

Evaluierung der Airborne LiDAR Bathymetrie in der Fließgewässer-Modellierung

KATHARINA BAUMGARTNER¹, ROBERT KLAR¹ & MARKUS AUFLEGER¹

Zusammenfassung: Die Airborne LiDAR Bathymetrie (ALB) verfügt über das immense Potential, selbst kleinräumige morphologische Strukturen flächig erfassen zu können. Eine durchaus offene Fragestellung betrifft die erreichbare Genauigkeit und die ALB Anwendbarkeit für die hydronumerische Simulation. Konsequenterweise befasst sich der vorliegende Beitrag mit einer umfassenden Evaluierung bestehend aus Datenkontrolle u.a. durch begleitende Feldmessungen und der Untersuchungen der Auswirkungen unterschiedlicher Refraktionierungskorrekturen, Netztopologien, -auflösung bzw. Rauheitszonenverteilungen. Als Anwendungsgebiet dient ein 1,5 km langer Gewässerabschnitt am Mareiterbach (Italien), der im Zuge des FHARMOR Projekts zweimal mit einem Riegl VQ-880-G Sensor vermessen wurde. Wesentliche Ergebnisse: (1) Die Genauigkeit der ALB Höhe liegt im Mittel innerhalb der GPS-Genauigkeit (<2,5 cm) und (2) bei hoher Netzauflösung lässt sich ein hervorragendes Kalibrierungsergebnis bereits mit wenigen Rauheitszonen erzielen.

1 Einleitung

Räumliche und zeitliche morphologische Veränderungen haben eine lebensraumprägende Bedeutung in der gesamtheitlichen Fließgewässerbetrachtung. Variierende Gewässerbettstrukturen bieten vielfältige Lebensräume und wirken sich positiv auf die aquatische Ökologie aus. Um solche kleinräumigen morphologischen Strukturen mit hohem Detailgrad abbilden zu können, braucht es hochaufgelöste topografische Informationen der Gewässersohle. Die herkömmliche Methode der Querprofilvermessung, deren Qualität stark von subjektiven Entscheidungen der Vermesser abhängt und einen großen zeitlichen sowie personellen Aufwand darstellt, kann durch die topobathymetrische Laserscanvermessung (ALB - Airborne LiDAR Bathymetrie) ersetzt und darüber hinaus erheblich verbessert werden. Dabei operiert ein wasserdurchdringender Laser im grünen Wellenlängenbereich ($\lambda = 532 \text{ nm}$) und erfasst die morphologischen Fließgewässerstrukturen mit einer Punktdichte von bis zu 50 Punkte/m². Dieses Verfahren kann selbst in unzugänglichen alpinen Regionen erfolgreich eingesetzt werden (AUFLEGER et al. 2015; KINZEL et al. 2013; MANDELBURGER et al. 2011; STEINBACHER et al. 2012).

Diese Arbeit entsteht im Rahmen des Forschungsprojektes "FHARMOR" - Fish Habitat in Alpine Rivers: Integrating Monitoring, Modelling and Remote Sensing (www.fharmor.it/). Es werden die Vorteile von periodischen Airborne bathymetrischen Lidar Aufnahmen anhand des Gebirgsbaches Mareiterbach untersucht. Mit einer wiederholten Untersuchung ist es möglich, morphologische Änderungen zu identifizieren. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Validierung der Datenqualität,

¹ Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Wasserbau, Österreich.

der Überprüfung der refraktierten wasserbenetzten Punkte, der Anwendbarkeit in der hydraulischen Modellierung und der Bedeutung der periodischen systematischen Flussbettmessungen für die Geschiebesimulation.

2 Methodik

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet des Mareiterbaches (Abbildung 1) liegt in der Provinz Südtirol (Italien) und ist gekennzeichnet durch ein nivo-galziales Abflussregime mit starken täglichen Schwankungen bedingt durch die große Gletscherfläche im Einzugsgebiet. Die höchste Erhebung bildet der 3471 müA hohe Gipfel der Sonnklerspitze. Die zwei Zubringer Ratschingers- und Jaufentalbach münden im breiten Trogtal in den Mareiterbach. Im betrachteten Gewässerabschnitt ist eine Pegelmessstelle zur kontinuierlichen Wasserstandsaufzeichnung situiert und weist einen mittleren jährlichen Abfluss von $7 \text{ m}^3/\text{s}$ auf.

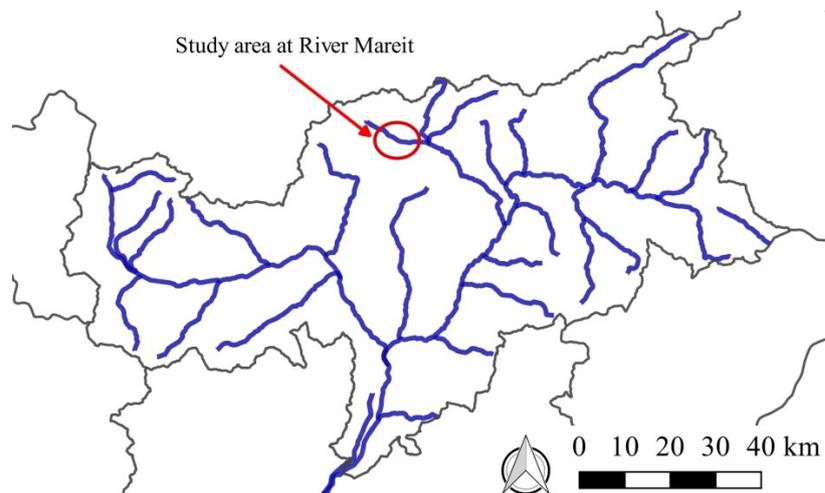


Abb. 1: Übersicht über Lage des Untersuchungsgebietes Mareiterbach in der Provinz Südtirol (Italien)

Der ausgewählte Flussabschnitt wurde im Jahr 2009 durch ein Revitalisierungsprojekt in ein dynamisches Flusssystem übergeführt, welches heute ein mittleres Gefälle von 1,3 % aufweist. Bachforellen (*Salmo trutta fario*) und Marmorierte Forellen (*Salmo trutta marmoratus*) dominieren die Fischgemeinschaft und eine flussaufwärts sowie flussabwärtsgerichtete Fischdurchgängigkeit ist wiedergegeben.

2.2 Airborne LiDAR Bathymetrie – Klassifizierung, Refraktion und Datenqualität

Der Mareiterbach, Nähe Sterzing in Südtirol, ist geprägt durch die hohe Abflussdynamik des teilweise vergletscherten Einzugsgebiets. Die dadurch hervorgerufene räumliche und zeitliche Variabilität der Flusssohle wird durch wiederholte hochaufgelöste topo-bathymetrische Laserscannermessungen aus der Luft erfasst. Die erste Befliegung wurde am 15. Dezember 2016 unter Niederwasserbedingungen von der Firma AHM - AirborneHydroMapping GmbH (www.ahm.co.at)

durchgeführt. Es wurde der topo-bathymetrische Sensor VQ-880-G (RIEGL 2018) von der österreichischen Firma RIEGL Laser Measurement Systems GmbH eingesetzt. Die Befliegung umfasst 12 Scanstreifen, um einen konsistenten Datensatz zu erhalten. Die Befliegung wurde durch zeitgleiche Feldmessungen (Abflussmessungen mittels FlowTracker2, terrestrische Messungen mit Tachymeter Leica Viva TS15) begleitet. Die zweite Befliegung erfolgte rund zwei Jahre später am 18. November 2018 unter ähnlichen Verhältnissen. Die Bearbeitungsschritte der Datenverarbeitung beider Befliegungsdatensätze inkludiert die Datenkontrolle, gefolgt vom Streifenabgleich im PreProcessing. Für die Transferierung der ALB Punktwolke in das gebräuchliche UTM Koordinatensystem mit dem Referenzsystem 1989 (ETRS89) wurden Passflächen im Feld aufgenommen. Im anschließenden PreProcessing wurde die Software HydroVISH, welche die Vorteile des Datenformates HDF5 (HDF-GROUP 2013) nutzt, verwendet. Am morphologisch hoch strukturierten Mareiterbach wurde an die automatische Klassifizierung eine manuelle Klassifizierung nachgeschaltet, um die Komplexität der lokalen Geometrie besser zu berücksichtigen. Die Datenbearbeitung erfolgte in enger Zusammenarbeit mit der Firma AHM. In Abbildung 2 ist das Ergebnis der klassifizierten Punktwolke illustriert.

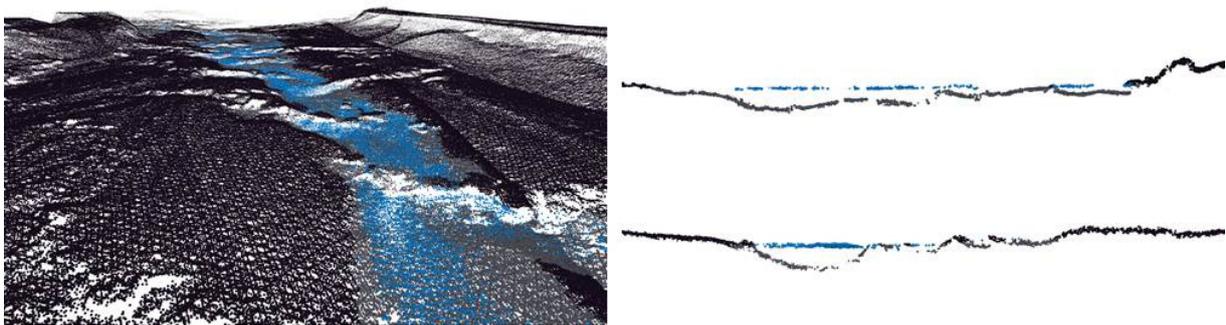


Abb. 2: Klassifizierte Punktwolke: schwarze und graue Punkte zeigen die Topographie und Bathymetrie, blau zeigt den extrahierten Wasserspiegel

Eine Datenkontrolle zur Qualitätssicherung ist unerlässlich (MCKEAN et al. 2014). Durch die zeitgleiche terrestrische Vermessung war es möglich, die Differenz zwischen Höheninformationen aus der klassifizierten Punktwolke (z_{ALB}) und der terrestrischen Punkte (z_{terr}) zu bilden. Die Ergebnisse werden durch die mittlere Abweichung (Median), dem RMSE (root-mean-square-error) und der Standardabweichung (std) beschrieben. Der RMSE wurde berechnet mit

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (z_{ALB} - z_{terr})^2}{n}} \quad (1)$$

wobei z_{terr} die terrestrische Höhe, z_{ALB} die abgeleitete Höhe aus der klassifizierten LiDAR-Punktwolke am selben Ort und n die Anzahl der terrestrisch vermessenen Punkte ist.

Beim Medienübergang Luft zu Wasser kommt es zu einer Änderung der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls. Der Lichtstrahl wird gebrochen (Refraktion) und gleichzeitig verlangsamt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit unter Wasser. Daher ist eine sogenannte Refraktionskorrektur notwendig (WESSEL et al. 2016). Abbildung 3 zeigt eine schematische Übersicht der Refraktion

des ALB Signals im grünen Wellenlängenbereich. Für die Korrektur wird ein Modell der Wasseroberfläche benötigt. Mit diesem Wasseroberflächenmodell und den Trajektorien kann dann eine Längen- und Winkelkorrektur der Bathymetrie-Punktwolke erfolgen. Eine interessante Fragestellung ergibt sich nun aus dem Vergleich möglicher Wasseroberflächenmodelle. Das erste Vergleichsmodell ist eine Triangulation der vermessenen Wasserspiegelpunkte der ALB Punktwolke. Als zweites Modell dient eine Triangulation aus simulierten Wasserspiegelpunkten, gewonnen aus einer Fließgewässersimulation mit rasterförmigem Berechnungsnetz der Auflösung 0,5 m und dem Abfluss zur Befliegungsstunde als hydraulische Randbedingung.

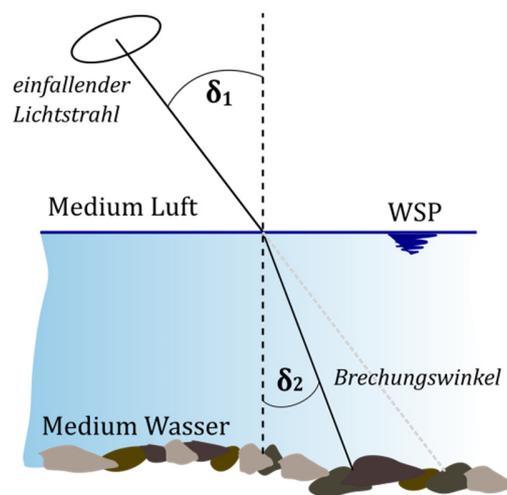


Abb. 3: Schematische Darstellung der Ablenkung des ALB Signals (grüner Wellenlängenbereich)

2.3 Hydraulische Simulation

Auf der hervorragenden Basis der zwei Befliegungen wurden verschiedene Berechnungsnetze für das 1,5 km lange Untersuchungsgebiet erstellt. Für die numerische Simulation wurde die kommerzielle Software HYDRO_AS-2D (HYDROTEC 2015) verwendet. Die Berechnung basiert auf einer 2D-tiefengemittelten Strömungsgleichung mit der räumlichen Diskretisierung nach der Finiten-Volumen Methode. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Berechnungsnetze mit unterschiedlichen praxisorientierten Methoden erstellt. Die Punktdezimierung der klassifizierten Punktwolke (140 Punkte/m²) wurde mit einer statistischen Ausdünnung in einem regelmäßigen Raster durchgeführt. Die Rastergröße reicht von 0,25 x 0,25 m bis 1,00 x 1,00 m und wurden im nächsten Schritt zu einem Dreiecksnetz verarbeitet. Eine weitere Möglichkeit der Netzdezimierung ist die Reduktion mit dem „Visualization Tool Kit (VTK)“. Es entsteht ein unstrukturiertes unregelmäßiges Dreiecksnetz. Für die einfache rasche numerische Lösung sind einfache Formen notwendig, daher wurde in einer dritten Variante ein optimiertes Netz erstellt, welches sich an der Gewässerform orientiert und aus Viereckelementen mit einem Seitenverhältnis von 1:2 besteht (Kurzbezeichnung: E4Q). Um die Bedeutung der hochaufgelösten Geländedaten aus der Airborne LiDAR Befliegung hervorzuheben, wurde ein Netz auf Basis von Querprofilen (QP) erzeugt. Die Punktinformationen wurden aus der ALB Punktwolke abgeleitet. Alle angeführten Berechnungsnetze bringen Vor- und Nachteile mit sich und wurden im Detail analysiert. Eine zentrale Frage ist, wie

sich die Netztopologie und -auflösung auf die Kalibrierung (den Kalibrierungsprozess) auswirken. Für die Kalibrierung des hydraulischen Simulationsmodells wird der flächenhafte Wasserspiegel herangezogen, welcher bei der Airborne LiDAR Befliegung aufgenommen wurde. Als obere Randbedingung des numerischen Modells wird ein Abfluss von 1,70 m³/s angesetzt. Dieser wurde am Befliegungstag mittels FlowTracker2 gemessen. Für eine anschauliche Ergebnisinterpretation werden über das Untersuchungsgebiet Auswertungs-Querprofile im Abstand von ca. 10 m verteilt. An diesen werden die Differenzen zwischen den gemittelten Wasserspiegeln aus der ALB Vermessung und den simulierten Wasserspiegeln gegenübergestellt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Zur Beurteilung der Datenqualität werden die Unterschiede zwischen der terrestrischen Punktvermessung und der ALB-Höhe an der entsprechenden Position gegenübergestellt. Die wesentlichen statistischen Parameter (Median, RMSE, Standardabweichung) der Bodenpunkt- und Wasserspiegelgenauigkeit sind in Abbildung 4 zusammen mit den Histogrammen dargestellt. Beide Histogramme zeigen nahezu eine Normalverteilung. Die Mediane liegen bei -0,014 m und -0,024 m. Das negative Bias liegt innerhalb der GPS-Genauigkeit der terrestrischen Punktvermessung. Die Abweichung ist somit nicht signifikant. Dieses positive Ergebnis bescheinigt der ALB-Technologie eine große Höhengenaugkeit. Die Fluss-Bathymetrie kann somit mit geringen geometrischen Unsicherheiten in numerischen Netzen abgebildet werden. Zudem ist der ALB-Wasserspiegel hervorragend für die Kalibrierung geeignet.

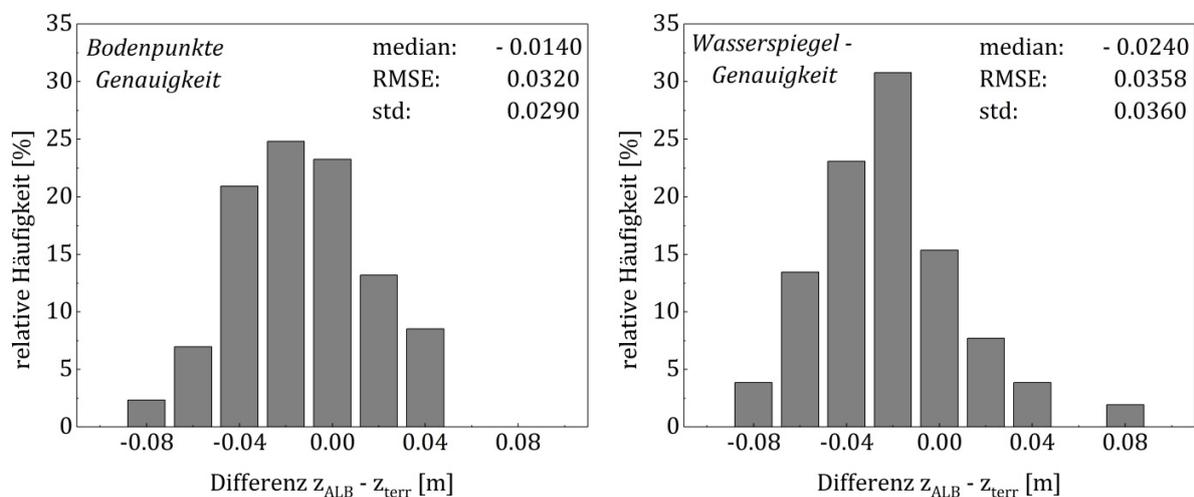


Abb. 4: Datenqualität: Genauigkeit ALB-Höhe (z_{ALB}) versus terrestrisch vermessener Punkthöhe (z_{terr}), links: Genauigkeit der Bodenpunkte; rechts: Wasserspiegelgenauigkeit

Zur Beurteilung der Auswirkungen unterschiedlicher Wasseroberflächenmodelle auf die Refraktionskorrektur und somit auf die Lagen- und Höhengenaugkeit von unter der Wasseroberfläche liegenden Bathymetrie-Bodenpunkten werden zwei Methoden verglichen. Zum einen wird eine

Triangulation jener ALB-Punkte als Wasseroberflächenmodell verwendet, die als Wasseroberflächenpunkte klassifiziert wurden. Vor allem in Randbereichen mit geringen Wassertiefen ist eine solche Klassifizierung schwierig bzw. manchmal sogar unmöglich. Daher hat diese Methode Anwendungsgrenzen. Die zweite Methode bedient sich einer hydraulischen Simulation und verwendet den simulierten Wasserspiegel als Wasseroberflächenmodell. Die Bathymetrie mit Refraktionskorrektur gemäß Methode Eins dient hier als Basis für ein feines Berechnungsnetz mit einer Rasterauflösung von 0,5 m. Eine stationäre Berechnung des Abflusses zur Befliegungsstunde ergibt die Wassertiefen in jedem Knotenpunkt. Die Rauheit wird flächig kalibriert, sodass der Mittelwert des berechneten Wasserspiegels über alle Netzknoten jenem des gemessene Wasserspiegels (klassifizierte ALB-Punktewolke) gleicht. Das Wasseroberflächenmodell aus Methode Zwei (Sim_{Boden}) enthält Bereiche mit geringen Wassertiefen und zeigt lokale Wasserspiegelgefälle sehr detailreich, speziell in ufernahen Bereichen.

Die Refraktionskorrektur ergibt zwei unterschiedliche resultierende Bathymetrien: ALB_{Boden} gemäß Methode Eins und Sim_{Boden} gemäß Methode Zwei. Abbildung 5 zeigt mittels Boxplot (links) und Differenzenkarte (rechts) das Ergebnis einer Gegenüberstellung. In der Karte (rechts) ist die Differenz zwischen ALB_{Boden} und Sim_{Boden} als Differenzenplot dargestellt (ALB-Sim). Es zeigen sich räumlich kleine Unterschiede. Der Mittelwert aller Abweichungen liegt bei 0,001 m und die Standardabweichung bei 0,013. Die markantesten Abweichungen treten bei steilen Ufern bzw. abrupt abfallenden Stellen wie großen Steinen auf. Große Differenzen entstehen dort, wo die Simulation keine Wasserspiegel aufweist. Hier ist z. B. der nicht benetzte Seitenarm in der Simulation zu nennen. Diese Fehler sind aber für die praktische Anwendung von untergeordneter Bedeutung. Zusammengefasst lässt sich aus den Ergebnissen ableiten, dass ein Wasseroberflächenmodell gemäß Methode Eins aus der klassifizierten ALB-Punktewolke gut für die Refraktionskorrektur geeignet ist.



Abb. 5: Ergebnis der Refraktionskorrektur; links: Boxplot der Differenz zwischen den Bathymetrien nach Methoden Eins und Zwei; rechts: Differenzenplot, flächige Darstellung lokaler Abweichungen

Die hydronumerische Berechnung der flächigen Fließgeschwindigkeiten und -tiefen mit dem gemessenen Abfluss zur Befliegungsstunde ermöglicht eine Analyse der Auswirkungen verschiedener Netztopologien und -auflösungen. Die in Kapitel 2.3 beschriebenen Berechnungsnetze wurden

mit unterschiedlichen Reduktionsmethoden direkt aus der ALB-Punktwolke abgeleitet. Tabelle 1 bietet einen Überblick der resultierenden Netze mit ihren wichtigsten Eigenschaften wie der Anzahl der Knoten, der Punktdichte und der Art der Netzelemente.

Tab. 1: Übersicht über die verschiedenen Berechnungsnetze

Bezeichnung	Anzahl Knoten	Punktdichte [Pt/m ²]	Netzelemente
R25	~ 2.141.000	~ 15 Pt/m ²	Dreieckselemente
R50	~ 547.000	~ 4 Pt/m ²	Dreieckselemente
R100	~ 138.000	~ 1 Pt/m ²	Dreieckselemente
VTK	~ 646.000	~ 5 Pt/m ²	Dreieckselemente
E4Q 0,5x1,0m	~ 194.000	~ 1,5 Pt/m ²	Viereckselemente
QP 1,0x1,5m	~ 77.000	~ 0,5 Pt/m ²	Viereckselemente

In der hydraulischen numerischen Modellierung wird der Rauheitsbeiwert nach Manning-Strickler (k_{st}) als Stellschraube für die Kalibrierung verwendet. Mit kalibrierten Rauheitsbeiwerten können kleinräumige komplexe Strukturen wie Felsen und steile Abstürze selbst bei grober Netzauflösungen zumindest näherungsweise modelliert werden. Es werden insgesamt drei räumliche Verteilungen für die Rauheitsbeiwerte untersucht. Die einfachste Rauheitszonenverteilung ist eine Belegung mit einem einheitlichen Rauheitsbeiwert, welcher im Zuge der Kalibrierung zwischen $k_{st}=17$ und $k_{st}=30$ variiert wird. Der Flussabschnitt am Mareiterbach ist jedoch räumlich stark strukturierte und morphologisch vielfältig ausgeprägt. Daher werden zwei weitere differenzierte Zonenverteilungen untersucht, die durch eine großräumige Einteilung „large-scale“ bzw. eine kleinräumige Einteilung „small-scale“ charakterisiert sind. In Abbildung 6 sind diese beiden differenzierten Rauheitszonenverteilungen dargestellt.

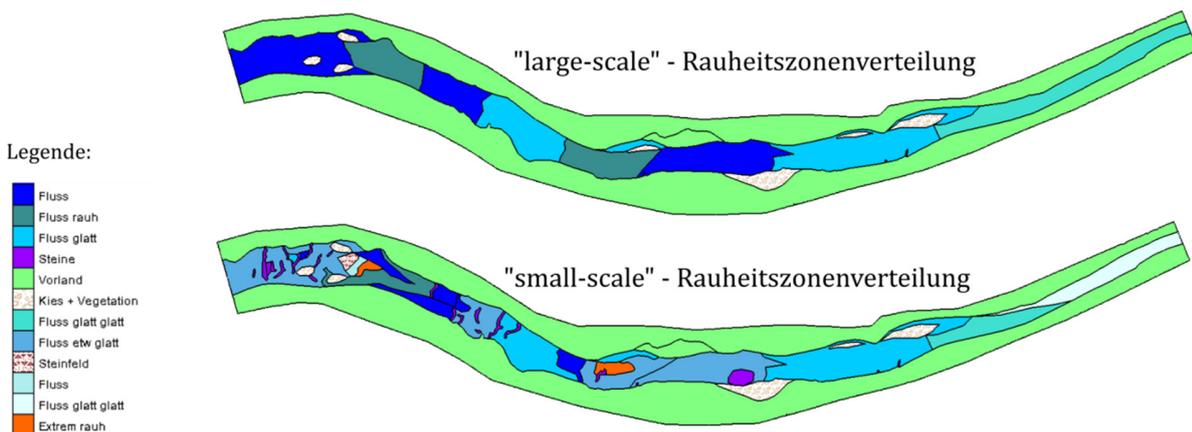


Abb. 6: Gebiet Mareiterbach, Übersicht über die Rauheitszonenverteilung, obere Abbildung „large-scale“ und untere „small-scale“ Rauheitszonenverteilung

Abbildung 7 stellt die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsmodelle einander gegenüber, indem die jeweilige Übereinstimmung der simulierten Wasserspiegel mit der gemessenen Wasserspiegellage aus der klassifizierten ALB-Punktwolke ausgewertet wird. Die Boxplot Übersicht gibt die Differenz zwischen simulierten Wasserspiegel und dem Wasserspiegel aus der ALB Befliegung, gemittelt über die Querprofile, welche im Abstand von ca. 10 m verteilt über die Längsachse liegen, wieder. Neben dem besten Ergebnis mit einer Rauheitszone (schwarze Boxplots) sind die Ergebnisse mit der Rauheitszonenverteilung „large scale“ (blau eingefärbt) und „small-scale“ (grüner Boxplot) ersichtlich. Tabelle 1 zeigt die zugehörigen statistischen Kennwerte. Ein wesentliches Ergebnis ist der Zusammenhang zwischen Modellauflösung und Ausreißern, welche über Whisker (5% ~ 95%) dargestellt werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Netztopologien kann durch die Wasserspiegelabweichungen quantifiziert werden. Diese zeigen, dass bei hoch aufgelösten Berechnungsnetzen wie z. B. beim VTK oder Raster50 (R50) Netz das Streuungsmaß kleiner ist.

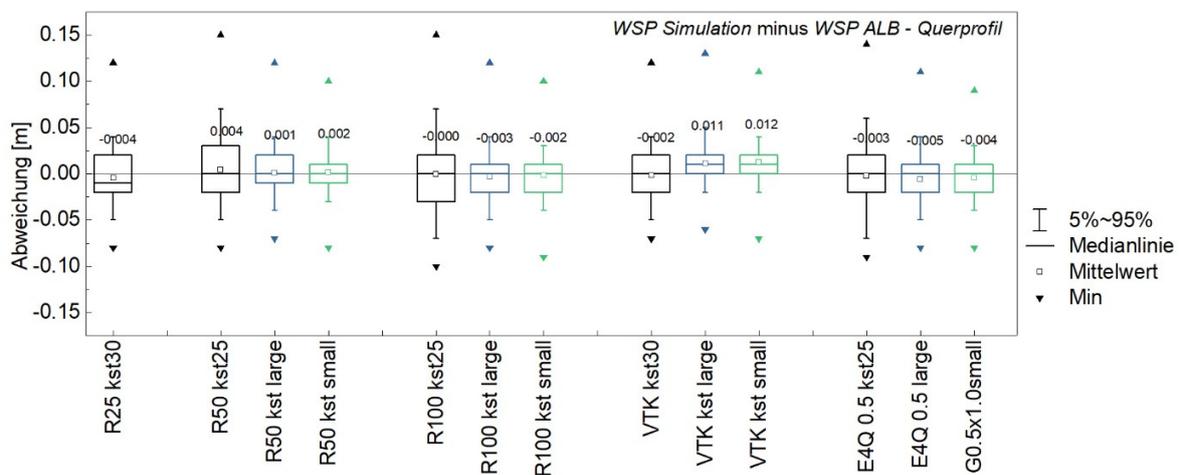


Abb. 7: Boxplot der Differenz aus simulierten und ALB Wasserspiegel Quantilwerten für unterschiedliche Berechnungsnetztopologien. Schwarzer Boxplot bestes Ergebnis mit einem Rauheitsbeiwert, Blauer mit der „large-scale“ Rauheitszonenverteilung und grüne Farbe ist das Ergebnis mit der detaillierten „small-scale“ Einteilung

Die Ergebnisse zeigen ferner, dass mit einer detaillierteren räumlichen Einteilung der Rauheitszonen die statistischen Ergebnisse verbessert und gleichzeitig die Abweichungen minimiert werden. Dieser Effekt tritt bei allen Berechnungsnetztopologien auf. Von größerer Bedeutung ist dies jedoch erst bei Berechnungsnetzen mit niedriger Auflösung wie z. B. bei Raster100 (R100) oder E4Q 0,5x1,0 m, da die fehlende geometrische Strukturgenauigkeit im Netz dann mit der detaillierteren Rauheitsanpassung kompensiert werden kann. Dieser Vergleich führt deutlich vor Augen, dass die Oberflächen- und Formrauheit speziell bei niedrig aufgelösten Berechnungsnetzen, in Form einer detaillierten Kalibrierung mehrerer Rauheitszonen berücksichtigt werden muss.

Tab. 1: Übersicht über die verschiedenen Berechnungsnetztopologien

Bezeichnung	Mittelwert [m]	RMSE [m]	Standartabweichung [m]
R25 kst 30	-0,004	0,030	0,030
R50 kst 25	0,004	0,036	0,035
R50 kst <i>large</i>	0,000	0,026	0,026
R50 kst <i>small</i>	0,002	0,022	0,022
R100 kst 25	0,000	0,040	0,035
R100 kst <i>large</i>	-0,003	0,030	0,026
R100 kst <i>small</i>	-0,002	0,024	0,022
VTK kst 30	-0,002	0,030	0,030
VTK kst <i>large</i>	0,011	0,026	0,024
VTK kst <i>small</i>	0,012	0,025	0,022
E4Q 0,5 kst 25	-0,003	0,039	0,039
E4Q 0,5 kst <i>large</i>	-0,005	0,030	0,025
E4Q 0,5 kst <i>small</i>	-0,004	0,023	0,023

Bis noch vor wenigen Jahren wurde die Bathymetrie durchwatbarer Gewässerabschnitte standardmäßig mittels terrestrischer Querprofilvermessung erhoben. Um das Verbesserungspotential einer flächigen ALB-Vermessung gegenüber der klassischen Querprofilvermessung quantitativ hervorzuheben, wird als weitere Netztopologie ein Berechnungsnetz aus fiktiven Querprofilen untersucht. Die Querprofilspuren werden entlang markanter Geländesprünge gelegt, ganz so wie es versierte Vermesser im Feld tun würden. Der Querprofilabstand variiert somit über das Untersuchungsgebiet und liegt zwischen 5 und 40 m. Abbildung 8 und Tabelle 2 zeigen die Ergebnisse für diese Querprofilberechnungsnetztopologie jeweils für die drei Rauheitszonenverteilungen, welche dem Raster25 (R25) gegenübergestellt wird.

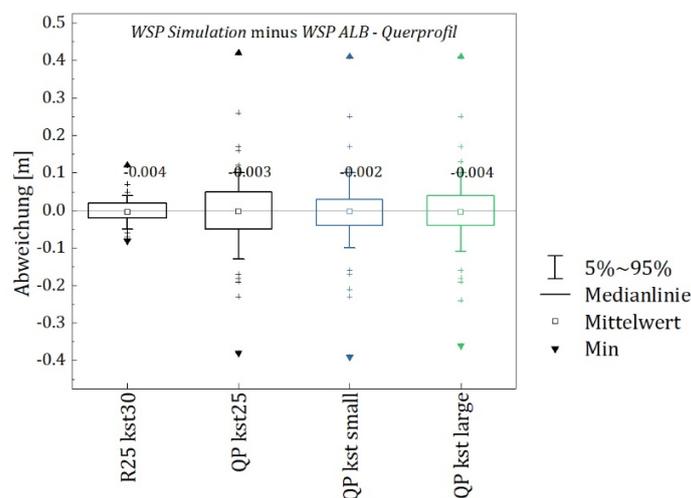


Abb. 8: Boxplot der Differenz aus simulierten und ALB Wasserspiegel Quantilwerten für die Querprofilberechnungsnetze. Schwarzer Boxplot zeigt bestes Ergebnis mit einem Rauheitsbeiwert, Blauer mit der „large-scale“ Einteilung und grüne Farbe ist das Ergebnis mit der detaillierten „small-scale“ Einteilung

Die Abweichung zwischen gemessenen ALB Wasserspiegel und simuliertem Ergebnis liegt im Mittel unter -0,004 m. Die Abweichungen über den RMSE sind stets größer als 0,080 m. Die erhöht auftretenden Ausreißer führen zu größeren Streuungswerten, welche auf die nicht erfasste Geometrie z. B. fehlende Abstürze zurückzuführen sind. Mit diesem Ergebnis kann klar gezeigt werden, dass die Anwendung der Airborne LiDAR Bathymetrie ein sinnvolles Potential beinhaltet, um hydraulische Bedingungen im Detail abzubilden.

Tab. 2: Übersicht über das Berechnungsnetz QP (Querprofilnetz)

Bezeichnung	Mittelwert [m]	RMSE [m]	Standartabweichung [m]
R25 kst 30	-0,004	0,030	0,030
QP kst 25	-0,003	0,091	0,091
QP kst <i>large</i>	-0,004	0,084	0,084
QP kst <i>small</i>	-0,002	0,081	0,081

4 Fazit & Ausblick

Die Erfassung der 'Unterwassertopographie' mit ALB hat gezeigt, dass ein hohes Potential in der kleinmaßstäblichen Aufnahme der morphologischen Strukturen steckt. Die Auswertungen der numerischen Simulationen verdeutlichen, dass der flächige Wasserspiegel aus der ALB Vermessung zur Kalibrierung geeignet ist. Die Kontrolle der Refraktionierung der wasserbenetzten Punkte zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Vorgehensweise mit dem Wasseroberflächenmodell wird somit als geeignet bestätigt. Es zeigt sich, dass die Auswahl der Auflösung einen Einfluss auf den Kalibrieraufwand hat. Mit einem Rasternetz von 0,50x0,50 m (R50) kann mit kleinem Kalibrieraufwand und nur wenigen Rauheitszonen eine sehr gute Übereinstimmung der Wasserspiegellagen erzielt werden. Aus der Untersuchung geht weiters hervor, dass die Netzerstellung aus Querprofilaten große lokale Abweichungen der simulierten Wasserspiegellagen mit sich bringt, welche auf die fehlenden morphologischen Strukturen, die das Untersuchungsgebiet prägen, zurückzuführen sind.

Um das Potential der topo-bathymetrischen Aufnahme auch für morphologische Untersuchungen voll nutzen zu können, bedarf es einer wiederholenden Datenerhebung. Dies stellt ein gutes Instrument zur Erfassung der hydro-morphologischen Veränderungen und einhergehenden Lebensräume. Eine zweite ALB Befliegung wurde am 18. November 2018 erfolgreich durchgeführt. Mit dieser Datengrundlage ist es möglich, ein Volumenbilanzierung im Detail zu erstellen, welche für die Weiterentwicklung der Genauigkeit der Geschiebetransportmodellierung dienen soll.

5 Literaturverzeichnis

- AUFLEGER, M., STEINBACHER, F., BARAN, R. & VALERIE, N., 2015: Airborne Hydomapping - Hochaufgelöste Gewässervermessung "wie im Flug". *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen* **53**, Universität Dresden, 415-424.
- DOBLER, W., STEINBACHER, F., BARAN, R., RITTER, M. & AUFLEGER, M., 2014: High Resolution Bathymetric Lidar Data to Hydraulic - Modelling a Mountain Stream by Bathymetric Lidar Data. *Proceedings of the 11th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2014)*.
- HDF-Group, o.J.: The HDF5 Home Page. <http://www.hdfgroup.org> (11.12.2018).
- MANDELBURGER, G., PFENNINGBAUER, M., STEINBACHER, F. & PFEIFER, N., 2011: Airborne Hydrographic LiDAR Mapping - Potential of a new technique for capturing shallow water bodies. *19th International Congress on Modelling and Simulation*, Perth, Australia, 2416-2422.
- MCKEAN, J., TONINA, D., BOH, C. & WRIGHT, C.W., 2014: Effects of bathymetric lidar errors on flow properties predicted with a multi-dimensional hydraulic mode. *Journal of geophysical research: Earth Surface*, **119**(3), 664-664.
- KINZEL, P.J., LEGLEITER, C.J. & NELSON, J.M., 2013: Mapping River Bathymetry with a Small Footprint Green LiDAR: Applications and Challenges. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, **49**, 183-204.
- RIEGL, 2018: VQ-880-G Datenblatt 2018, http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VQ-880-G_DataSheet_2018-07-04.pdf (28.08.2018).
- STEINBACHER, F., PFENNINGBAUER, M., AUFLEGER, M. & ULLRICH, A., 2012: High Resolution Airborne Shallow Water Mapping. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **39**(B1), 55-60.
- WESSEL, M., ANSELMETTI, F., BARAN, R., HILBE, M., GESSLER, S. & WINTERSTELLER, P., 2016: Schlussbericht: Tiefenschärfe - Hochauflösende Vermessung Bodensee, Ein Interreg IV-Forschungsprojekt von 2012 – 2015, Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), Blaue Reihe, Bericht Nr. **61**(Hrsg.).