

Ableitung von Flusssohlenmodellen aus Flussquerprofilen und Integration in Airborne Laserscanning Geländemodelle mit GRASS GIS

Michael VETTER, Bernhard HÖFLE, Gottfried MANDLBURGER
und Martin RUTZINGER

Dieser Beitrag wurde nach Begutachtung durch das Programmkomitee als „reviewed paper“ angenommen.

Zusammenfassung

In den letzten Jahren entwickelte sich das flugzeuggestützte Laserscanning – auch bekannt als Airborne Laser Scanning (ALS) – zu einem Standardverfahren für die topographische Geländeerfassung. Im Bereich von Gewässern liefern gängige ALS-Systeme die Höhe der Wasseroberfläche, die dann im digitalen Geländemodell (DGM) Eingang findet. Für Anwendungen im Bereich der hydraulischen Modellierung ist jedoch nicht die Wasseroberfläche, sondern das Flussbett erforderlich, da ansonsten das Abflussvolumen z.B. bei Überflutungsmodellen über- bzw. unterschätzt wird. Die in diesem Beitrag vorgestellte, neue Methode ist mit OpenSource Software (GRASS GIS) umgesetzt. Dabei wird eine Flusssohle auf Basis von eingemessenen Querprofildaten interpoliert und das so erhaltene digitale Flusssohlenmodell (DFM) in ein hochauflösendes ALS-DGM integriert. Das Verfahren besteht aus sieben neu entwickelten GRASS GIS Modulen, die sich in drei Hauptgruppen aufteilen lassen: (i) Abgrenzung der Wasseroberfläche und Ableitung der Flussmittellinie, (ii) Generierung von Flussquerlinien orthogonal zur Flussachse, aus denen annähernd parallel zur Flussachse verlaufende Längsprofile abgeleitet werden. Zusätzlich werden mittels Objekterkennung Brückenpfeiler in den Originalprofildaten erkannt und entfernt. (iii) Berechnung von 3D-Vermaschungspunkten, Interpolation des DFM sowie Einbettung in das bestehende ALS-DGM. Alle Arbeitsschritte werden nach dem Setzen eines Startpunktes vollautomatisch durchgeführt. Durch diese Methode können zukünftig an jeder beliebigen Stelle des ALS-DGM Profile gezogen werden, die in einer hydraulischen 1D-Modellierung als Eingangsdaten dienen können und somit zur Verbesserung von Hochwassersimulationen beitragen.

1 Einleitung

Durch den Einsatz moderner Fernerkundungsmethoden, wie vor allem Airborne Laser Scanning (ALS), werden digitale Geländemodelle (DGM) mit guter Höhengenaugigkeit und hoher räumlicher Auflösung erzeugt (KRAUS & PFEIFER 1998). Mit diesen hochgenauen DGM können Modellierungen zu einer Vielzahl von Fragestellungen durchgeführt werden. In dieser Arbeit wird der Frage nachgegangen, wie ALS-Daten aufbereitet werden müssen, damit sie für hydraulische Fragestellungen optimal nutzbar sind.

Wie bereits in anderen Studien gezeigt wird, kann aus einem ALS-DGM ein digitales Wasseroberflächen-Modell (DWM) und eine damit verbundene Wasser-Land-Grenze (WLG) berechnet werden (MANDLBURGER & BROCKMANN 2001). Aus ALS-DGM, DWM und WLG kann ein Wasserlauf-DGM (DGM-W) abgeleitet werden, welches die überflutungsrelevanten Geländebereiche sowie das Flussbett repräsentiert (MANDLBURGER 2006; MANDLBURGER & BRIESE 2007). Zur Interpolation des Flussbettes auf Basis von gemessenen Flussquerprofilen wurden verschiedene Ansätze vorgeschlagen. HEITZINGER & KAGER (1998) verwenden eine Delaunay Triangulierung, wobei die gemessenen Profile als Zwangskanten eingehen. Vor allem in gekrümmten Flussläufen werden hochwertigere Ergebnisse durch die Einbeziehung der Fließrichtung erreicht. Die Methode von FIOOLE (2000) verwendet eine gleitende Schrägebenen-Interpolation (moving planes), wobei die heterogene Punktdichte in und quer zur Profilrichtung sowohl bei der Auswahl der Stützpunkte als auch bei deren Gewichtung berücksichtigt wird. Beim Ansatz von MANDLBURGER & STROBELBERGER (2007) werden die gemessenen Profile auf Basis der gekrümmten Flussachse in ein achsorientiertes Koordinatensystem transformiert und Zwischenprofile durch bi-lineare Interpolation eingerechnet. Die „Hydrologic Splines“ Methode von FLANAGIN ET AL. (2007) beruht auf der Splineinterpolation, wobei zunächst in den gemessenen Profilen eine jeweils fixe Anzahl von Punkten durch lineare Interpolation eingerechnet wird. Die korrespondierenden Punkte werden anschließend als Stützpunkte für kubische Splinekurven verwendet, auf denen zusätzliche Verdichtungsprofile interpoliert werden können. Die Grundkonzepte der beiden letztgenannten Ansätze werden in der vorliegenden Arbeit durch die vollautomatische Ableitung eines DWM, einer Flussmittellinie, einer Objekterkennung in den Profildatensätzen und der hochgenauen Modellierung eines digitalen Flusssohlenmodells (DFM), unter Berücksichtigung der Flussgeometrie, ergänzt.

1.1 Fragestellung

Im Hinblick auf die bereits bestehenden Methoden wird die Frage gestellt: Wie kann ein DGM-W bzw. ein DFM unter Berücksichtigung von Objekten innerhalb eines Flussschlauches (z. B. Brückenpfeiler) vollautomatisch abgeleitet und in ein ALS-DGM integriert werden? Das für diese Studie als Grundlage dienende, frei verfügbare, hydraulische Analysewerkzeug „Hydrologic Engineering Centers River Analysis System (HEC-RAS)“ (US-ARMY 2008) ist in der 1D-Modellierungsvariante auf die Verarbeitung von Vektordaten (meist gemessene Flussquerprofilen) ausgelegt. Daher können Analysen nicht auf hochauflösenden Rasterdaten betrieben werden, und es ist notwendig, die Eingangsdaten für die Anforderungen der Analysesoftware so aufzubereiten, dass ein Datenmodell aus 3D-Vektorlinien entsteht. Diese Eingangsdaten der Modellierung müssen an jeder Stelle den Flusslauf bzw. das DFM und das Umland abbilden können, daher ist eine Interpolation eines DGM-W unumgänglich. Der Anwender kann mit einem DGM-W an jeder Stelle des Geländes beliebig viele und beliebig lange Profile für eine 1D-Modellierung extrahieren und diese in HEC-RAS importieren.

1.2 Datengrundlage und Testgebiet

Als Testgebiet wurde ein rund 2,5 km langer Abschnitt des Inns bei Innsbruck (Tirol, Österreich) gewählt. Zum einen liegt in diesem Bereich ein ALS-DGM (Rasterweite 1 m) aus dem Jahre 2005 vor, welches mit einer mittleren Punktdichte von 2 Punkten/m² beflogen

wurde (Abb. 1). Zum anderen sind Flussquerprofile aus den Jahren 1997 und 2005 verfügbar. Jedes einzelne Flussquerprofil ist eine Kombination aus Trockenprofil (mit Theodolit und Reflektor am Lotstock vermessen) und Nassprofil (Kombination aus Theodolit-, GPS- und Echolotmessungen mit Reflektor am Boot).

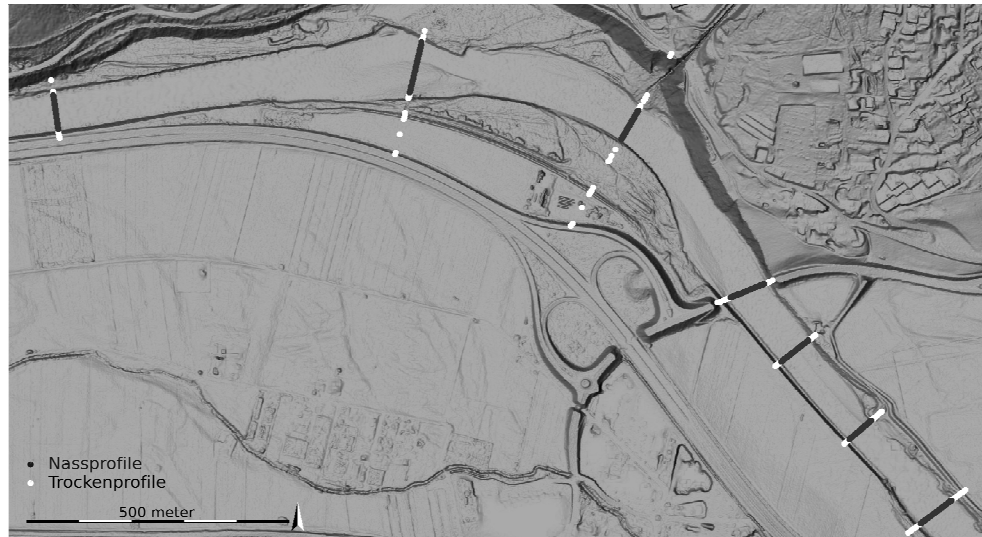


Abb. 1: DGM-Schummerung des Untersuchungsgebiets mit Trocken- und Nassprofilen

2 Methodik

Das Verfahren einer DFM-Ableitung gliedert sich in mehrere Bausteine, welche mit der OpenSource GIS Software GRASS GIS (GRASS DEVELOPMENT TEAM 2008) der Programmiersprache Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION 2008) und der Raster/Vektorbibliothek GDAL/OGR (Geodata Abstraction Library, WARMERDAM 2008) umgesetzt wird. Der Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte ist in Abbildung 2 dargestellt und wird in den Kapiteln 2.1 bis 2.6 im Detail erklärt. Als Inputdaten fließen ein ALS-DGM und die gemessenen Flussquerprofile ein.

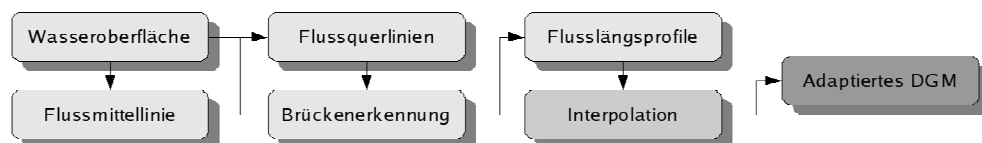


Abb. 2: Modulaufbau der Flusssohlenableitung und Integration in ein DGM (hell: Module der Eingangsdatenverarbeitung; mittel: Interpolationsmodul; dunkel: Modul zur ALS-DGM-Adaption)

2.1 Wasseroberflächenerkennung

Herkömmliche ALS-Systeme arbeiten mit Laserlicht im nahen Infrarotbereich (1064 nm). Dieses durchdringt die Wasseroberfläche nicht und liefert daher keine Information über die Tiefe eines Gewässers. Zudem wird auf Wasseroberflächen lediglich ein geringer Teil aller Lasermessungen aufgrund von Absorption oder Totalreflexion verwertbar registriert und infolge zu Bodenpunkten klassifiziert. Es ist daher notwendig, eine Methode zur Ermittlung des DWM zu entwickeln, um diese im ALS-DGM abgebildeten Bereiche der Wasseroberflächen zu erkennen. Die Wasseroberflächenerkennung stellt die Basis der hier vorgestellten Arbeit dar. Erst durch die Ableitung des DWM werden alle relevanten Modellierungsbereiche abgegrenzt, auf die dann die weiteren Module aufbauen. Aufgrund der variablen Flussmorphologie kann die Wasseroberfläche nicht für jeden Flusstyp mit derselben Methode detektiert werden. Aus diesem Grund werden zwei Verfahren kombiniert. Bei der ersten Methode handelt es sich um einen Segmentierungsansatz (Seeded Region Growing, vgl. HÖFLE 2007), der mit lokalen Nachbarschaftsbeziehungen arbeitet. Die zweite Methode basiert auf der Reklassifizierung eines Neigungsrasters. Beim Seeded Region Growing werden ausgehend von einem manuell gesetzten Startpunkt innerhalb der Wasseroberfläche (Abb. 3a) Nachbarzellen (die 30 nächsten) gesucht, die ein zuvor definiertes, lokales, auf die Startzelle bezogenes Höhenintervall ($\pm 0,1$ m) nicht überschreiten. Jede Zelle, welche innerhalb des lokalen Toleranzbereichs liegt, wird in weiterer Folge auch als Startpunkt herangezogen, bis keine Zellen mehr innerhalb des Toleranzbereichs liegen. Alle so gesammelten Zellen werden vorerst als Wasseroberfläche klassifiziert und im Anschluss mit einem reklassifizierten Neigungsraster ($< 3^\circ$) verschnitten, wodurch die endgültige Wasseroberfläche berechnet wird (Abb. 3b).

2.2 Flussmittellinie

Im nächsten Schritt wird aus der bereits abgeleiteten Wasseroberfläche die Mittellinie des Flusslaufes berechnet. Dies wird mit einem rasterbasierten Ausdünnungsalgorithmus, der in GRASS GIS implementiert ist (Modul „r.thin“), berechnet. Die gesamten Rasterzellen des DWM – hierzu wird das Rasterpolygon verwendet – werden von allen Seiten gleichmäßig jeweils um eine Rasterzelle geschrumpft, bis keine weitere Rasterzelle mehr abgezogen werden kann, d.h., das Wasserflächenpolygon wird auf eine 1 Pixel breite Linie reduziert. Diese Rasterzellen werden in eine Vektorlinie umgewandelt und mit dem statistischen Verfahren des gleitenden Mittels geglättet. Kurze Seitenäste der Mittellinie, die bei der rasterbasierten Berechnung entstehen und aus Variationen in der Flussgeometrie resultieren, werden durch ein Längenkriterium entfernt (< 100 m) (Abb. 3c).

2.3 Flussquerlinien

Die originalen Profildaten weisen einen Profilabstand von bis zu 500 m entlang des Flusslaufes auf (Abb. 1). Um zu einer besseren Abbildung der Flussgeometrie zu gelangen, werden zusätzliche Stützlinien bzw. Stützprofile entlang der Mittellinie benötigt. Es werden 2D-Linien orthogonal auf die Flussachse gelegt und mit dem bereits vorhandenen Wasseroberflächenpolygon verschnitten (Abb. 3d). Diese Linien können – abhängig von der Flussgeometrie – unterschiedlich dicht gelegt werden. Bei stark gekrümmten Gerinnen muss darauf geachtet werden, dass sich keine Linien überschneiden, weil dies zu Interpola-

tionsfehlern führt. Die neuen Querlinien dienen ausschließlich der Verbesserung und Darstellung der 2D-Flussgeometrie und enthalten in dieser Phase noch keine Höhenwerte. In der Gesamtinterpolation kommt dem Abstand der Querlinien nur eine untergeordnete Stellung zu, da die Querlinien lediglich Ankerpunkte für die in Kapitel 2.5 beschriebene Längsprofilerstellung sind.

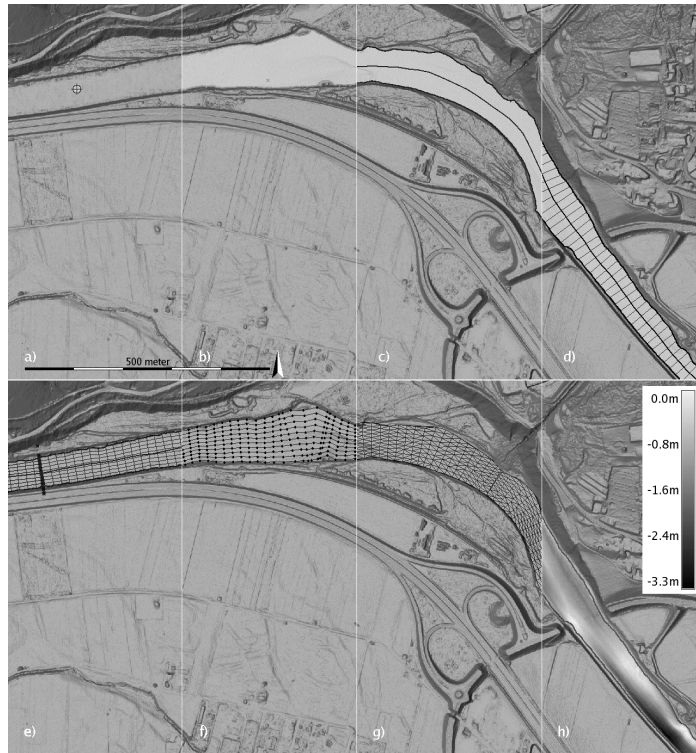


Abb. 3: In- und Output der Einzelmodule: a) DGM-Schummerung mit manuell gesetztem Startpunkt; b) DWM; c) geglättete Mittellinie; d) Flussquerlinien (20 m Abstand); e) Flusslängsprofile (10 Stück, Abstand variierend) mit Originalquerprofil überlagert; f) Stützpunkte an den Schnittpunkten mit Längsprofilen; g) Delaunay Dreiecksvermaschung; h) DFM

2.4 Brückenerkennung

Ein weiterer Schritt bei der Erstellung eines DFM ist die Erkennung von künstlichen Objekten innerhalb der Profildaten. Dieser Arbeitsschritt ist notwendig, da ein Großteil aller Profile entlang von Brücken aufgenommen wird und somit diese Profile die Sockel der Brückenpfeiler beinhalten (Abb. 4a). Aus diesem Grund muss vor der Interpolation der Flusssohle überprüft werden, ob Brückenpfeiler vorhanden sind. Die Überprüfung basiert auf der Höhendifferenz zweier benachbarter Profilpunkte. Dabei wird das gesamte Profil von einem Profilstützpunkt zum nächsten abgearbeitet und überprüft, ob die Höhendifferenz be-

nachbarter Punkte positiv oder negativ ist. Da Profile in der Regel mit einer fallenden Böschung beginnen, weisen die ersten Höhendifferenzen ein negatives Vorzeichen auf. Nehmen die Höhenwerte mehrerer Messungen in Folge, unter Berücksichtigung einer definierten Schwankungstoleranz, gleichbleibend zu, werden die Höhendifferenzen akkumuliert. Überschreitet diese akkumulierte Höhendifferenz einen bestimmten Schwellenwert (z. B. 1,5 m), so werden Lage und Position dieses Überschreitungspunktes gespeichert. Fällt das Profil in weiterer Folge wieder unter den Höhenwert des gespeicherten Punktes, wird ein Brückenpfeiler erkannt und alle dazwischenliegenden Punkte entfernt (Abb. 4b). Alle Profile werden nach der Überprüfung neu abgespeichert. Wird der Höhenschwellenwert vor einer gravierenden Richtungsänderung nicht erreicht, wird die akkumulierte Höhe wieder auf Null gesetzt und erneut mit der Akkumulation der Höhendifferenzen begonnen.

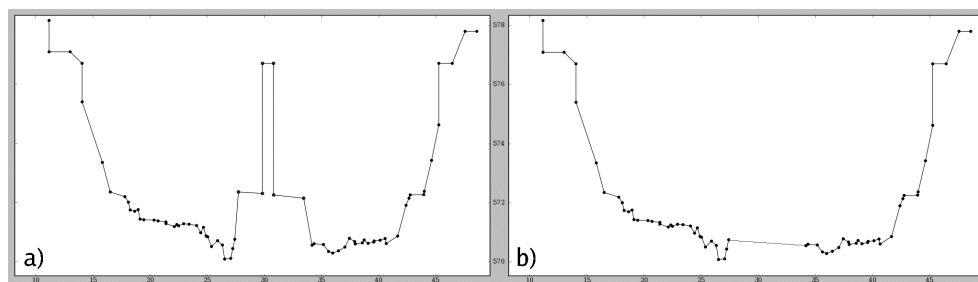


Abb. 4: a) Originalprofil mit einfachem Brückenpfeiler, b) bereinigtes Profil

2.5 Flusslängsprofile

Die mit dem DWM verschnittenen 2D-Flussquerlinien sind die Grundlage für die Erstellung der 2D-Flusslängslinien bzw. in weiterer Folge der 3D-Flusslängsprofile (Abb. 3e und 3f). Die Erstellung der Längsprofile gliedert sich in drei Schritte.

1. Die Querlinien werden in jeweils gleich viele Segmente (Abschnitte) unterteilt (z. B. alle 10 % der Flussbreite). Durch diese prozentuale Aufteilung der Flussquerlinien wird das Modellieren von Aufweitungen und Verengungen entlang der Flussachse ermöglicht, was mit einer einfachen Buffer-Methode nicht erreicht werden kann, da die Flussuferlinien nicht parallel verlaufen. Die Anzahl der Segmente bestimmt die Dichte der Interpolationsstützpunkte in Flussquerrichtung und beeinflusst somit den Generalisierungsgrad des interpolierten DFM.
2. Die Segmentknoten werden als 2D-Stützpunkte für die Erstellung einer 2D-Längslinie herangezogen. Je Segmentknoten wird eine Längslinie erzeugt, die annähernd parallel zur Flussmittellinie verläuft.
3. Durch das Abfassen der Höhenwerte an den Schnittpunkten der 2D-Längslinien mit den Originalprofilen werden 3D-Längsprofile generiert. Die Höhenwerte an diesen Schnittpunkten werden abschließend durch lineare Interpolation auf alle Stützpunkte übertragen, die sich aus dem Verschnitt von Längs- und Querlinien ergeben. Somit wird eine Verdichtung der 3D-Profile (Abb. 3f), ähnlich den Ansätzen von MANDLBURGER & STROBELBERGER (2007) und FLANAGIN et al. (2007), erreicht.

2.6 Vermaschung und Interpolation

Die Schnittpunkte entlang der neu erstellten 3D-Längsprofile bilden die Grundlage für die Interpolation des DFM und des DGM-W (Abb. 3f). Für diese Studie wurde eine Dreiecksvermaschung (Delaunay Triangulation) verwendet (Abb. 3g). Das durch die Dreiecksvermaschung entstandene Vektormodell wird in ein regelmäßiges Raster überführt (d. h. Interpolation an den Zellmittelpunkten) (Abb. 3h). Das so berechnete DFM wird nun in das vorhandene ALS-DGM integriert (Abb. 5). Im Bereich der klassifizierten Wasseroberfläche wird immer der tiefer liegende Höhenwert verwendet ($DGM-W = \min(DGM, DFM)$). Durch das Verschmelzen von ALS-DGM und DFM entsteht ein DGM-W mit 1 m Rasterweite.

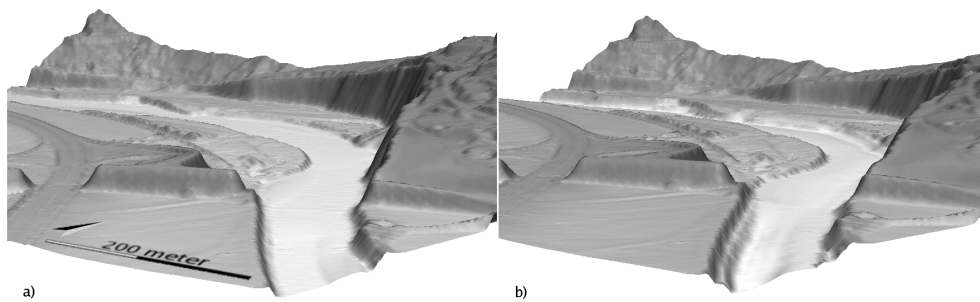


Abb. 5: a) ALS-DGM (Schummerung); b) ALS-DGM-W (ALS-DGM mit integriertem DFM)

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Qualität

Um die Qualität einer solchen Interpolation angeben zu können, werden flächendeckende Informationen über die Flusssohle benötigen (z. B. flächendeckende Fächerecholot-Aufnahme). Da diese Daten in kleinen, nicht-schiffbaren Flüssen nicht vorliegen, kann nur von einer Annäherung der interpolierten Flusssohle an die realen Begebenheiten ausgegangen werden. Aus diesem Grund muss bei der Interpretation der Daten auf die Genauigkeitsabnahme mit zunehmender Entfernung zu einem Originalprofil geachtet werden. Ein wesentlicher Qualitätszuwachs des Ergebnisses kann lediglich durch eine Zunahme an gemessenen Profilen erfolgen, da ausschließlich eine Verdichtung der Originalprofile und somit die Zunahme an gemessenen Stützpunkten eine Verbesserung bedeutet. Ein Vergleich der gemessenen Querprofile mit dem ALS-DGM in jenen Bereichen, die oberhalb der Wasseroberfläche liegen, ergibt einen mittleren Betrag der Höhendifferenzen von 0,5 m.

Bei einer mittleren Flussbreite von 80 m und 10 Längslinien (Abb. 6a) wird das DFM stark generalisiert, was bei 50 Längsprofilen deutlich geringer ausgeprägt ist (Abb. 6b). Rechenzeit und Genauigkeit des interpolierten DFM werden im Wesentlichen über die Anzahl der Längsprofile gesteuert. Der optimale Root-Mean-Square-Error (RMSE) der Höhen des Ras-

ter-DFM an den Messpunkten der Originalprofile wird bei einem Sohlenmodell mit 80 Längsprofilen erreicht ($\text{RMSE} = 0,07 \text{ m}$). Eine weitere Steigerung der Anzahl der Längsprofile führt zu keiner wesentlichen Verbesserung des RMSE, erhöht aber die Rechenzeit.

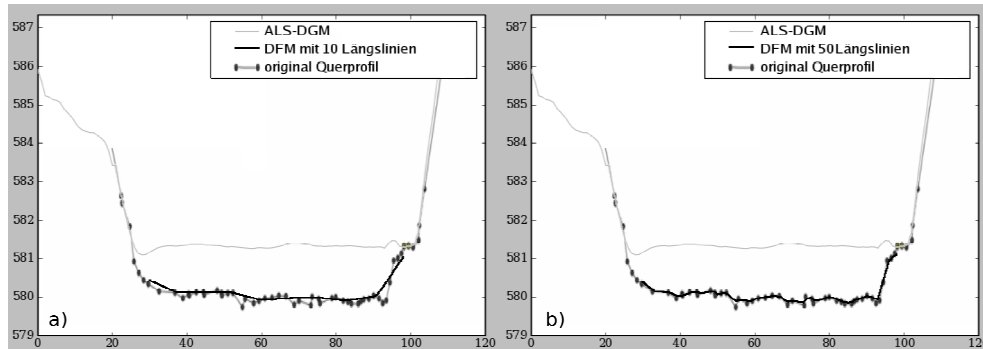


Abb. 6: a) Generalisiertes DFM interpoliert aus 10 Längsprofilen mit $\text{RMSE} = 0,31 \text{ m}$ zwischen Raster-DFM und Originalquerprofil; b) DFM aus 50 Längsprofilen berechnet ($\text{RMSE} = 0,08 \text{ m}$)

3.2 Einsatzgebiete

Für eindimensionale hydraulische Modellierungen werden Querprofilen als Modellierungsbasis verwendet. Durch die Integration eines DFM in ein ALS-DGM kann eine Verbesserung im Bereich der Hochwassermodellierung erreicht werden, da an jeder beliebigen Stelle des DGM-W ein Profil für Modellierungszwecke abgefasst werden kann. Entlang dieser Profile kann die Geländehöhe des ALS-DGM-W extrahiert und an das Profil übergeben werden. Optimalerweise wird der Abstand der in Kapitel 2.3 berechneten Querlinien so gewählt, dass diese direkt als Eingangsdaten für die Modellierungssoftware (z. B. HEC-RAS) verwendet werden können.

Weitere Anwendungen sind Volumensberechnungen des Wasserkörpers, Monitoring von Sohlveränderungen über mehrere Messperioden oder Geschiebetransportberechnungen. Für das vorliegende Testgebiet wurde eine 1D-Hochwassermodellierung (HEC-RAS) mit einer Durchflussmenge von $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ durchgeführt. Dies entspricht in etwa der Hochwasserspitze des Augusthochwassers 2005. Einerseits wurden die Berechnungen auf Basis des neu errechneten DGM-W und andererseits auf dem ursprünglichen ALS-DGM durchgeführt. Für den rund $2,2 \text{ km}^2$ großen Ausschnitt des Testgebietes ergibt die Berechnung auf dem ALS-DGM eine Überschätzung der Überflutungshöhen um rund $0,2 \text{ m}$ (+8%) und einen Zuwachs der Überflutungsfläche von rund 3 ha (+6%).

3.3 Diskussion

Der hier vorgestellte Ansatz soll als weiterer Beitrag zur Verbesserung gängiger Hochwassermodellierungen gesehen werden. Die Implementierung aller beschriebenen Komponenten (z. B. Wasseroberflächen- und Mittellinienerkennung sowie Ableitung von Längsprofilen)

len) in GRASS GIS stellt eine Erweiterung der bestehenden GIS-Funktionalität dar. Bei diesem Verfahren werden lediglich ein DGM und eingemessene Querprofile als Eingangsdaten benötigt. Multitemporale Analysen sind durch Einlesen von zeitlich sequentiellen Eingabedaten möglich. Durch den hohen Automatisierungsgrad dieser Methode bleiben dem Benutzer keinerlei manuell auszuführende Zwischenschritte. Die Outputdaten der verschiedenen Module (z.B. Wasserflächenpolygon) dienen als Eingabedaten für den nächsten Bearbeitungsschritt. Die völlig freie und eigenständige Parameterwahl bringt ein hohes Maß an Flexibilität, aber auch ein hohes Risiko für Fehleinschätzungen und Fehlinterpolationen mit sich. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, wird hier der Schwellenwert für die Brückenerkennung zu groß gewählt. Dadurch werden die Brückenpfeiler nicht entfernt und im DFM als Rampen vom Originalprofil mit Pfeiler zum nächsten Originalprofil abgebildet. Eine weitere häufige Fehlerquelle ist ein zu geringer Abstand der Flussquerlinien (siehe Kap. 2.3). Durch das Überschneiden zweier Querlinien treten Interpolationsfehler auf, die das DFM unbrauchbar machen.

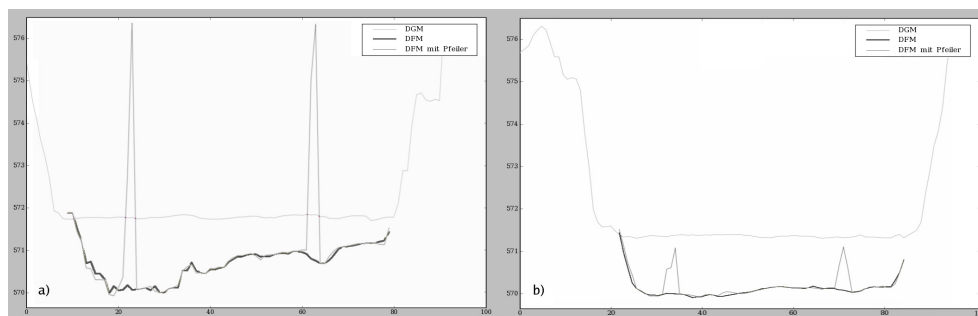


Abb. 7: a) Profilschnitt (ALS-DGM, DFM mit/ohne Brückenpfeiler) am Originalprofil mit Brückenpfeiler (Toleranzschwelle bei erfolgreicher Brückenerkennung 1,5 m, bei erfolgloser 10 m), b) Profilschnitt unmittelbar vor Originalprofil ohne Pfeiler

4 Ausblick

Ein wesentlicher Teil der Arbeit besteht in der Erkennung der Wasseroberfläche. Der hier vorgestellte Seeded-Region-Growing-Ansatz in Kombination mit dem reklassifizierten Neigungsraaster liefert gute Ergebnisse für Anwendungen auf einem Raster-DGM. Um eine höhere Genauigkeit erreichen zu können als bei der vorgestellten rasterbasierenden Methode, bietet sich eine Methode an, die direkt auf den Laserpunkten arbeitet, wie sie z. B. bei HÖFLE (2007) vorgestellt wird. Durch eine punktwolken-basierte Wasseroberflächenableitung kann die Lagegenauigkeit der Wasseroberfläche deutlich verbessert und daher der Lagefehler der Interpolation minimiert werden. Die hier vorgestellte Methode soll einerseits als Ergänzung zu bereits bestehenden Verfahren und andererseits als ein Beitrag zur Open-Source-Entwicklung gesehen werden. Es wird aufgezeigt, dass es unter ausschließlicher Verwendung von OpenSource GIS-Software möglich ist, komplexe Abläufe zu modellieren und als eigenständige Module in GRASS GIS zu implementieren.

Danksagung

Dank an den Hydrographischen Dienst des Landes Tirol und das alpS – Zentrum für Naturgefahren Management für die Bereitstellung des ALS-DGM und der Querprofildaten.

Literatur

- FIOOLE, A. (2000): Spatial interpolation of geographic data with prediction of the random error. In: Tagungsband "Modellierung von Höhendaten für hydrologische Fragestellungen", Kolloquium der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz.
- FLANAGIN, M., GRENOTTON, A., RATCLIFF, J., SHAW, K. B., SAMPLE, J. & ABDELGUERFI, M. (2007): Hydraulic Splines: A Hybrid Approach to Modeling River Channel Geometries. In: Computing in Science & Engineering, 9/05. Los Alamitos, S. 4-15.
- GRASS DEVELOPMENT TEAM (2008): Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software. – <http://grass.itc.it> (30.01.2008).
- HEITZINGER, D. & KAGER, H. (1998): High quality DTMs from contourlines by knowledge-based classification of problem regions. In: Proceedings of the International Symposium on "GIS – Between Visions and Applications", ISPRS Comm. 4 Bd. 32, Part 4. Stuttgart, S. 230-237.
- HÖFLE, B. (2007): Detection and Utilization of the Information Potential of Airborne Laser Scanning Point Cloud and Intensity Data by Developing a Management and Analysis System. Dissertation, Institut für Geographie, Universität Innsbruck.
- KRAUS, K. & PFEIFER, N. (1998): Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 53 (4), S. 193-203.
- MANDLBURGER, G. (2006): Topographische Modelle für Anwendungen in Hydraulik und Hydrologie. Dissertation, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, TU Wien.
- MANDLBURGER, G. & BRIESE, C. (2007): Using Airborne Laser Scanning for Improved Hydraulic Models. In: Proceeding of the International Congress on Modeling and Simulation – MODSIM07. Christchurch, New Zealand, S. 731-738.
- MANDLBURGER, G. & BROCKMANN, H. (2001): Modelling a watercourse DTM based on airborne laser-scanner data – using the example of the River Oder along the German/Polish Border. In: Proceedings of OEEPE Workshop on Airborne Laserscanning and Interferometric SAR for Detailed Digital Terrain Models. Stockholm.
- MANDLBURGER, G. & STROBELBERGER, G. (2007): Digitale Geländemodelle zur Simulation von Überschwemmungsszenarien. In: Österreichische Zeitschrift für Vermessung & Geoinformation 3/2007. Wien, S. 206-218.
- PYTHON SOFTWARE FOUNDATION (2008): Python programming language. – <http://www.python.org> (30.01.2008).
- US-ARMY (2008): HEC-RAS. – <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras> (30.01.2008).
- WARMERDAM, F. (2008): OGR – Simple Feature Library. – <http://www.gdal.org/ogr> (30.01.2008).