.03.2010:

Hochwasser mit Überflutung der Kiesbank, d = 23.05.2011; verändert nach GE, 2012).

3. Methoden

Für beide Messkampagnen stand ein Riegl VZ-400 Laserscanner zur Verfügung, wobei der Funktionsumfang des Gerätes zwischen den beiden Vermessungen um die Möglichkeit der *full-waveform* Aufnahme erweitert wurde.

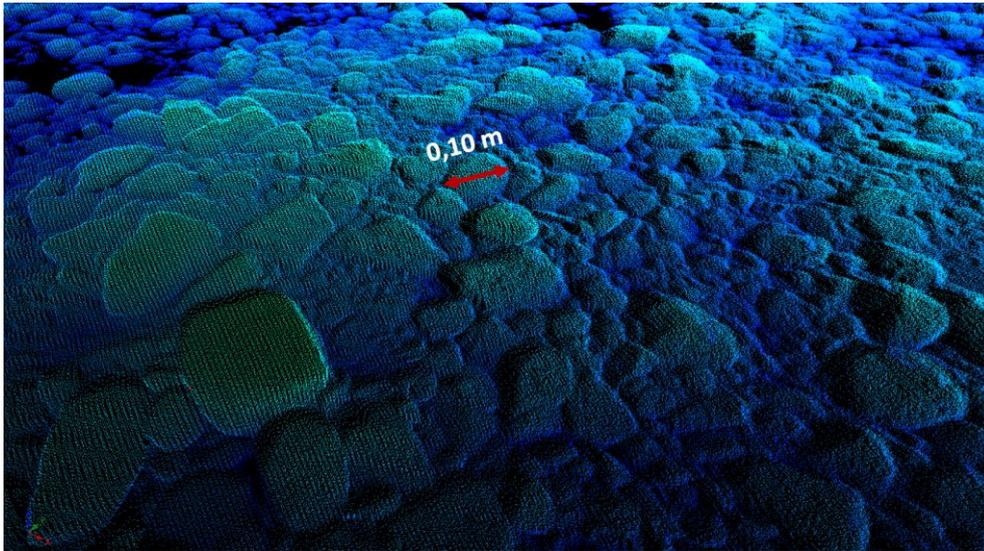


Abb. 2: 3D-Punktwolke aus 2011 eingefärbt nach Höhe: Detailreichtum der TLS-Aufnahme wird anhand der hohen Anzahl von 3D-Laserpunkten pro Stein sichtbar.

Die Kiesbank wurde im November 2011 von 6 Scanpositionen aus mit 77 Mio. Laserpunkten vermessen (Ausschnitt in Abb. 2), im Juni 2012 wurden 5 Scans mit 89 Mio. Punkten durchgeführt, welche ebenso die komplette Kiesbank abdeckten. Es wurden je 2 Scanpositionen auf dem jenseits des Neckars gelegenen Prallhang gewählt so wie die restlichen Standpunkte direkt auf der Kiesbank, um Abschattungen z.B. durch Vegetation möglichst zu vermeiden. Gescannt wurde mit einem Punktabstand von 3 mm in 10 m Distanz. Der Punktabstand nimmt relativ zur Scanposition mit größerer Entfernung linear ab. Durch die Abdeckung des Gebietes von mehreren Scanpositionen wird die mittlere Punktdichte größer als im Einzelscan.

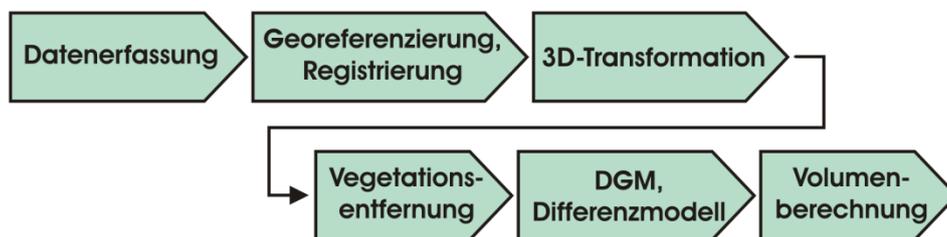


Abb. 3: Überblick der Arbeitsschritte.

Nach der Datenerfassung im Feld wurde zunächst eine Scanposition mit Hilfe von GPS- und Totalstationsdaten im globalen Koordinatensystem georeferenziert (Abb. 3). Die Überführung der restlichen Einzelscans in das Koordinatensystem der georeferenzierten Punktwolke (Registrierung) erfolgte halbautomatisch in zwei Stufen. Nach der sukzessiven Co-Registrierung der Scanpositionen über gemeinsame Ankerpunkte (*tie points*) wurden die Punktwolken der Einzelscans im Modul *Multi Station Adjustment* (MSA) der Riegl-Software RiSCAN Pro (RIEGL, 2012) anhand zusätzlicher gemeinsamer Objekte bis zur kleinstmöglichen Abweichung aufeinander eingepasst. Nach dem MSA konnte eine mittlere Standardabweichung der Distanz der verwendeten *tie point*- und Objektpaare von 0,0196 m erreicht werden.

Die beiden registrierten Punktwolken von 2011 und 2012 zeigten nach den beiden unabhängigen MSA einen systematischen Versatz, der in einem weiteren Schritt durch eine Feingeoreferenzierung (3D-Affintransformation) mittels manuell selektierter Passpunkte (z.B. Astgabeln, Straßenpfosten) verbessert wurde und in einer bestmöglichen Überlagerung resultierte.

Die zur Erstellung der digitalen Geländemodelle (DGM; mit 0,25 m Rasterweite) nötige Filterung von Vegetation erfolgte mit dem Softwarepaket OPALS (IPF, 2012). Es wurde eine neue Methodik speziell für TLS-Daten entwickelt: Über die Kombination eines Ausgangs-DTMs aus lokalen Minimal-z-Werten mit der *Echo Ratio* (ER; ein Indikator für die lokale Rauigkeit und Transparenz; HÖFLE et al., 2009a) wurde Vegetation in den TLS-Daten detektiert. Die ER beschreibt das Verhältnis zwischen Nachbarn eines Laserpunktes gemessen in 3D euklidischer Distanz (Kugel) zu 2D euklidischer Distanz (Zylinder), wobei die Distanzwerte für 2D und 3D identisch sind. Je geringer die vertikale Verteilung der Punkte an der Position des aktuellen Laserpunktes ist, ein Indikator für offenes Gelände, desto größer die ER, da alle Nachbarn sowohl in der Kugel als Zylindernachbarschaft liegen. Ein Wert von 100% sagt, dass 2D- und 3D-Nachbarn identisch sind. Je geringer die ER, desto größer ist die vertikale Verteilung der Nachbarn, ein Indikator für Vegetation. Die ER wird für alle Laserpunkte berechnet und danach in einen Rasterlayer mit ER Mittelwerten pro Zelle überführt. Rasterzellen mit $ER < 50\%$ wurden als Vegetation klassifiziert und entfernt. Die entstandenen Lücken wurden mit einem Kernel in Chebyshev-Anordnung und 1 Pixel Radius interpoliert.

4. Ergebnisse

Abb. 4 zeigt das Differenzmodell der beiden Geländemodelle (DGM2011, DGM2012), welches die morphologischen Veränderungen der Kiesbank verortet. Aus den Abweichungen der z-Werte und der Rasterzellengröße wurden zudem die Volumenänderungen der Kiesbank berechnet.

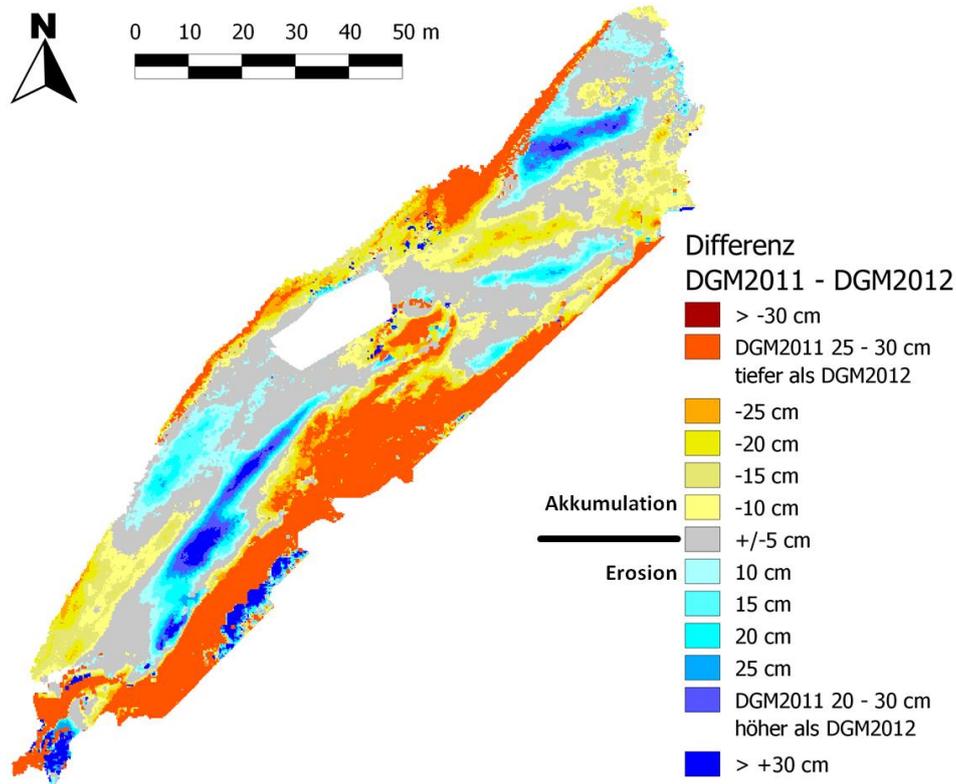


Abb. 4: Höhenunterschiede der digitalen Geländemodelle 2011-2012. Weißer Bereich in der Mitte der Kiesbank, eine stehende Wasserfläche, wurde von der Berechnung ausgeschlossen.

Im Differenzmodell (Abb. 4) zeigen sich deutlich Bereiche von Akkumulation (rote Farbtöne) und Erosion (blaue Farbtöne). Die Fließrichtung des Neckars von Nord-Ost nach Süd-West spiegelt sich in ihrer Verteilung wider. Eine wichtige Rolle als Strömungshindernis kann dem zentral gelegenen Busch zugesprochen werden (siehe auch Bild c in Abbildung 1).

Aus den Höhenänderungen je Rasterzelle wurde für das gesamte untersuchte Areal eine Erosion von rund 660 m³ ermittelt. Die Berechnung erfolgte dabei über die Anzahl der untersuchten Rasterzellen (75756), die Fläche einer Rasterzelle (0,0625 m²) und den Mittelwert der Höhenänderungen aus dem Differenzmodell (-0,14 m) nach:

$$\text{Volumenveränderung} = \text{Anzahl}_{\text{Pixel}} * \text{Fläche}_{\text{Pixel}} * \text{Mittelwert}_{\text{Differenzmodell}}$$

Die Quantifizierung kann jedoch von verschiedenen Faktoren beeinflusst sein. Im südöstlichen Bereich der Kiesbank fällt zum Beispiel die relativ großflächige Überschreitung der +/-30 cm-Marke auf. Dies muss nicht einer hohen morphologischen Dynamik zugeschrieben werden, sondern kann teilweise auf Probleme der DGM-Erstellung im stark bewachsenen Böschungsbereich zurückzuführen sein. Auch die Standardabweichung des Höhenunterschiedes zwischen DGM und Referenzpunkten von 10,9 cm zeigt eine Limitierung in der Höhengenaugigkeit für die Bilanzberechnung auf. Eine weitere Fehlerquelle ergibt sich aus dem potenziellen Versatz der beiden Modelle auch nach der Feingeoreferenzierung, welcher aber unter der Magnitude der Veränderungen liegt, da keine systematischen Auswirkungen im Differenzmodell zu erkennen sind. Es kann für einige Bereiche mit über 30 cm Höhenveränderung eine ausgeprägte Veränderung der Oberfläche durch fluviale Prozesse konstatiert werden.

5. Schlussfolgerung

In der vorliegenden Untersuchung wurden anhand eines multitemporalen Datensatzes die morphologischen Veränderungen einer Kiesbank anhand der Überlagerung zweier digitaler Geländemodelle (0,25 m Rasterweite) aus 3D-Laserscanning ermittelt und mit GIS-Analysen untersucht. Zentral wichtige Arbeitsschritte sind dabei die Registrierung der Einzelscans pro Kampagne sowie die Feingeoreferenzierung der beiden Gesamtschans bzw. der beiden DGM relativ zueinander.

Das resultierende Differenzmodell zeigt deutlich das hohe Einsatzpotenzial der Methode terrestrisches Laserscanning in der fluvialen Geomorphologie. So können neben der Quantifizierung von Volumenänderungen auch Fließrichtungen und Hindernisse sowie deren Einfluss auf die Dynamik erkannt und detailgenau verortet werden. Ein Hauptvorteil der Methode dürfte ihre zeitliche Flexibilität (und somit mögliche Multitemporalität) sein, da die Durchführung der Scans nicht an eine großangelegte Kampagne angewiesen ist wie beim flugzeuggestützten Laserscanning. Gegenüber einer photogrammetrischen Datenerfassung hat TLS zudem den Vorteil, durch kleinste Lücken in der Vegetation Sicht auf das Gelände und somit die Morphologie zu haben.

Forschungsbedarf besteht beim Einsatz von TLS und bei der Analyse multitemporaler TLS-Datensätze unter anderem in Fragen der Automatisierung und Operationalisierung der Auswertung. Weitere Fragestellungen umfassen beispielsweise die Nutzung zusätzlicher Informationen des *full-waveform* Laserscannings, wie etwa die radiometrischen Eigenschaften der reflektierenden Objekte. Aus der Kombination verschiedener Parameter wird eine qualitative und quantitative Steigerung der Einsatzmöglichkeiten von TLS erwartet.

Danksagung

Dank an die TeilnehmerInnen der TLS-Studienprojekte (Fabia Backendorf, Valerie Blankenhorn, Johannes Fuchs, Andrea Freisinger, Sebastian Meixner, Merle Obergfell, Jörn Profe, Isabell Rühl, Fabian Schütt) sowie Larissa Müller, Kristina König und Erich Novaczinski für das Engagement bei der Datenerfassung und -auswertung.

Literatur

- BOOKER, D.J. (2003) Hydraulic modelling of fish habitat in urban rivers during high flows. *Hydrological Processes*, 17, S. 577–599.
- CAVALLI, M., TAROLLI, P., MARCHI, L. UND FONTANA, G. D. (2008) The effectiveness of airborne LiDAR data in the recognition of channel-bed morphology. *Catena*, 73, S. 249–260.
- DODKINS, I., RIPPEY, B., HARRINGTON, T. J., BRADLEY, C., CHATHAIN, B. N., KELLY-QUINN, M., MCGARRIGLE, M., HODGE, S. UND TRIGG, D. (2005) Developing an optimal river typology for biological elements within the Water Framework Directive. *Water Research*, 39, S. 3479–3486.
- GE (2012) Google Earth, abgerufen am 17.12.2012.
- HAUER, C., MANDLBURGER, G., SCHÖBER, B. UND HABERSACK, H. (2012) Morphologically related integrative management concept for reconnecting abandoned channels based on airborne LiDAR data and habitat modelling. *River Research and Applications*, DOI: 10.1002/rra.2593.
- HERITAGE, G. UND HETHERINGTON, D. (2007) Towards a protocol for laser scanning in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(1), S. 66–74.
- HÖFLE, B., HOLLAUS, M. UND HAGENAUER, J. (2012): Urban vegetation detection using radiometrically calibrated small-footprint full-waveform airborne LiDAR data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67(0), 134-147.
- HÖFLE, B. UND RUTZINGER, M. (2011) Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 55(2), S. 1–29, DOI: 10.1127/0372-8854/2011/0055S2-0043.
- HÖFLE, B., MÜCKE, W., DUTTER, M., RUTZINGER, M. UND DORNINGER, P. (2009a) Detection of building regions using airborne LiDAR - A new combination of raster and point cloud based on GIS methods. In: CAR, A., GRIESEBNER, G. UND STROBL, J. (Hrsg.): *Geospatial Crossroads @ GI_Forum '09: Proceedings of the Geoinformatics Forum*, Salzburg, Wichmann, S. 66–75, ISBN: 978 3 879 074 655.
- HÖFLE, B., VETTER, M., PFEIFER, N., MANDLBURGER, G. UND STÖTTER, J. (2009b) Water surface mapping from airborne laserscanning using signal intensity and elevation data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(12), S. 1635–1649.
- HOLLAUS, M., WAGNER, W. UND KRAUS, K. (2005) Airborne laser scanning and usefulness for hydrological models. *Advances in Geosciences*, 5, S. 57–63.
- IPF (2011) OPALS - Orientation and Processing of Airborne Laser Scanning data. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Universität Wien, <http://www.ipf.tuwien.ac.at/opals/>, abgerufen am 19.12.2012.
- MANDLBURGER, G., HAUER, C., HÖFLE, B., HABERSACK, H. UND PFEIFER, N. (2009a) Optimisation of LiDAR derived terrain models for river flow modelling. *Hydrology and Earth Systems Sciences*, 13(8), S. 1453–1466.
- MANDLBURGER, G., HÖFLE, B., BRIESE, C., RESSL, C., OTEPKA, J., HOLLAUS, M. UND PFEIFER, N. (2009b) Topographische Daten aus Laserscanning als Grundlage für Hydrologie und Wasserwirtschaft. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 61(7&8), S. 89–97
- MILAN, D.J. (2009) Terrestrial Laser Scan-derived Topographic and Roughness Data for Hydraulic Modelling of Gravel-bed Rivers. In: HERITAGE, G.L. UND LARGE, A.R.G. (Hrsg.): *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Wiley-Blackwell, 2009, Kapitel 6, S. 133–146.
- RIEGL (2012) RiSCAN Pro - Operating and Processing Software for Riegl 3D Laser Scanners. 2012. – <http://www.riegl.com/index.php?id=221>, abgerufen am 19.12.2012.
- SHAN, J. UND TOTH, C.K. (2008) *Topographic Laser Ranging and Scanning*. CRC Press, ISBN 978 1 420 051 421.

- VETTER, M., HÖFLE, B., MANDLBURGER, G. UND RUTZINGER, M. (2011) Estimating changes of riverine landscapes and riverbeds by using airborne LiDAR data and river cross-sections. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 55(2), S. 51–65.
- VOSSELMAN, G., MAAS, H.-G. (2010) *Airborne and Terrestrial Laser Scanning*. CRC Press, ISBN 978 1 904 445 876.