

Über die hydraulische Modellierung von Wildbächen mittels hochaufgelöster hydrographischer LiDAR-Daten

Ramona Baran, Wolfgang Dobler, Frank Steinbacher, Marcel Ritter und Markus Aufleger

Um das Hochwasserrisiko, den Sedimenttransport oder ökologischen Zustand von Flüssen und Wildbächen zu beurteilen, muss man deren hydraulische Rahmenbedingungen kennen. Für deren zuverlässige Berechnung (computational fluid dynamics, CFD) werden hochwertige Geländedaten des Bachbettes sowie der angrenzenden Ufer- und Überflutungsbereiche benötigt. Klassische digitale Geländemodelle (DGMs) werden bisher aus topographischen, flug-gestützten Laserscans (rote Wellenlänge) abgeleitet und mit terrestrischen Vermessungen entlang des Bachbettes ergänzt. Letztere werden meist entlang einer begrenzten Anzahl definierter Profillinien vorgenommen und sind notwendig, da die klassischen Lasersysteme nicht den Wasserkörper durchdringen. Somit sind geometrische Daten der Gewässersohle und Uferstrukturen mit einer hohen räumlichen Auflösung und Abdeckung vergleichbar der Datendichte, die aus topographischem Laserscanning für die Überflutungsebene gewonnen wird, kaum verfügbar. Hier wurde nun ein neues, wasser-durchdringendes Lasersystem (grüne Wellenlänge, FFG-Projekt zwischen Universität Innsbruck und Riegl LMS) verwendet, um alpine Gebirgsbäche zu vermessen. Es konnten detaillierte und umfassende Daten des Bachbettes, Ufers und benachbarten Vorlandes mit einem einzigen Sensor gewonnen werden (ca. 30 Punkte/m²). Nachfolgend wurde untersucht, in wie weit diese Hydromapping-Daten als Grundlage für numerische Telemac2D-Simulationen verwendet werden können. Die Netzgenerierung für diese Simulationen erfolgte auf Grundlage von Bruchkanten oder einer Ausdünnung der Punktwolke. Schlussendlich wurde eine Kalibrierung durchgeführt, die mittels zahlreicher Punkte der Wasseroberfläche aus den Hydromapping-Daten realisiert wurde. Hydromapping-Daten stellen eine sehr gute Datengrundlage dar, die besonders für die Generierung von Berechnungsnetzen des Flussbettes geeignet sind. Dies wird durch den Vergleich zweier Simulationsergebnisse verdeutlicht, wo das zu Grunde liegende Netz einmal auf der Interpolation zwischen Querprofilen und einmal auf der Verwendung von Hydromapping-Daten beruht. Die CFD-Ergebnisse unserer Studie zeigen zudem die neuen Möglichkeiten auf, um gemessene und simulierte Wassertiefen zu vergleichen.

Schlüsselwörter: Hydromapping, digitale Geländemodelle, hydraulische Simulationen, computational fluid dynamics, Netzerstellung, Rauheit

Knowledge about the hydraulics in rivers and alpine torrents is relevant to quantify flood risks, to study sediment transport and to assess the water-bodies ecology. Usually, computational fluid dynamics (CFD) simulations are the preferred tool to calculate velocities, water depths and sediment transport for the discharges of interest, which then serve as a basis for the evaluation of flood risks or ecological conditions. To enable reliable calculations, high-quality terrain data of the riverbeds, riverbanks, and floodplains are required. Typically, DTMs of the floodplains reconstructed from airborne light detection and ranging (LiDAR) data are combined with terrestrial surveys of riverbanks and riverbeds. The terrestrial surveys are necessary as the lasers usually cannot penetrate the water surface in the observed water-bodies. They are labor intense and can be located in difficultly accessible terrain. Therefore, data of the riverbeds' and riverbanks' geometry is hardly available at such a high resolution and extent that is comparable to the airborne LiDAR based data of the flood-

plains. In this study a newly available airborne water-penetrating LiDAR system was used to survey alpine torrents. Detailed and extensive data of riverbeds and riverbanks were acquired. The general applicability of the data as a basis for a Telemac-2D simulation was investigated. Mesh creation based on breaking edges or on a downsampled point cloud are shown. Finally, a calibration was done based on abundant water surface points stemming from the airborne-laser scanning. The LiDAR data turned out to be a very suitable data source for constructing the computational grids of the riverbed. This is confirmed by a comparison of simulation results, where on one hand the created mesh is based on the interpolation between cross-sections, and hydromapping data on the other hand. The CFD results showed new possibilities in the comparison of measured and simulated water heights.

Keywords: Hydromapping, digital terrain models, hydraulic simulations, computational fluid dynamics, mesh generation, roughness

1 Einleitung

Die Topographie von Flussbetten, Überschwemmungsebenen, Mündungsbereichen und Küstenzonen möglichst genau widerzugeben ist einer der wichtigsten hydraulischen Aspekte innerhalb des Wasserbaus. Obwohl verschiedene Faktoren die hydraulische Situation in Gewässern beeinflussen, müssen Unterschiede im hydraulischen Setup (2D & 3D Modellierung) bezüglich räumlicher Auflösung für eine Modellierung derart kombiniert werden, dass realistische numerische Modelle erzeugt werden können.

Hochwasser- u. Wellen-Modelle basieren zumeist auf digitalen Höhenmodellen, die aus hochaufgelösten topographischen, fluggestützten Laserdaten gewonnen wurden (Abb. 1). Das digitale Höhenmodell der Gewässersohle selbst basiert dabei normalerweise auf vereinfachten und interpolierten Daten zwischen Querprofilen, die durch manuelle terrestrische Vermessung gewonnen wurden, oder Sonardaten. Auf Grund fehlender hochaufgelöster Information ist die Modellierung flacher Bereiche wie in Flussmündungen, Kiesbänken oder Dünenstrukturen sehr zeitaufwendig oder gar unmöglich (Abb. 1). Die wiederholte Überflutung von Stadt- und Küstengebieten in den letzten Jahrzehnten hat deutlich gemacht, dass wir die Modellierung solcher Ereignisse wesentlich verbessern müssen. Der Schwerpunkt muss dabei noch mehr auf der Untersuchung der Unsicherheiten der Simulationen selbst liegen, die auf die Inputdaten zurückzuführen sind. Die Gesellschaft verlangt vertrauenswürdige und detaillierte Informationen hinsichtlich der Magnitude und Wahrscheinlichkeit katastrophaler Flutereignisse, um Hochwasserschutzmaßnahmen planen zu können. Daher muss die vereinfachte Annahme über die Gestalt der Gewässersohle umgangen werden und die Modellierung durch Verwendung der eigentlichen Form der Gewässersohle verbessert werden. Des Weiteren sind zusätzliche Information über die Oberflächenrauheit und Wasserspiegellage relevant, um numerische Modelle zu kalibrieren. Airborne Hydromapping ist hierbei eine Technologie, die u.a. dazu entwickelt wurde, diese Probleme zu lösen. Beispielsweise kann die Wasserspiegellage zum Zeitpunkt der Messung direkt aus den Hydromapping-Daten abgeleitet werden oder die geometrische Sohlinformation dazu genutzt werden, die Oberflächenrauheit näher zu charakterisieren.

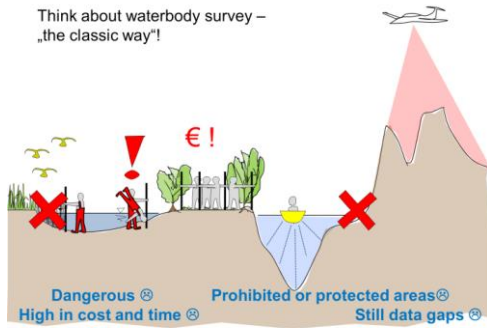


Abb. 1: Die klassische Gewässervermessung.

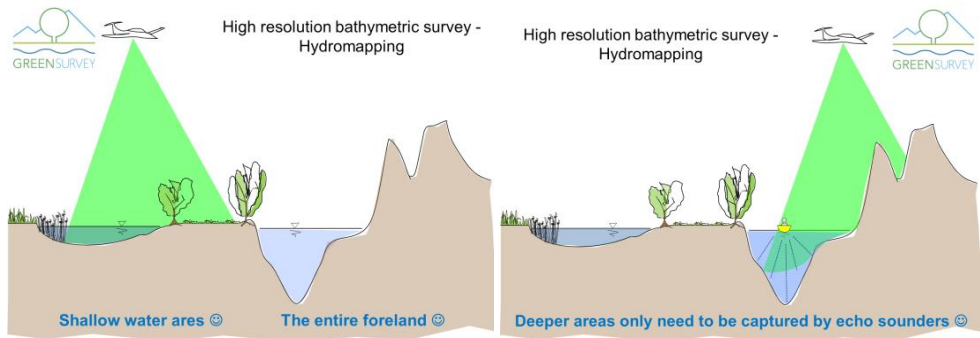


Abb. 2: Hochaufgelöste Gewässervermessung mit Hydromapping ergänzt durch Echolot.

2 Hydromapping der Ahr

In dieser Studie wurde ein neues, wasser-durchdringendes Lasersystem (grüne Wellenlänge, FFG-Projekt zwischen der Universität Innsbruck und Riegler LMS) verwendet (Abb. 2), um den alpinen Gebirgsfluss Ahr zwischen Sand in Taufers und Bruneck in Südtirol auf einer Länge von ca. 20 km zu vermessen (Abb. 3). Die Vermessung fand im Dezember 2012 statt und es wurden 33 Scanstreifen erfasst, womit eine durchschnittliche Gesamtpunktdichte von 20-40 Punkten/m² erzielt wurde. Vor der eigentlichen Georeferenzierung der Hydromapping-Daten wurden die 33 Scanstreifen zunächst zueinander angepasst, um eine in sich konsistente Punktwolke zu erhalten, d.h. Beseitigung von vertikalen und horizontalen Versätzen zwischen den Scanstreifen. Die Genauigkeit dieses Streifenabgleichs liegt bei 6 cm (Standardabweichung). Die gesamte Punktwolke wurde dann in ihrer absoluten Lage und Höhe angepasst (Koordinaten UTM Zone 32N). Für die Georeferenzierung wurden fünf terrestrische vermessene Referenzflächen verwendet, die über das Projektgebiet verteilt sind (Abb. 3). Die Lage der Referenzflächen wurde mittels der Hydromapping-Daten festgelegt und jede Fläche ist über die vier äußeren Ecken der Markierung von Fußgängerüberwegen definiert. Die Genauigkeit der Georeferenzierung liegt bei 3 cm (Standardabweichung). Die Punktwolke wurde mit der Software *HydroVISH* klassifiziert (Abb.

4). Für Punkte, die unterhalb des Wasserspiegels liegen, wurde die Wassertiefe korrigiert (Refraktion).

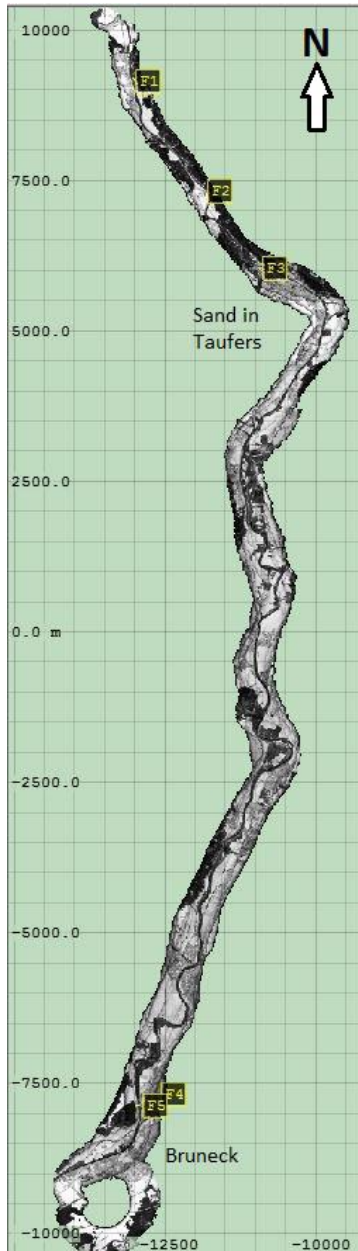


Abb. 3: Projektgebiet entlang der Ahr in Südtirol. Gelbe Beschriftungen zeigen Lage der Referenzflächen für die Georeferenzierung (RiProcess 1.5.9, RIEGL®).

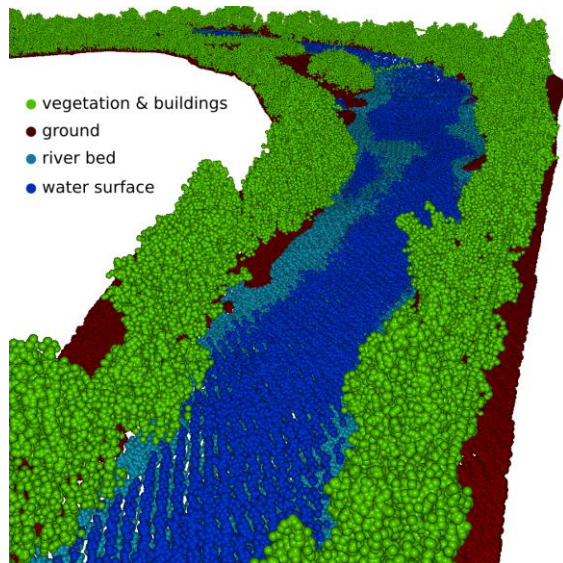


Abb. 4: Detailausschnitt der klassifizierten Punktwolke. Die Farbgebung entspricht der Legende.

3 Netzerstellung

Für die Datenauswertung, Netzerstellung und Visualisierung der Ahr-Daten wurde das Software-Paket *HydroVISH* basierend auf dem Softwarekern *VISH* verwendet /Benger et al. 2007/. Mit *HydroVISH* können eine Vielzahl von Daten unterschiedlichen Ursprungs – gemessene und/oder berechnete/simulierte Daten – miteinander verschnitten werden. *HydroVISH* ist durch eine flexible Programmierumgebung charakterisiert, in der zusätzliche Module für eine weitergehende Datenauswertung integriert werden können. Zahlreiche Module sind bisher schon implementiert worden, um Punktwolken ingenieurkonform aufzubereiten und auszuwerten.

Die Punktwolke für den Fluss Ahr in Südtirol besteht aus 23.1×10^6 Punkten und wurde in folgende Klassen eingeteilt: Boden Vorland, Vegetation & Gebäude, Gewässersohle und Wasseroberfläche (Abb. 4). Während der Befliegung am 12. Dezember 2012 betrug der Abfluss der Ahr $12 \text{ m}^3/\text{s}$ /Südtirol, 2012/. Der simulierte Flussabschnitt ist 20 km lang, wobei das Vorland nur teilweise berücksichtigt wurde.

Eine wesentliche Aufgabe bestand zunächst darin, die Informationsdichte der Punktwolke auf ein Maß zu reduzieren, dass morphologische Details des Flussbettes nicht verloren gehen. Um ein 2D-Netz zu erstellen, werden nur die Bodenpunkte des Vorlandes sowie die Punkte der Gewässersohle verwendet und diese werden im Folgenden als *Grundpunkte* zusammengefasst. Obwohl die Hydromapping-Vermessung sehr gute Ergebnisse geliefert hat, gibt es an manchen Stellen Lücken in den *Grundpunkten* (Abb. 5). Diese können durch dichte Vegetation am Ufer und damit verbundene Abschattungseffekte oder durch starke Weißwasserbildung verursacht worden sein.

Die Lücken wurden zunächst aufgefüllt, wofür die *Grundpunkte* zuerst auf einem gleichmäßigen Raster abgebildet wurden. Dann wird ein flood-fill-Algorithmus /Bradski 2008/ verwendet, um alle leeren Rasterzellen außerhalb der Punktwolke als *outside* zu markieren. Danach werden alle leeren Zellen innerhalb der Punktwolke mit dem Mittelwert der benachbarten Zellen aufgefüllt (Abb. 6). Die so berechneten Punkte werden dann der ursprünglichen Punktwolke aus *Grundpunkten* hinzugefügt (rot in Abb. 5).

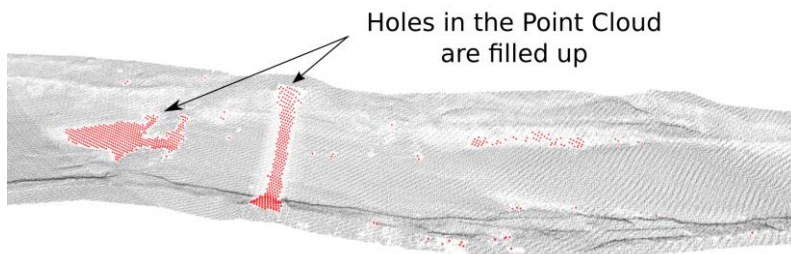


Abb. 5: Ausschnitt mit *Grundpunkten* in grau und aufgefüllten Punkten in rot zum Schließen der Lücken in den *Grundpunkten*.

data	data	data	data	data	data	data
data	data	data	NW	N	NE	data
outside	data	data	W	empty cell	E	data
outside	data	data	SW	S	SE	data
outside	data	data	data	data	data	data
outside	outside	outside	data	data	data	data

Abb. 6: Verwendetes Kernel zum Auffüllen der Lücken wie im Text beschrieben. Der Wert für die leere Zelle in der Mitte ergibt sich aus dem Mittelwert der acht benachbarten Zellen (Himmelsrichtungen N, NE, ...).

3.1 Netzerstellung mit Bruchkanten

Um Bruchkanten bei der Netzerstellung wie in Abb. 7 verwenden zu können, wird die Punktwolke aus *Grundpunkten* und aufgefüllten Lückepunkten zuerst auf einen gleichförmigen Raster abgebildet (Zellgröße 0.5 x 0.5 m, Höhenfeld in Abb. 8a). Anschließend wird eine Gauß-Glättung durchgeführt, um große Spitzen im Höhenfeld zu reduzieren. Durch die Anwendung des Sobel-Operators /Soille 2003/ wird dann der Gradient der Bildintensität berechnet (Abb. 8b). Auf Grundlage eines Schwellenwertes wird der Gradient der Bildintensität anschließend in ein binäres Bild überführt, wobei ein geringer Gradient 0 entspricht und ansonsten 1 ist (Abb. 8c). Durch die Anwendung des Marching-Square-Algorithmus nach /Foley et al. 2013/ werden die Isolinien des binären Bildes auf die entsprechenden Höhenwerte zurückgerechnet (Abb. 8d). Abschließend wird eine Triangulation zwischen den Bruchkanten in *BlueKenue* (Version 3.3.4) durchgeführt und die Höheninformation der Punktwolke auf das triangulierte Netz abgebildet (Abb. 7).

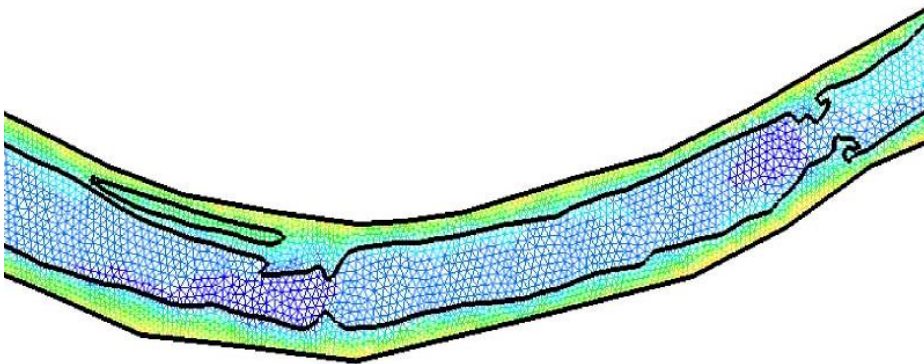
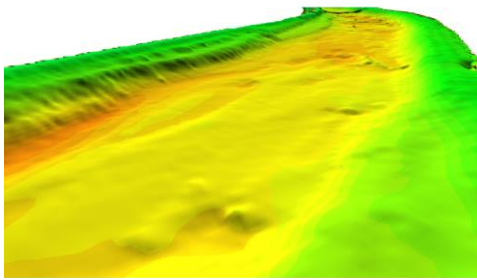
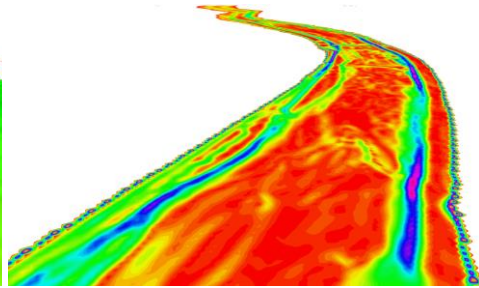


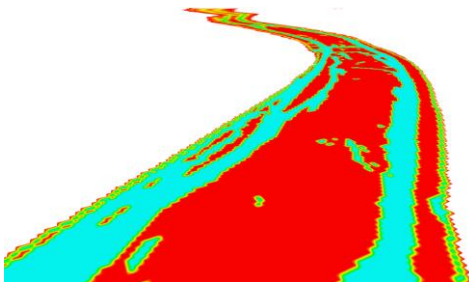
Abb. 7: Berechnungsnetz auf Grundlage von Bruchkanten. Die Triangulierung zwischen den Kanten wurde mit *BlueKenue* realisiert (Dreiecksseitenlänge 1-3 m).



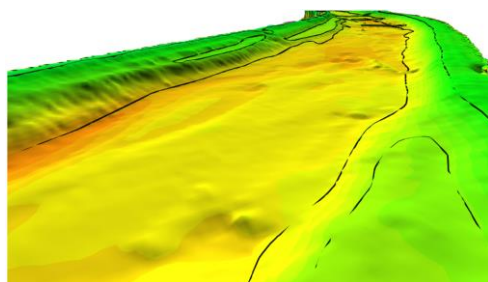
(a) Höhenfeld



(b) Gradient der Bildintensität (Sobel)



(c) Schwellenwert für den Gradient



(d) Bruchkanten

Abb. 8: Bildbasierte Detektion von Bruchkanten durch Glätten, Sobel-Operator, Schwellenwert und Iso-Linien wie im Text erläutert.

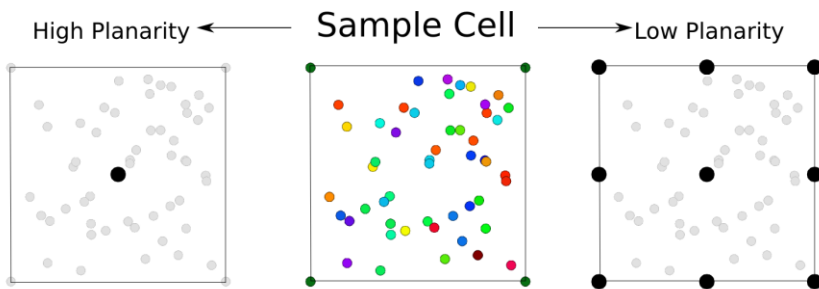


Abb. 9: Ausdünnung der Punktwolke: Bei großer Planarität werden alle Punkte durch einen gemittelten Punkt ersetzt (links). Ansonsten wird ein Raster mit kleinerer Zellgröße verwendet (rechts).

3.2 Netzerstellung durch Ausdünnung der Punktwolke

Auf Grund der sehr hohen Punktdichte (im Schnitt 20-40 Punkte/m²) wird die Punktwolke aus *Grundpunkten* und aufgefüllten Lückenpunkten mit Hilfe eines gleichförmigen Rasters ausgedünnt. Um auch detaillierte Strukturen der Gewässersohle durch die Ausdünnung nicht zu verlieren, werden zwei unterschiedlich große Zellgrößen für diesen Raster verwendet (Abb. 9). Eine größere Zellgröße (3 x 3 m) wird für ebene Bereiche gleicher Neigung verwendet und eine kleinere Zellgröße von 1.5 x 1.5 m für unebene Bereiche (z.B. Uferböschung). Um zwischen der groben und der feinen Rasterzellgröße zu unterscheiden,

wurde der *Punktverteilungstensor* berechnet. Nach /Ritter & Bengler 2012/ ist dieser ein Set von N Punkten $\{P_i; i = 1, \dots, N\}$ als

$$S(P_i) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \omega_n(|t_{ik}|, r) (t_{ik} \otimes t_{ik}^T),$$

wobei $\otimes$ das Tensorprodukt ist, τ die transponierte Matrix und $t_{ik} = P_i - P_k$, $\omega_n(|t_{ik}|, r)$. Der Radius r ist ein vom Anwender spezifizierter Abstand zu den Nachbarnpunkten P_i . Die Gewichtungsfunktion ω_{ik} ist 0 außerhalb dieses Radius. Der *Verteilungstensor* ist symmetrisch und positiv. Durch eine Eigenwertanalyse erhält man drei Eigenwerte, mit denen der Tensor an Hand von drei Formfaktoren beschrieben wird /Westin et al. 1997/:

$$c_{\text{linear}} = \lambda_3 - \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$$

$$c_{\text{planar}} = 2 (\lambda_2 - \lambda_1) / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$$

$$c_{\text{sphärisch}} = 3 \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3).$$

Hier wurde der Koeffizient c_{planar} verwendet, um zwischen ebenen und unebenen Bereichen zu unterscheiden (Abb. 10). Mit Hilfe eines Schwellenwertes wurde dann ein Raster mit den zwei unterschiedlichen Zellgrößen von 3 x 3 m und 1.5 x 1.5 m konstruiert (Abb. 9). Als Höhenwert wurde der Mittelwert aller Punkte in der entsprechenden Zelle verwendet.

Anschließend werden die ausgedünnten Punkte mittels qhull-Algorithmus trianguliert /Barber et al. 1996/. Um eine Vermaschung außerhalb des Flussschlauchs zu vermeiden, werden Dreiecke mit einer Kantenlänge größer als $\sqrt{3^2 + 3^2}$ m aus der Triangulation entfernt (Abb. 11). Das so erstellte Netz wird als 2dm-Datei für SMS exportiert und dann wiederum in *BlueKenue* (Version 3.3.4) zur Weiterbearbeitung importiert. Im Folgenden wurde dieses Netz für eine CFD-Simulation verwendet.

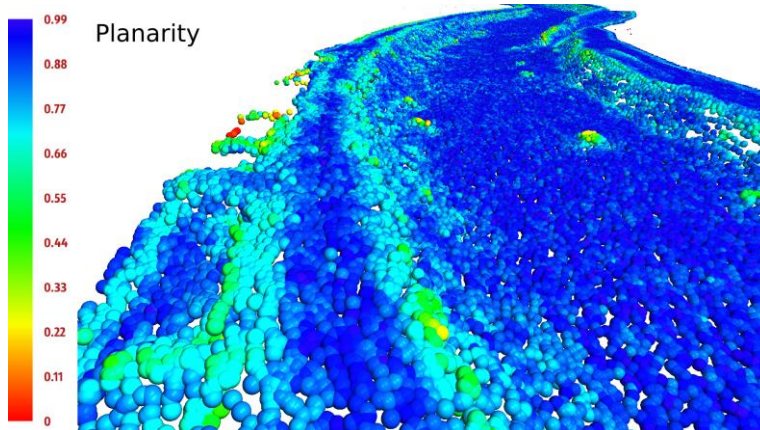


Abb. 10: Planarität der Punktwolke: Blaue Punkte weisen eine hohe Planarität auf, d.h. sie liegen auf einer Ebene, und rote Punkte haben eine geringere Planarität.

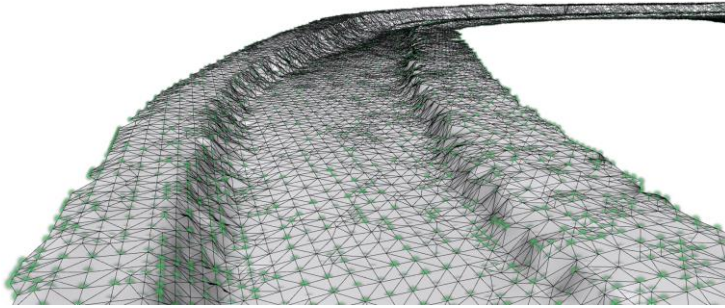


Abb. 11: Triangulation der ausgedünnten Punktwolke.

4 Kalibrierung der Telemac2D-Simulation

Die CFD-Simulation wurde mit der open-Source Software *Telemac2D* (Version 6.2) durchgeführt. Die Randbedingungen wurden dabei in *BlueKenue* (Version 3.3.4) definiert, wobei ein Ein- und Auslassdurchfluss Q von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ auf Grundlage der entsprechenden Wasserspiegelhöhen aus den Hydromapping-Daten benutzt wurde. Die Netzunabhängigkeit wurde mit einem Netz überprüft, für welches um 20% größere Rasterzellen verwendet wurden. Zwei Turbulenzmodelle (k - ϵ und konstante Wirbelviskosität) wurden miteinander verglichen und ergaben keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der erzielten Ergebnisse. Für die Kalibrierung wurde das Modell mit der konstanten Wirbelviskosität von $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ verwendet.

Die Rauheit nach Strickler wurde automatisch berechnet, indem der gegenwärtige Wasserspiegel aus der Numerik mit dem Referenzwasserspiegel aus den Hydromapping-Daten verglichen wurde. Wenn der Wasserspiegel aus der CFD-Simulation über dem Referenzwasserspiegel lag, wurde der Rauheitswert vergrößert (also glatter) und umgekehrt. Diese Anpassung wurde nach jeder Stunde physikalischer Simulationszeit durchgeführt. Die maximal notwendige Änderung der Rauheit betrug nicht mehr als 5%, wobei ein oberes und unteres Limit von 100 bzw. $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ verwendet wurden. Wenn der gegenwärtige CFD-Wasserspiegel weniger als 2 cm vom Referenzwasserspiegel abwich, erfolgte keine Anpassung der Rauheit. Gab es über einem Netzknoten keinen Referenzwasserspiegel, so wurde eine mittlere Rauheit von $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ verwendet. Nach 20 Stunden physikalischer Simulationszeit hat sich ein stationärer Zustand für den Durchfluss, die Wasserspiegellage und die Rauheit eingestellt. Der Algorithmus für die Rauheitsanpassung wurde in *Fortran* (Subroutine *corstr.f* durch *Telemac2D* bereitgestellt und verwendet) geschrieben und dann mit der binären Ausführungsdatei von *Telemac2D* verknüpft.

Für den Referenzwasserspiegel wurde zusätzlich ein eigenes Raster erstellt. Die Wasserspiegelpunkte aus den Hydromapping-Daten liegen innerhalb eines 15 cm mächtigen Bandes (Abb. 12). Diese Punkte werden in einzelne $3 \times 3 \text{ m}$ große Zellen aufgeteilt und nur die obersten Punkte (99%-Quantile) werden als gültige Punkte der Wasseroberfläche herange-

zogen /Mandlbürger et al. 2013/. Die Punkte werden durch einen einzelnen Punkt ersetzt, der sich im Zentrum der Zelle befindet und die Höhe $z = q_{0.99}$ besitzt. Dieses Raster stellt den Referenzwasserspiegel dar und wird anschließend auf das vorhandene CFD-Netz abgebildet, um damit die CFD-Wasserspiegellagen für jeden Knoten zu vergleichen. Der berechnete Referenzwasserspiegel beruht zu ungefähr 50% auf gemessenen Hydromapping-Daten. Eine Extrapolation ist notwendig, da in sehr seichten Gewässerabschnitten mit einer Wassertiefe kleiner als 15 cm die Wasserspiegellage mit der hier verwendeten Lasertechnologie nicht erfasst werden kann.

Die Stricklerwerte für die Rauheit liegen zwischen 25 und 50 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ für den im Detail gezeigten Ausschnitt in Abb. 13, wobei die mittlere Rauheit im Simulationsgebiet 35 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$ beträgt (Luftbild der Ahr in Abb. 14 zum Vergleich). Die Wasserspiegellage basierend auf den Rauheitswerten ist zudem in Abb. 15 dargestellt. Der Unterschied zwischen der Referenz- und CFD-Spiegellage beträgt im Mittel 5 cm bei einer Standardabweichung von 11 cm (Abb. 16). Beide Wasserspiegellagen zeigen also eine gute Übereinstimmung. Die Standardabweichung von 11 cm ist dabei geringfügig größer als jene aus dem Streifenabgleich mit 6 cm. Die Ursache dafür liegt in den Hydromapping-Daten selbst, da der Wasserspiegel mit der neuen Lasertechnologie erst ab einer Wassertiefe von 15 cm erfasst werden kann.

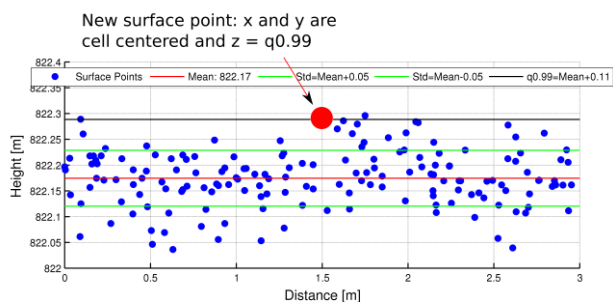


Abb. 12: Wasseroberflächenpunkte aus den Hydromapping-Daten innerhalb einer Beispielzelle von 3 x 3 m. Diese werden auf einem Raster abgebildet – der rote Punkt liegt im Zentrum dieser Zelle und hat die gemittelte Höhe der obersten Punkte (99%-Quantile).

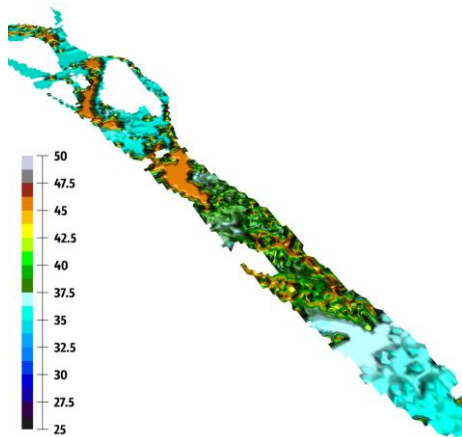


Abb. 13: Berechnete Stricklerrauheitswerte [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$] auf Grundlage des Vergleiches zwischen CFD- und Referenzwasserspiegellagen. Dargestellt sind nur die Ergebnisse für die benetzte Oberfläche.



Abb. 14: Luftbildaufnahme der Ahr: Geschätzte Stricklerrauheitswerte zwischen 30 bis 40 $\text{m}^{1/3}/\text{s}$.

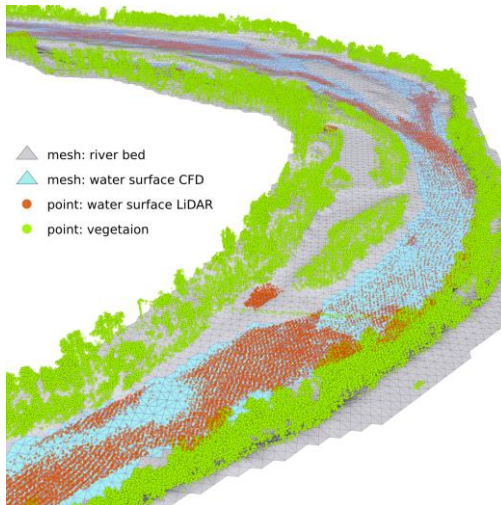


Abb. 15: Detailansicht des Vergleiches zwischen CFD-Wasserspiegel in hellblau und Wasserspiegelpunkten aus den Hydromapping-Daten in braun.

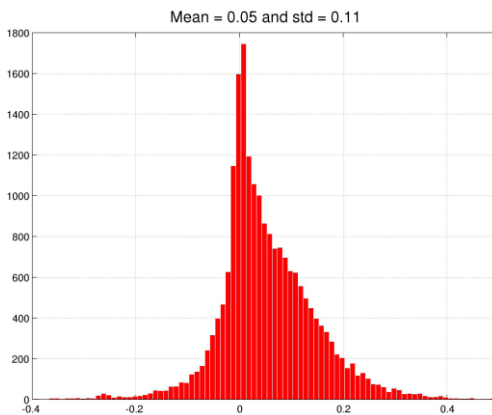


Abb. 16: Statistisch ermittelter Unterschied zwischen Referenz- und CFD-Wasserspiegel liegt im Mittel bei 5 cm mit einer Standardabweichung von 11 cm.

5 Simulationen mit unterschiedlicher Datengrundlage

Hochaufgelöste LiDAR-Punktdaten wie die der Ahr sind sehr gut für numerische Simulationen geeignet. Dies verdeutlicht insbesondere der abschließende Vergleich zweier Simulationsergebnisse, wo das zu Grunde liegende Netz einmal auf der Verwendung von Hydromapping-Daten und einmal auf der Interpolation zwischen Querprofilen beruht /Jocham et al. 2014/. Für einen 2 km langen strukturreichen Abschnitt der Ahr wurden von /Jocham et al. 2014/ die *Grundpunkte* zunächst auf ein 1 x 1 m Raster abgebildet (Abb. 17 links). Zum anderen wurden aus den *Grundpunkten* Querprofile mit einem Abstand von 40 m extrahiert und das Berechnungsnetz zwischen diesen interpoliert (Abb. 17 rechts). Die kleinräumige Strukturvielfalt des betrachteten Abschnitts wird in der ersten Variante sehr gut abgebildet, wohingegen ein deutliches Verwischen der Geländeform in der zweiten Variante erkennbar ist.

Diese Unterschiede spiegeln sich auch in den Ergebnissen der hydraulischen Berechnungen wider. In beiden Fällen wurde mit einem Abfluss von $12 \text{ m}^3/\text{s}$ gerechnet, so wie er am Tag der Befliegung gemessen wurde /Südtirol 2012/. Bei diesem Abfluss wird bei Verwendung des Netzes auf Grundlage der Hydromapping-Daten der rechtsseitige Seitenarm durchströmt im Einklang mit den Beobachtungen zum Befliegungszeitpunkt (Abb. 18 links). Dies ist aber nicht der Fall bei Verwendung des Querprofil-basierten Berechnungsnetzes (Abb. 18 rechts).

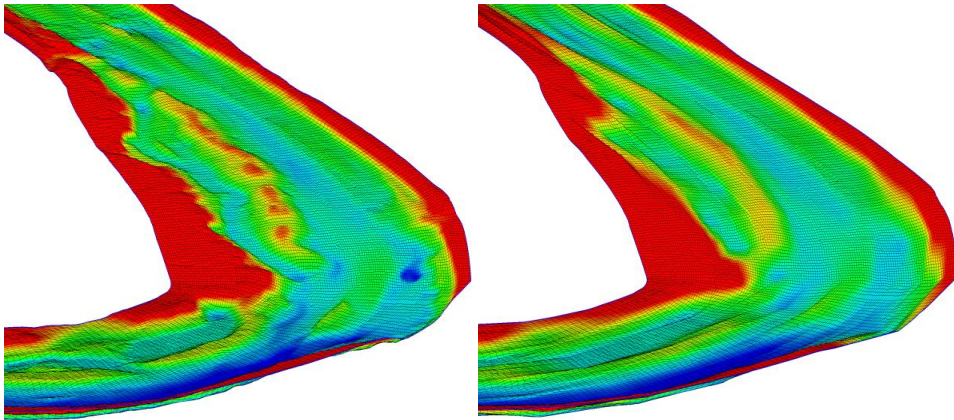


Abb. 17: Ausschnitte der beiden Berechnungsnetze der Ahr: 1 x 1 m Raster basierend auf den *Grundpunkten* aus den Hydromapping-Daten (links) und interpoliertes Netz zwischen Querprofilen (rechts) /aus Jocham et al. 2014/.



Abb. 18: Darstellung der berechneten Wassertiefen bei einem Abfluss von $12 \text{ m}^3/\text{s}$: Ergebnisse für $1 \times 1 \text{ m}$ Raster basierend auf den *Grundpunkten* aus den Hydromapping-Daten (links) und interpoliertem Netz zwischen Querprofilen (rechts) /aus Jocham et al. 2014/.

Literatur

- Barber C. B., Dobkin D. P. & Huhdanpaa H. T. (1996): *The Quickhull algorithm for convex hulls*. 22, S. 469–483+.
- Benger W., Ritter G. & Heinzl R. (2007): *The Concepts of VISH*. 4th High-End Visualization Workshop; Obergurgl, Tirol, Österreich, 18.-21. Juni 2007, S. 26–39; Berlin, Lehmanns Media-LOB.de.
- Bradski A. (2008): *Learning OpenCV*. Computer Vision with OpenCV Library, software that sees (1. ed.); O'Reilly Media; Gary Bradski and Adrian Kaehler.
- Foley J., Hughes J., van Dam A., Feiner S., McGuire M. & Sklar D. (2013): *Computer Graphics: Principles and Practice*. The systems programming series; Addison-Wesley.
- Jocham S., Dobler W., Baran R., Aufleger M. & Steinbacher F. (2014) *Einsatz hoch genauer Bathymetriedaten aus luftgestützter Vermessung in der Abfluss- und Habitatmodellierung*. Österreichische Wasser- & Abfallwirtschaft, Vol. 66 Issue, 5-6, S. 206-213.
- Mandlbürger G., Pfennigbauer M. & Pfeifer N. (2013): *Analyzing near water surface penetration in laser bathymetry - a case study at the river Pielach*. ISPRS Annals of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-5/W2, S. 175–180. Poster presentation: ISPRSWorkshop Laser Scanning 2013, Antalya, Türkei; 11.-13. November 2013.

Ritter M. & Bengler W. (2012): *Reconstructing Power Cables From LIDAR Data Using Eigenvector Streamlines of the Point Distribution Tensor Field*. Journal of WSCG Vol 20, No. 3, S. 71+, 20th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision, Plzen, Tschechien.

Soille P. (2003): *Morphological Image Analysis: Principles and Applications* (2 ed.). Seacaus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc.

Südtirol (2012): Provinz Bozen, gage height and discharge rate, www.provinz.bz.it.

Westin C., Peled S., Gudbjartsson H., Kikinis R. & Jolesz F. (1997): *Geometrical diffusion measures for mri from tensor basis analysis*. Proceedings of ISMRM, 5th Meeting, Vancouver, Canada.