

Topobathymetrie Kalterer See

Kurzbericht, 18. März 2024

Autor: Ramona Baran

Contact Partner:

DI Frank Steinbacher

☎ +43 (0)512 / 31 90 70

1. Datenerfassung & Sensorik

Als Flugplattform wurde ein zweimotoriges Flugzeug verwendet (Tecnam P2012 SMP, Abb. 1 links). Der Laserscanner VQ880-G (RIEGL LMS, Abb. 1 rechts) ist im Heck des Flugzeugs integriert. Das Gerät verwendet einen grünen Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm bei einer Messrate von bis zu 550 kHz und einer hohen Scangeschwindigkeit von bis zu 177.000 Messungen/Sekunde. Die Flugbahndaten wurden mit einer Datenrate von 256 Hz von einer externen GPS-Antenne (NovAtel compact GNSS antenna 42G1215A XT 1-2-CERT) und einer Inertial Measurement Unit (IMU, IGI AEROcontrol-Ile) aufgezeichnet, die auf dem Laserscanner montiert ist. Folgende Flugparameter und Sensorkonfiguration des VQ880-G wurde bei der Befliegung des Kalterer Sees am 15. Februar 2024 angewendet:

- | | |
|---------------------------|------------|
| – Höhe über Grund (ENOHD) | 400 m |
| – Geschwindigkeit | 100–110 kn |
| – Taktrate | 550 kHz |
| – Strahldivergenz | 0.7 mrad |
| – FWF-Aufzeichnung | ja. |

Der See wurde mit 24 Scanstreifen (= 12 Streifenpaare aus Vor- & Rückstreifen) erfasst (Abb. 2).



Abbildung 1 Flugplattform Tecnam P2012 SMP (links) und topobathymetrischer Laserscanner VQ880-G (rechts).



Abbildung 2 Übersicht zur Datenerfassung Kalterer See am 15.02.2024.

2. Referenzdaten, Koordinatensystem & -transformationen

Als Referenzdatensatz für den Streifenabgleich wurde das DOM Südtirol mit einer Auflösung von 0.5 m verwendet (Abb. 3, [GeoKatalog \(buergernetz.bz.it\)](http://GeoKatalog(buergernetz.bz.it))). Die Erhebung und Prozessierung der ALB-Daten erfolgt im Basiskoordinatensystem ETRS89 mit UTM32N (6stellig, EPSG 25832) und ellipsoidischen GRS80-Höhen. Für die Transformation in das finale Koordinatensystem mit NN-Höhenbezug zur Datenübergabe wurde das Geoid BZ-TN zu Grunde gelegt ([users.south-tyrolean.net - /geodetico/Geoid/Geoid_de/](http://users.south-tyrolean.net/~geodetico/Geoid/Geoid_de/)). Die Transformation erfolgt über die AHM-eigene Software HydroVISH.

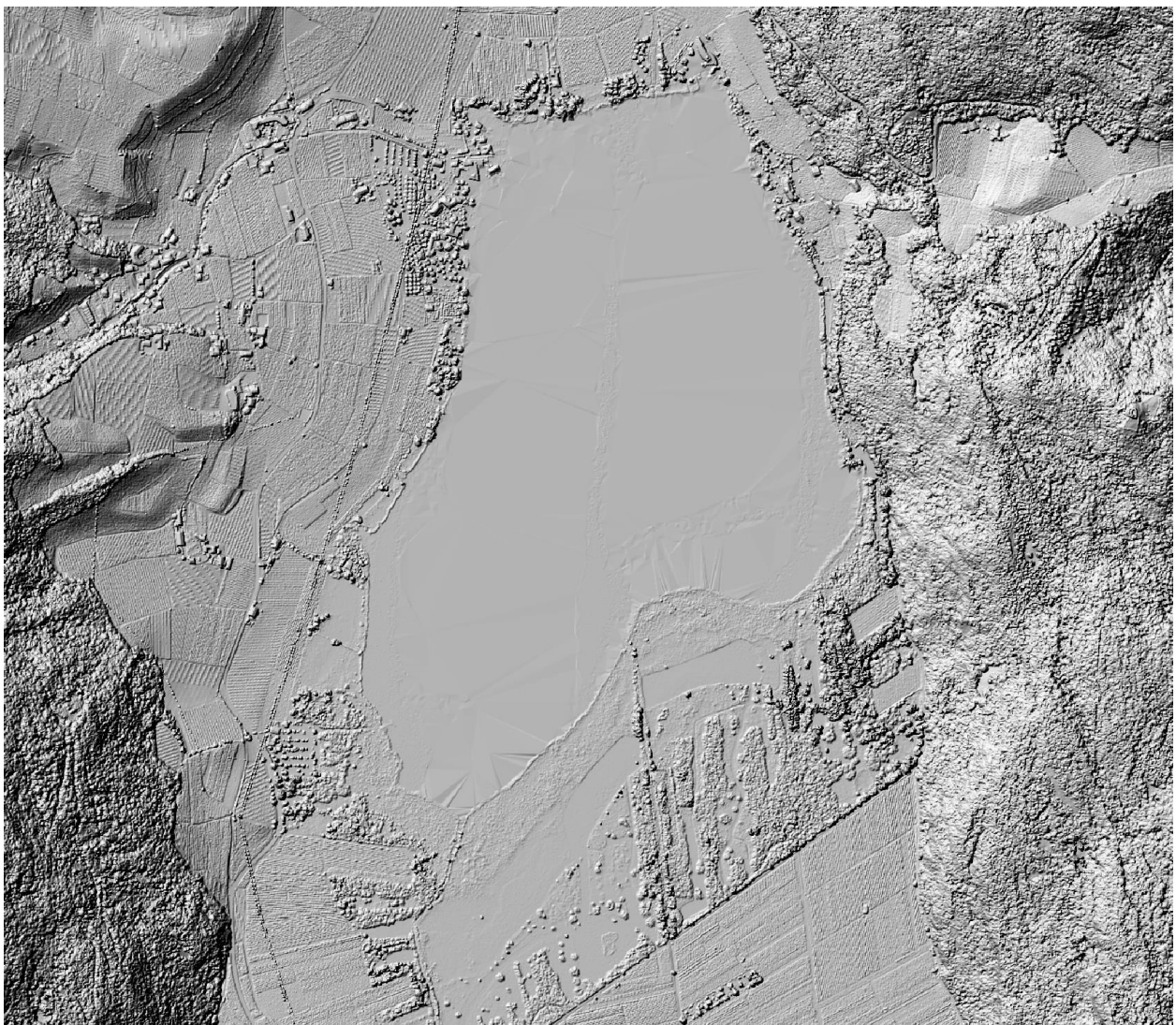


Abbildung 3 Schumierung des Referenzdatensatz DOM Südtirol im Bereich Kalterer See.

3. ALB-Datenprozessierung

3.1. Auswertung der Full Waveform

HydroVISH verfügt über einen umfassenden Werkzeugkasten zur FWF-Analyse (Steinbacher et al., 2021). Erstens kann eine Vorklassifizierung des Gewässers durch Einpassen einer e-Funktion in die aufgezeichnete FWF aufgrund der exponentiellen Dämpfung des Lichts im Wasser abgeleitet werden (Abb. 4 & 5). Zweitens kann FWF-Stacking zur Reduzierung des Signal-Rausch-Verhältnisses verwendet werden, um auch kleine Peaks in der FWF zu erkennen und zusätzliche Sohlpunkte in tieferen Bereichen zu extrahieren, in denen das reflektierte Signal eine geringere Amplitude hat. Oder eine einfache Peak-Detektion unter Verwendung des Gradientenfeldes der FWF und eines variablen Schwellwertes ermöglicht die Extraktion von Punktkoordinaten (Abb. 6). Zusätzlich kann eine Entfaltung der Systemwelle mit der FWF durchgeführt werden, z. B. mittels Richardson-Lucy-Algorithmus (Wu et al., 2011). Die Ergebnisse der verschiedenen FWF-Analyseansätze sind in Abbildung 7 dargestellt.

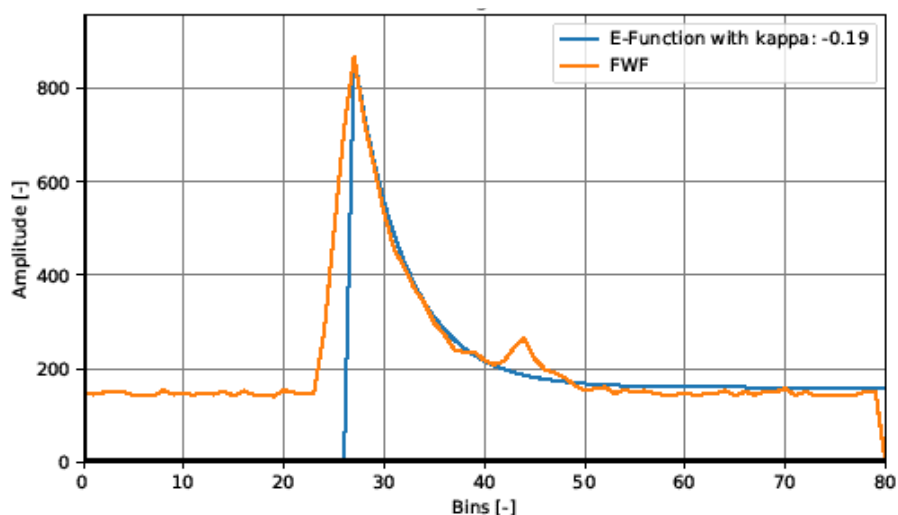


Abbildung 4 Eingefügte e-Funktion am maximalen Peak der FWF.

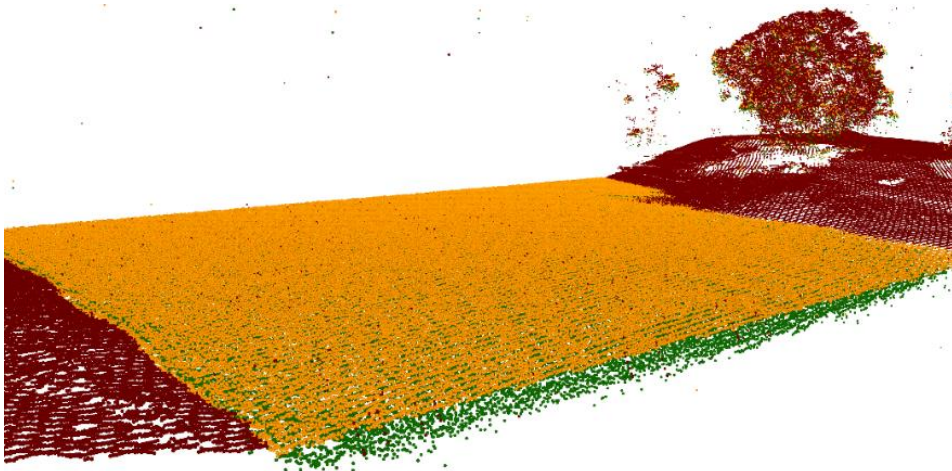


Abbildung 5 Grobe Vorklassifizierung des Wasserkörpers auf Grund eines Schwellwertes für die Abweichung vom exponentiellen Verlauf der Amplitude: rot kein Wasserkörper; grün (letzter Peak als Sohle) bzw. orange (erster Peak als Wasseroberfläche) Wasserkörper.

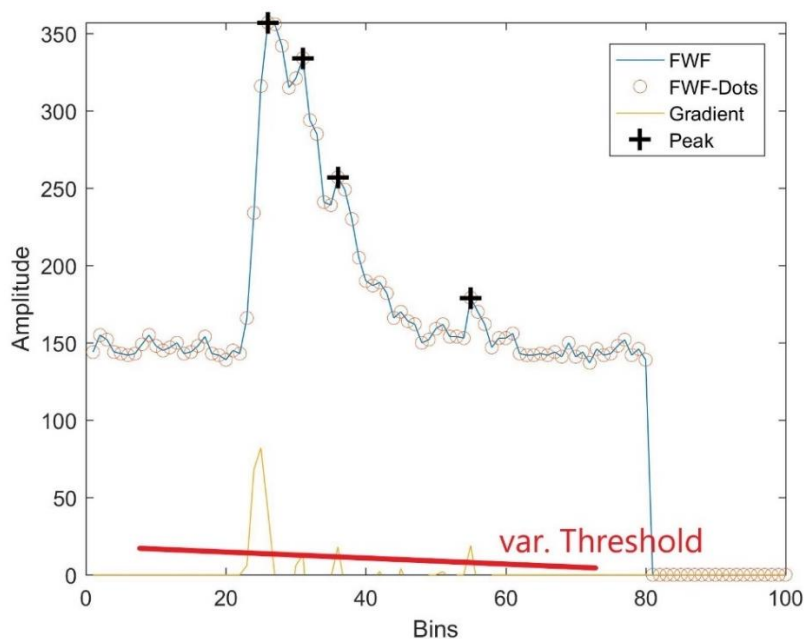


Abbildung 6 Einfache Peak-Detektion unter Verwendung eines variablen Schwellwertes im FWF-Gradientenfeld.

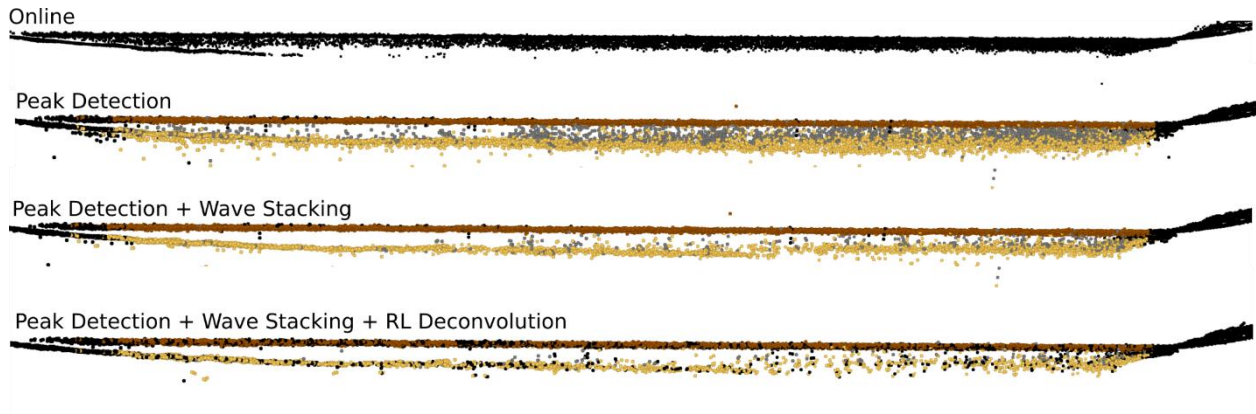


Abbildung 7 Vergleich von FWF-Auswertungsergebnissen auf Grundlage verschiedener Ansätze und OWP-Punktwolke (oberstes Bild) für einen beispielhaften Gewässerquerschnitt.

3.2. Trajektorie, Streifenabgleich und Georeferenzierung

Im ersten Schritt wurde die Flugtrajektorie als wesentliche Grundlage für die weitere Prozessierung der Laserdaten unter Verwendung der beiden Softwarepakete AeroOffice und GrafNav berechnet. Die während dem Flug aufgezeichneten GPS-Daten werden im Post-Processing mit GPS-Basisstationsdaten korrigiert. Da die Verdrehungen des Flugzeugs um die drei Rotationsachsen durch eine Inertial Measurement Unit (IMU) während des Fluges aufgezeichnet werden, wird die finale Trajektorie durch Kombination der GPS- und IMU-Daten berechnet. Die Genauigkeit der Trajektorien liegt in der Regel bei $\pm 5-10$ cm.

Die Sensorkalibrierung des VQ880-G wurde von Riegl LMS im Frühjahr 2022 nach einer Hardwareanpassung in den Labors am Hauptsitz in Horn, Österreich, durchgeführt. Die Boresight-Parameter für die Vermessungskampagne (= Roll-, Nick- & Gierwinkel zwischen Laserscanner und IMU) basieren auf einem Kalibrierungsflug, der vor der Vermessungskampagne am Vierwaldstättersee durchgeführt wird und bei dem Laserdaten aufgezeichnet werden. Der Kalibrierungsflug wird über einem urbanen Gebiet mit geneigten Dachstrukturen durchgeführt und besteht aus vier quer verlaufenden Fluglinien, die von N nach S und umgekehrt, sowie von E nach W und umgekehrt geflogen werden. Im zentralen Schnittbereich der sich kreuzenden Linien überschneiden sich alle Scanstreifen. Solche Kalibrierungsflüge müssen durchgeführt werden, da der Aus- & Wiedereinbau der Messsysteme (Laserscanner und IMU) in das Flugzeug spürbare Veränderungen dieser Winkeln mit sich bringt. Bis zum erneuten Ausbau des Systems werden die Roll-, Nick- und Gierwinkel als konstant angesehen. Ohne die Bestimmung der Boresight-Parameter erhält man jedoch keine aussagekräftigen Ergebnisse für eine eventuelle Streifenjustierung und anschließende Georeferenzierung der erfassten Laserdaten.

Die initiale Rohdatenprozessierung und erste Evaluierung der Laserdaten bzgl. räumlicher Abdeckung, Eindringtiefe und Sohlbedeckung wird dann mit der Software HydroVISH durchgeführt unter Nutzung der final berechneten Flugtrajektorien und der derzeit gültigen Boresight-Parameter. Anschließend erfolgt der sogenannte rigorose Streifenabgleich mit dem Ansatz nach Glira et al. (2015 & 2016), bei dem Positionsversätze zwischen Scanstreifen korrigiert werden und die ALB-Punktwolke auf einen Referenzdatensatz (Abb. 3) georeferenziert wird.

Hierfür wird ebenfalls die Software HydroVISH verwendet. Im Ergebnis des Streifenabgleichs wurden die Versätze zwischen den Scanstreifen und in Bezug auf den Referenzdatensatz im Wesentlichen auf weniger als 5–10 cm minimiert, wie das kumulative Histogramm aller Differenzen zeigt (Abb. 8). Die Differenzbildung und Berechnung des kumulativen Histogramms erfolgt auf Grundlage von 1x1 m Oberflächenmodellen aller Scanstreifen und des Referenzdatensatzes bei Ausmaskierung von Vegetations- und Gewässerflächen (Abb. 9).

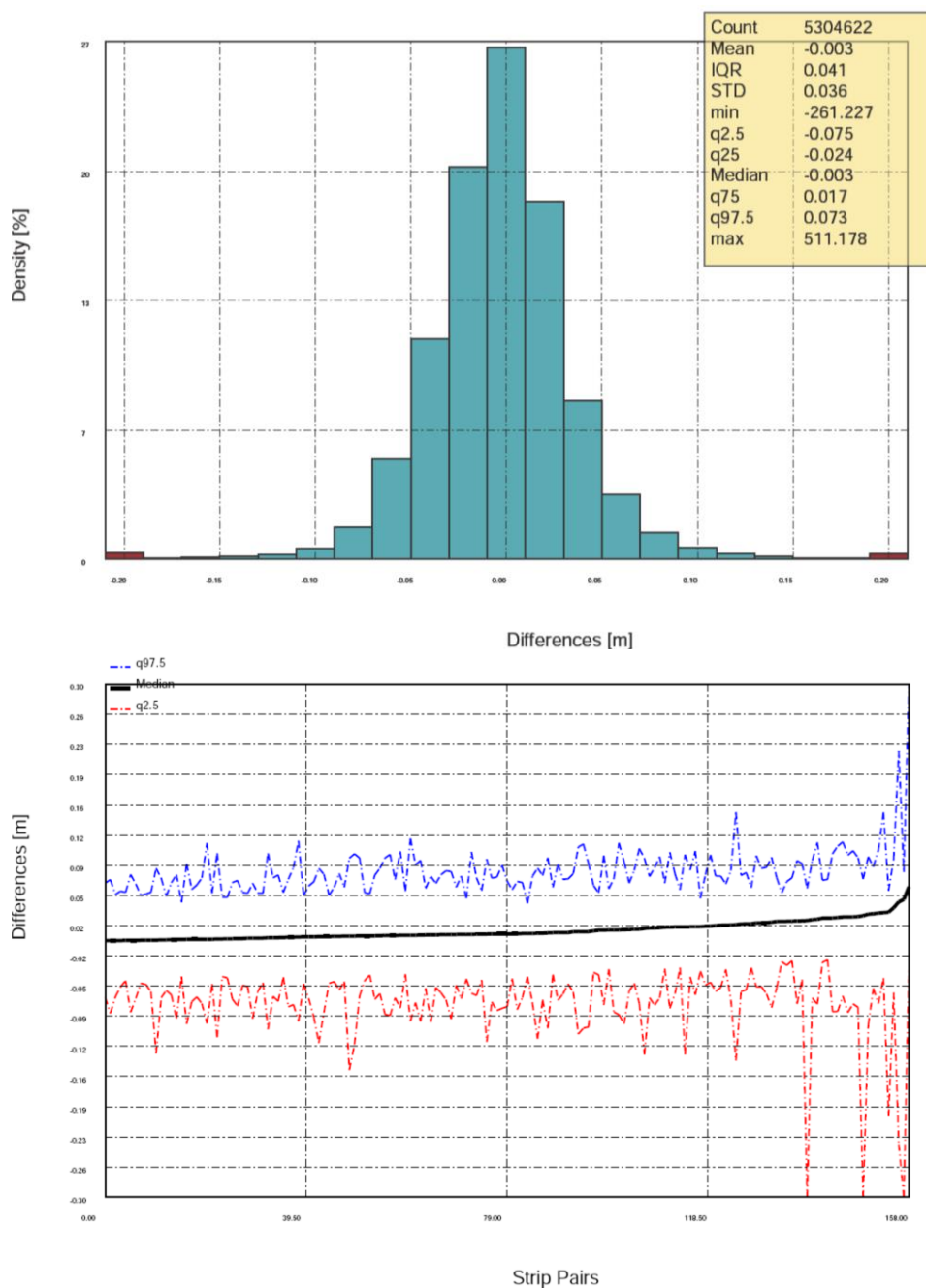


Abbildung 8 Kumulatives Histogramm der Streifendifferenzen einschließlich Statistik (oben) und Fehlerbereich der Streifendifferenzen pro Streifenpaar (unten) für die Daten des Kalterer See.

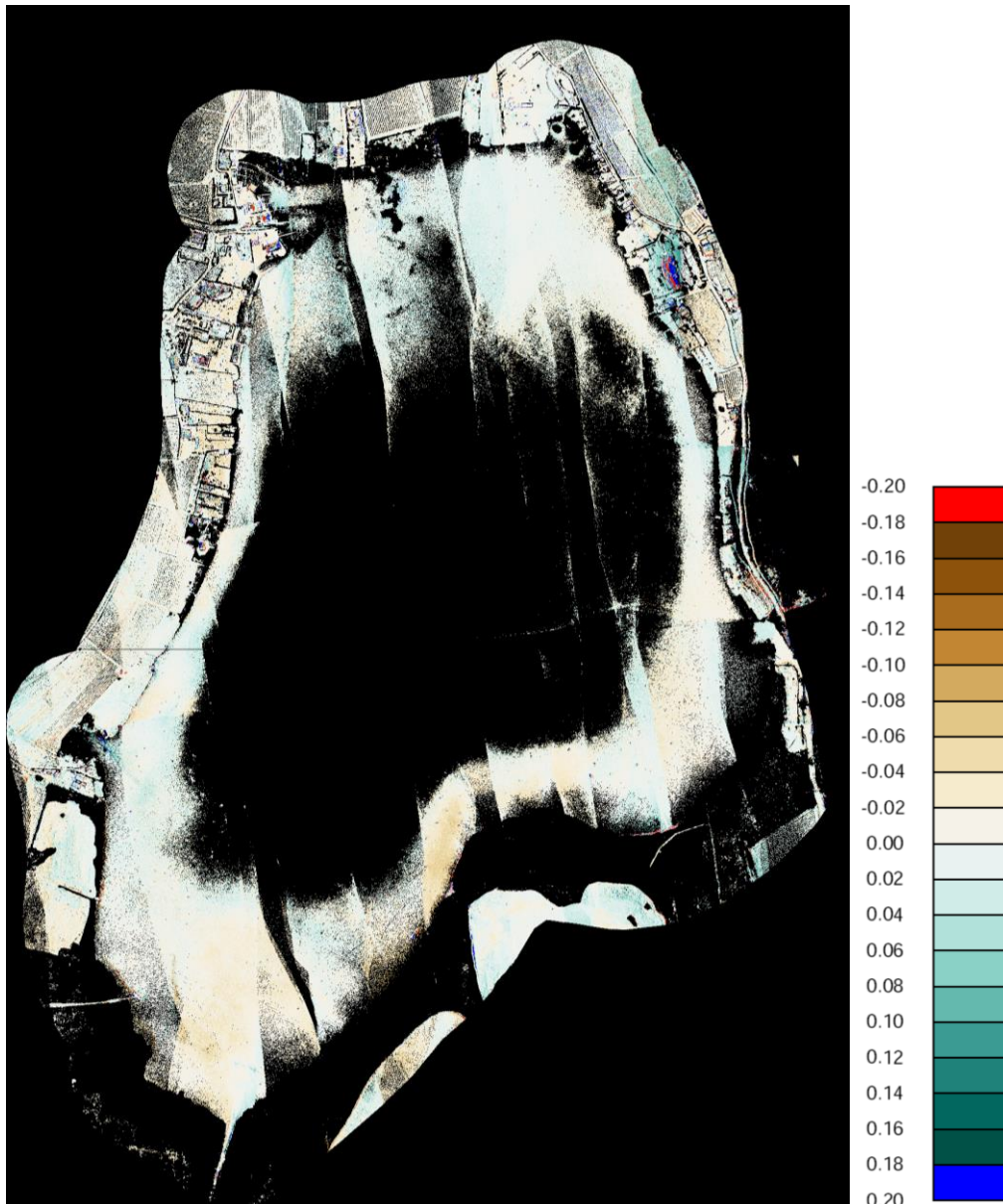


Abbildung 9 Median der Streifendifferenz zwischen sich überlappenden Scanstreifen auf einem 1x1-m-Raster den Kalterer See, Legende in m.

3.3. Automatische Klassifizierung des Geländeverlaufs

Die Klassifizierung von ALB-Daten konzentriert sich in erster Linie auf die Definition von Gelände- und Wasseroberflächenpunkten. Dabei werden eine Reihe von Klassifikationsansätzen integriert, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Hilfreiche Parameter für die Klassifizierung sind bei der Aufnahme abgespeicherte Punktattribute, wie z.B. die Return Number in Kombination mit der Number of Returns für jeden Punkt. Insbesondere die Bestimmung von Seed-Punkten für trockenes Gelände ist durch die Verwendung von Single Returns möglich. Diese dienen nach Entfernung von Ausreißern als Indikator für trockene Geländebereiche (Abb. 10). Im nächsten Schritt müssen Seed-Punkte für die Gewässersohle unterhalb der Wasseroberfläche definiert werden. Aufgrund von Ausreißern unterhalb des Geländes, die durch die bisherige FWF-Verarbeitung induziert werden, ist eine Selektion dieser Seed-Punkte allein über geometrische Merkmale nicht möglich. Die FWF-Verarbeitung liefert nicht nur eine bessere Abdeckung des Gewässerbodens, sondern eben auch eine dickere Wassersäule und gegebenenfalls mehr Ausreißer. Hierfür ist die Amplitude als weiteres Punktattribut gut geeignet (Abb. 11). In Abbildung 12 ist der Geländeverlauf unterhalb der Wasseroberfläche als ein Bereich mit Punkten lokaler Amplitudenmaxima sichtbar unabhängig von der Anzahl und Verteilung der darunter liegenden Ausreißer. Daher dienen Punkte mit maximaler lokaler Amplitude zusammen mit Single-Return Punkten als Seed-Punkte für die Klassifizierung des Geländes oberhalb und unterhalb der Wasseroberfläche (Abb. 13).

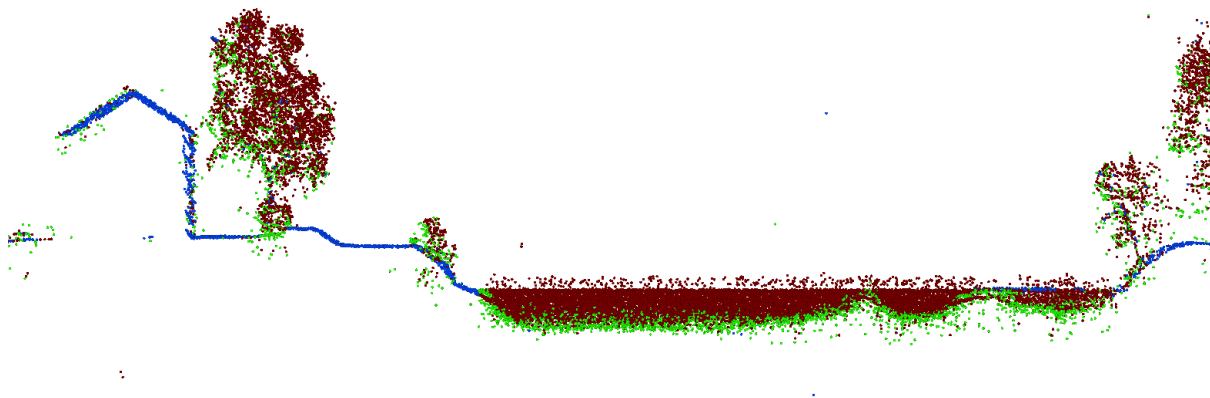


Abbildung 10 Querschnitt einer unklassifizierten Punktwolke eingefärbt nach Last Return in grün (Return Number = Anzahl der Returns) und Single Returns in blau (Return Number = Number of Returns = 1). Sowohl Return Number als auch Number of Returns werden bei der ALB-Aufnahme als Punktattribute abgespeichert.

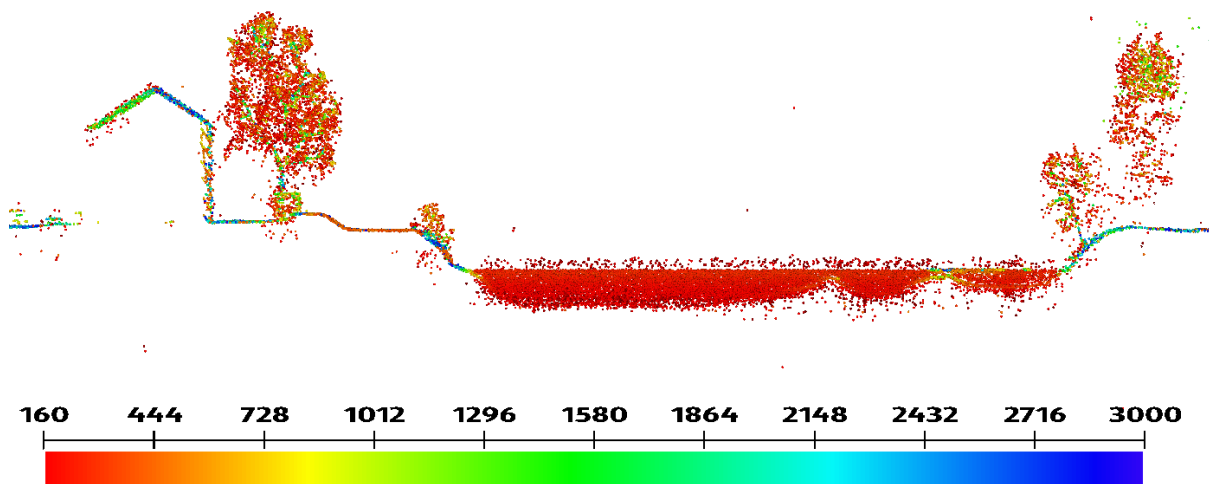


Abbildung 11 Querschnitt einer unklassifizierten Punktwolke eingefärbt nach Amplitude.

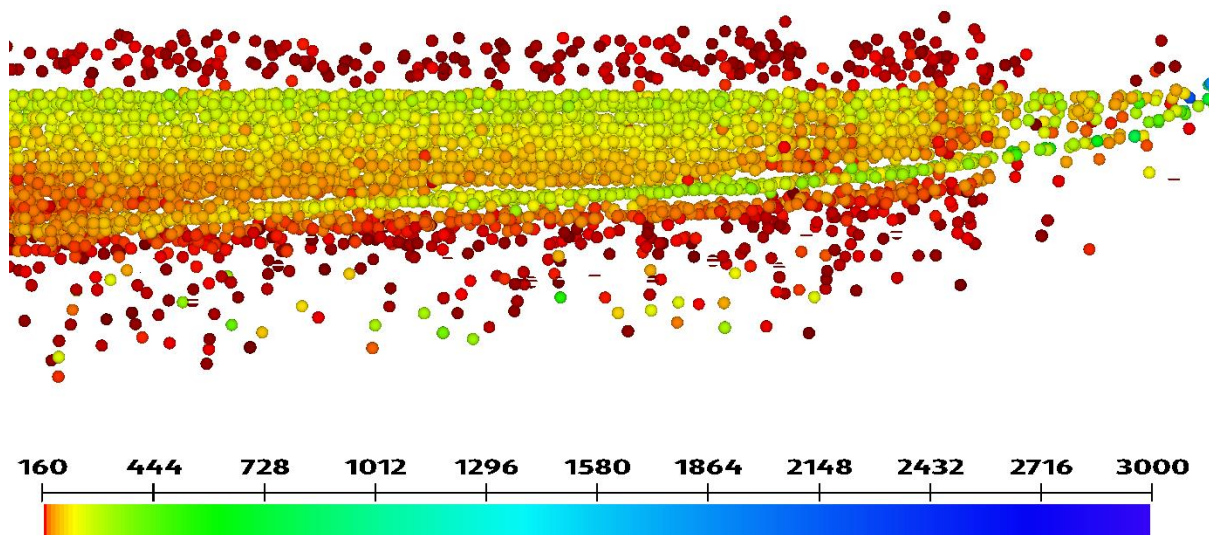


Abbildung 12 Detailquerschnitt einer unklassifizierten Punktwolke eingefärbt nach Amplitude.

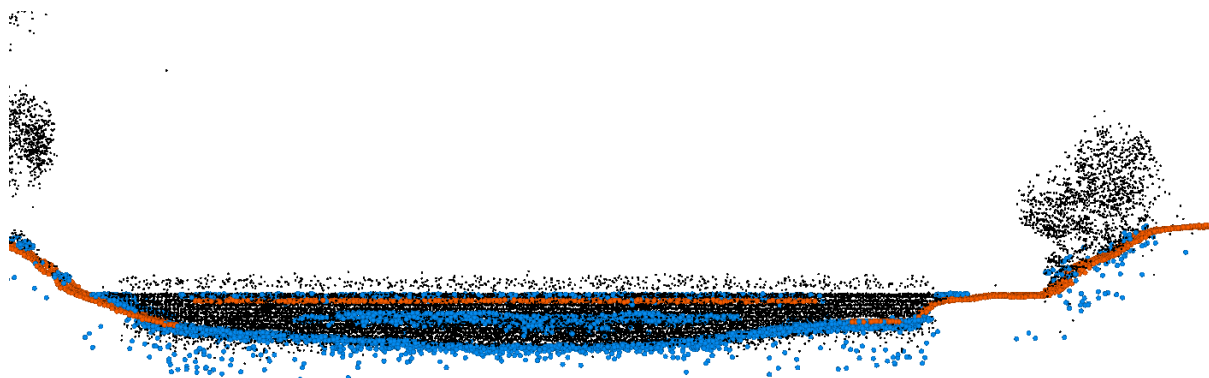


Abbildung 13 Querschnitt einer Punktwolke mit Seed-Punkten in rot (trockenes Gelände) und blau (Gewässersohle) nach der Geländeklassifizierung.

Zur Geländedetektion in ALS/ALB-Punktwolken werden der Zusammenfassung von Lohani & Ghosh (2017) folgend u.a. morphologische (z.B. Sithole, 2001; Meng et al., 2009) und oberflächenbasierte (z.B. Kraus & Pfeifer, 1997; Lohmann et al., 2000) Filter und deren Erweiterungen sowie Varianten eingesetzt. Hier werden geometrische Eigenschaften wie die Planarität berechnet, die angibt, wie sehr ein lokaler Bereich in der Punktwolke einer Ebene ähnelt (Abb. 14). Außerdem können mit Hilfe der lokalen planaren Regression Vegetationspunkte in der Punktwolke sehr gut von der Geländeklassifizierung entfernt werden. Diese Attribute und Methoden bieten hilfreiche Indikatoren für die Bereinigung der zuvor extrahierten Gelände-Seed-Punkte, um damit dann die endgültigen Geländepunkte zu bestimmen (Abb. 15 & 16). Gebäude und insbesondere Dächer werden über dreidimensionalen Alpha Shapes identifiziert. Diese lineare Approximation des Datensatzes rekonstruiert die allgemeine Form der Punktwolke. Mit einer guten Schätzung der Alpha-Shape-Werte ist es möglich, nur Geländepunkte zu erfassen und so Gebäude und andere Strukturen von der Geländeklassifizierung zu trennen.

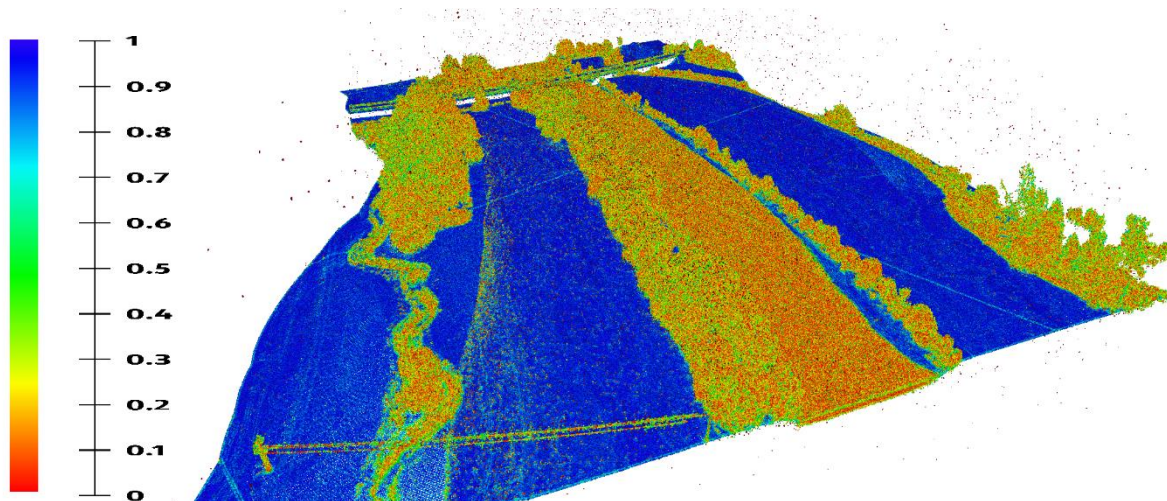


Abbildung 14 Punktwolke eingefärbt nach Planarität: blaue Bereiche entsprechen hoher Planarität und rote Bereiche geringer Planarität.

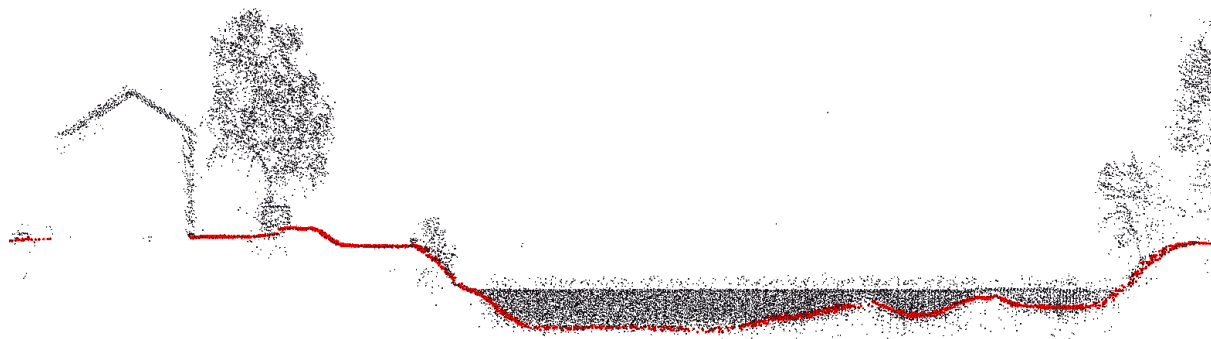


Abbildung 15 Querschnitt durch Punktwolke mit final klassifizierten Geländepunkten über und unter Wasser (rot) und nicht-Geländepunkten (grau).

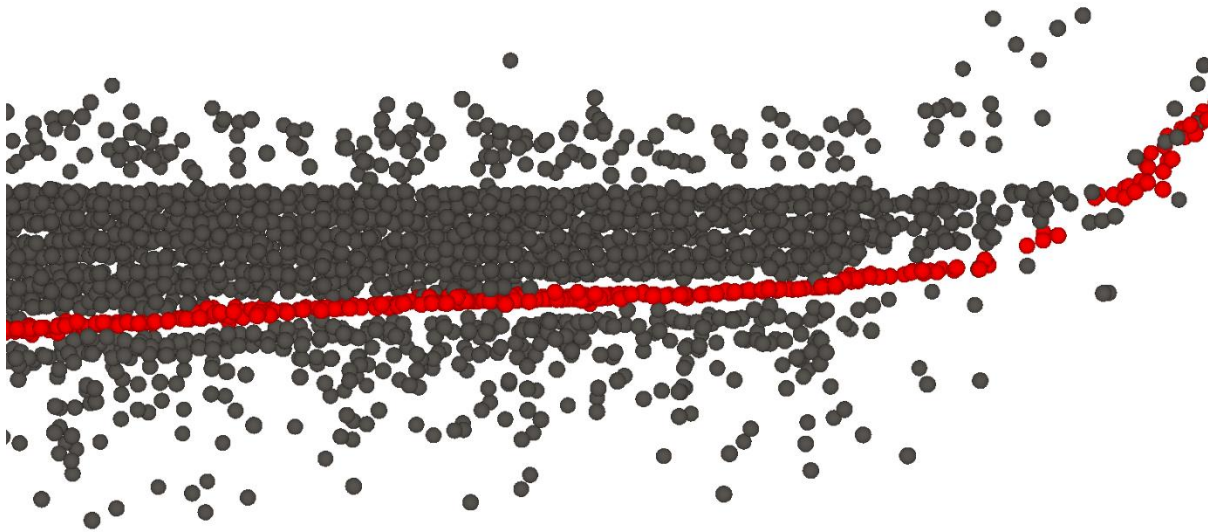


Abbildung 16 Detailquerschnitt durch Punktwolke mit final klassifizierten Geländepunkten über und unter Wasser (rot) und nicht-Geländepunkten (grau).

3.4. Klassifizierung der Wasseroberfläche

Der emittierte Laserpuls wird zunächst an der Luft-Wasser-Grenze teilweise reflektiert. Diese Reflexion ist meistens ein markanter Peak in der FWF und hängt vom Einfallswinkel und der Rauigkeit der Wasseroberfläche ab. Das restliche Laserlicht, das in den Wasserkörper eindringt, wird exponentiell gedämpft (Petzold, 1972). Wenn genügend Laserlicht bis zur Sohle vordringt, ist ein zweiter – vor allem bei tieferen Gewässern – wesentlich kleinerer Peak in der FWF zu finden. Der Amplitudenverlauf im Wasserkörper folgt dem Lambert-Beer'schen Gesetz:

$$A_s = A_0 e^{-\kappa s}$$

wobei A_s die Amplitude, s der Weg der FWF, A_0 die Anfangsamplitude und κ der Dämpfungskoeffizient ist. Durch Umformen erhält man κ :

$$-\ln\left(\frac{A_s}{A_0}\right) \frac{1}{s} =: \kappa(s)$$

Damit wird für jede Amplitude der FWF ein κ berechnet. Anschließend wird aus der Funktion $\kappa(s)$ der Median κ als repräsentativer Wert für die diskret gegebenen Werte s verwendet. Beispielhaft wurde in Abbildung 4 das Einpassen der e-Funktion in eine FWF aus dem Wasserkörper dargestellt. Das Kriterium für ein erfolgreiches Einpassen der e-Funktion ist die integrierte absolute Differenz zwischen Amplitude A_s und dem dazugehörigen Wert aus der e-Funktion. Mit einem Schwellwert für die Differenz wird dann festgelegt, ob es sich hier um einen Wasserkörper handelt und es kann eine entsprechende Vorklassifizierung durchgeführt werden.

Diese grobe Vorklassifizierung erfolgt nach der FWF-Auswertung und zugehörigen 3D-Punktbestimmung. Dabei wird zuerst getestet (Lambert-Beer'sche Dämpfung), ob die FWF Teil des Wasserkörpers ist. Wenn ja, wird der erste Peak der betreffenden FWF als Wasseroberfläche (orange Punkte in Abb. 5) und der letzte Peak als Sohle (grüne Punkte in Abb. 5) vorklassifiziert. Die Punkte dazwischen könnten als Wasserkörper ausgewiesen werden, ist aber zu diesem Zeitpunkt nicht durchgeführt worden, da im Anschluss die genauere Klassifizierung erfolgt. Die initiale Klassifizierung der Wasseroberfläche basiert auf der Vorklassifizierung des Wasserkörpers über das Einpassen einer e-Funktion bei der FWF-Analyse (Abb. 4 & 5). Diese Wasseroberflächenpunkte werden auf ein Raster mit maximaler Größe von $1 \times 1 \text{ m}^2$ abgebildet und das 99%-Quantil pro Rasterzelle nach Mandlbürger et al. (2013) bestimmt. Die klassifizierten Geländepunkte werden ebenfalls auf ein Raster abgebildet, z.B. mit einer Zellengröße von $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ (Abb. 17).

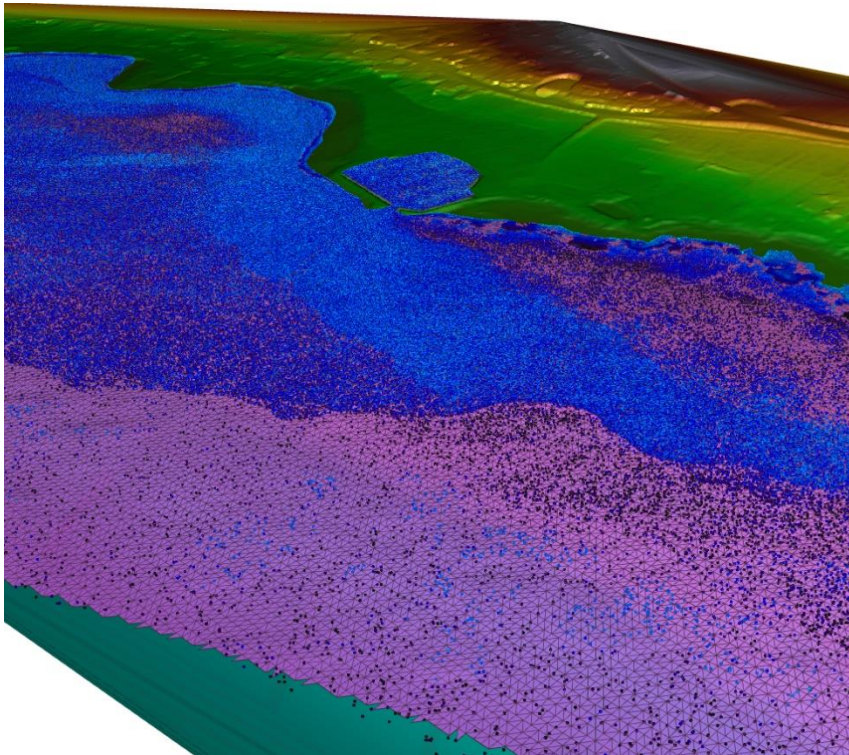


Abbildung 17 Trianguliertes Wasserflächenmodell für einen See (magenta), klassifizierte Wasserspiegelpunkte (blau) und digitales Geländemodell (nach Höhe eingefärbt).

3.5. Refraktionskorrektur

An der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser wird der Laserstrahl reflektiert und gebrochen, da sich Licht in Wasser ca. 25% langsamer ausbreitet als in Luft ($c_{\text{Luft}} = 299.710 \text{ km/s}$, $c_{\text{Wasser}} = 225.000 \text{ km/s}$). Bei der Brechungs- und Laufzeitkorrektur (Refraktion) wird für die klassifizierten Gewässersohlpunkte unterhalb der Wasseroberfläche die eigentliche Tiefe und Lage berechnet. Als Ausgangsdatensätze werden hierbei die Punktwolke mit dem Zeitstempel für jeden Punkt, das triangulierte Wasseroberflächenmodell und die Flugtrajektorie mit dem Zeitstempel für jeden Punkt benötigt. Prinzipiell wird zunächst ein Punktpaar mit gleichem Zeitstempel – Punkt P aus der Trajektorie unter Berücksichtigung der Hebelarme zwischen IMU und Laserzentrum sowie der Bore-sight-Winkel und Punkt Q aus der Punktwolke – sowie deren Verbindungsvektor betrachtet (Abb. 18). Daraus wird der Punkt ermittelt, wo der Strahl P–Q die Wasseroberfläche S schneidet (Abb. 18). Einerseits wird so der Strahlauftreffwinkel bestimmt, um den Strahl hinsichtlich Refraktionswinkel zu korrigieren, und andererseits wird die Strahllänge S–Q unter Wasser ermittelt, um die Laufzeitkorrektur bezüglich Refraktionsindex anzubringen (Abb. 18). Mit dem Refraktionsindex von 1.33 für Wasser und 1.000292 für Luft wird die Längenkorrektur wie folgt berechnet:

$$\text{Strahllänge unter Wasser} \times (1/\text{Refraktionsindex Wasser}) = \text{Strahllänge unter Wasser} \times 0.75.$$

Die Winkelkorrektur wird mit dem Brechungsgesetz nach Snellius berechnet:

$$\text{Refraktionsindex Luft} \times \sin(\text{Winkel zwischen Strahl in Luft \& Wasseroberfläche}) = \text{Refraktionsindex Wasser} \times \sin(\text{Winkel zwischen Wasseroberfläche \& Strahl in Wasser}).$$

Zudem wird die Refraktionskorrektur bzgl. des verwendeten Refraktionsindex nach Schwarz et al. (2020) angepasst. Für die Längenkorrektur wird ein Refraktionsindex von 1.356 und für die Winkelkorrektur von 1.33 verwendet, da für erstere die Gruppengeschwindigkeit des Laserpulses und für letztere die Wellenlänge des Lichts (Phasengeschwindigkeit) maßgeblich ist.

In Abbildung 19 ist zur beispielhaften Veranschaulichung die Situation vor und nach Durchführung der Refraktion dargestellt. Die korrigierten Sohlpunkte (in blau) liegen nach der Refraktion deutlich oberhalb ihrer ursprünglichen Position ohne Anwendung der Refraktion (in rot). Geländepunkte oberhalb des Wasserspiegels bleiben von der Refraktion unberührt (Abb. 19).

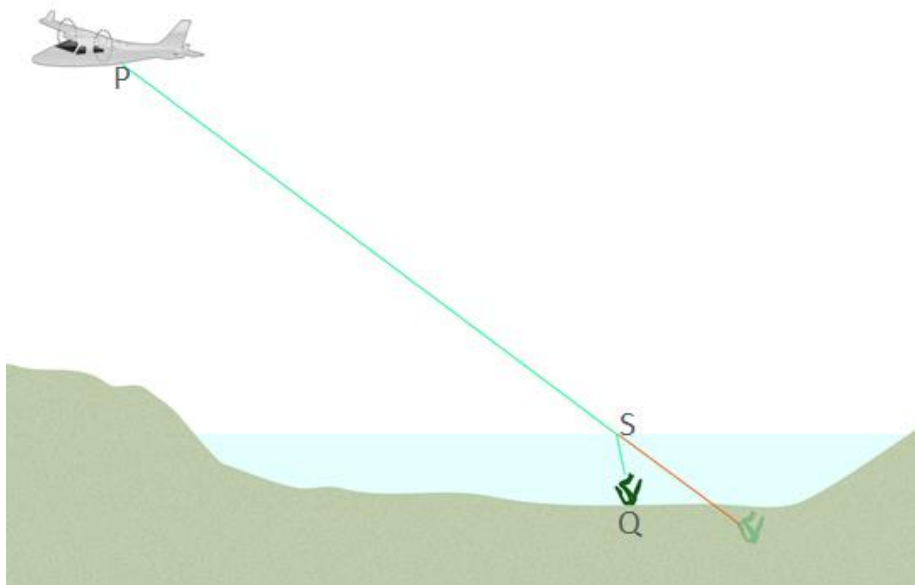


Abbildung 18 Schematische Darstellung zur Berechnung der Refraktion (Erläuterungen im Text).

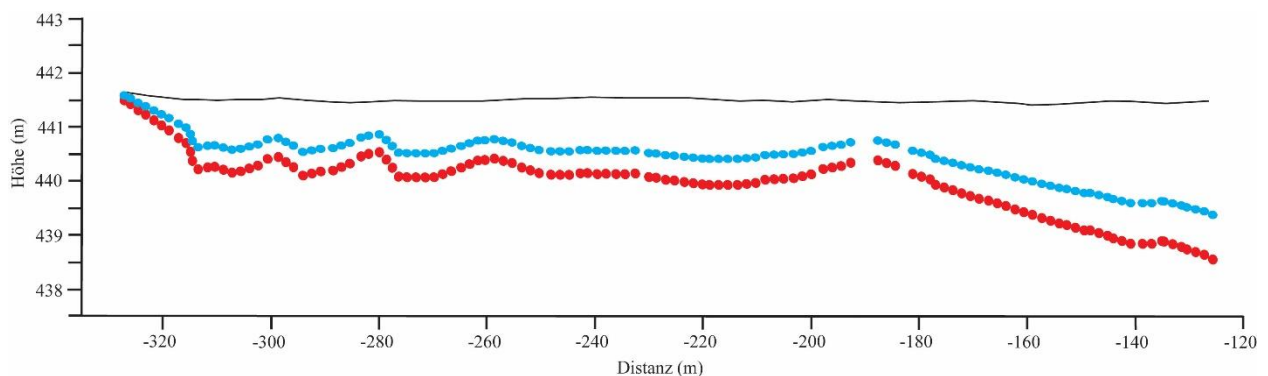


Abbildung 19 Querschnitt durch eine Punktwolke vor (in rot) und nach (in blau) Berechnung der Refraktion.

3.6. DGM & Wassertiefen

Auf der Grundlage der klassifizierten Geländepunkte über und unter Wasser (Klassen 2 & 27) wird ein DGM abgeleitet, indem die Geländepunkte auf ein 0.5x0.5 m Raster abgebildet werden. Der Ansatz besteht darin, einen einzelnen Punkt in die Mitte jeder Rasterzelle zu projizieren, der dann die durchschnittliche Höhe aller Geländepunkte innerhalb dieses Rasterelements darstellt. Verbleibende Lücken im erhaltenen DGM werden interpoliert (Abb. 20 links). Die Abbildung der Wassertiefen in Abbildung 21 erfolgte durch Höhendifferenzbildung auf einem 1x1 m Raster bzgl. der mittleren Wassertiefe von -0.75 m am Pegelnullpunkt (213.10 m NN) mit daraus resultierenden Höhe von 213.85 m (89355SE_KaltererSee_LagodiCaldaro_W_60m.Cmd.RelAbs.xlsx). Die Abschätzung des Wasservolumens für verschiedene Wasserstände im Kalterer See erfolgte auf Grundlage eines 5x5 m DGMs für Wassertiefen von 0 m bis -5 m:

NN-Höhe (m)	Wassertiefe (m)	Wasservolumen (m ³)	Wasseroberfläche (m ²)
213.85	0	5'334'013	1'362'420
212.85	-1	4'009'924	1'310'646
211.85	-2	2'747'304	1'206'174
210.85	-3	1'629'744	1'025'624
209.85	-4	711'650	781'832
208.85	-5	100'156	388'838

Zudem wurden Wassertiefenkonturen mit einem Intervall von 1 m abgeleitet (Abb. 20 rechts). Mit der verwendeten Messmethode wird die Sedimentoberfläche des Seegrundes erfasst. Für eine aussagekräftige Bestimmung von aktuellen Sedimentationsraten im See ist ein Monitoring, d.h. eine erneute Vermessung des Seegrundes, unter Verwendung der gleichen Technologie in zehn Jahren notwendig.

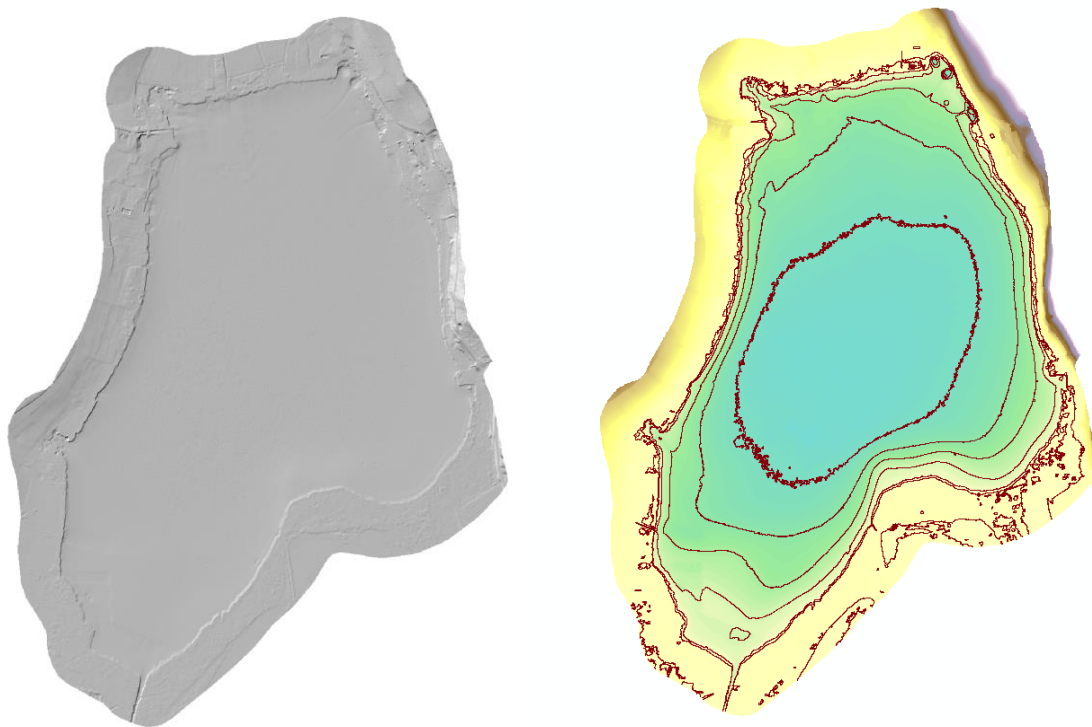


Abbildung 20 Schummerung des interpolierten DGMs zum Kalterer See (links). Wassertiefenlinien inkl. nach Wassertiefe eingefärbtes DGM mit tiefster Linie bei -5 m (rechts).

4. Literaturverzeichnis

- 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.
- Daimon M. & Masumura A. (2007): Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region, *Appl. Opt.* 46, p. 3811–3820.
- Dobler W, Steinbacher F, Baran R, Ritter M, Aufleger M (2014) High resolution bathymetric lidar data as Base For hydraulic-modelling of a mountain stream. International Conference on Hydroinformatics 2014, New York, <http://www.proceedings.com/25674.html>.
- Hecht, E. & Zajac, A. (2003): *Optics*; Fourth Edition, Pearson Higher Education, ISBN 978-0-321-18878-6.
- Glira P., Pfeifer N., Briesse C., Ressel C. (2015) Rigorous strip adjustment of airborne laserscanning data based on the icp algorithm. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Copernicus GmbH, vol. 2, pp 73–80, DOI 10.5194/isprsannals-II-3-W5-73-2015.
- Glira P., Pfeifer N., Mandlbürger G. (2016) Rigorous strip adjustment of UAV based laserscanning data including time-dependent correction of trajectory errors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 82(12):945–954, DOI 10.14358/PERS.82.12.945.
- Kedenburg S., Vieweg M., Gissibl T. & Giessen H. (2012): Linear refractive index and absorption measurements of nonlinear optical liquids in the visible and near-infrared spectral region. *Opt. Mat. Express* 2, p. 1588–1611.
- Kraus K, Pfeifer N (1997) A new method for surface reconstruction from laser scanner data. In: *IAPRS*, XXXII, 3/2W3, Haifa, Israel.
- Lohani B., Ghosh S. (2017) Airborne LiDAR technology: a review of data collection and processing systems. *Proc Natl Acad Sci, India, Sect A* 87:567–579.
- Lohmann P., Koch A., Schäffer M. (2000) Approaches to the filtering of laser scanner data. *Int Arch Photogrammetry Remote Sens XXXII I(B3/1):534–541*.
- 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: *ISPRS Workshop Laser Scanning 2013*, Antalya, Türkei; 11.–13. November 2013.
- Meng X, Wang L, Silván-Cárdenas J, Currit N (2009) A multi-directional ground filtering algorithm for airborne LIDAR. *ISPRS J Photogrammetry Remote Sens* 64(1):117–124.
- Petzold T. (1972) *Volume Scattering Functions for Selected Ocean Waters*. Scripps Institution of Oceanograph <https://doi.org/10.5811/westjem.2013.7.18472>.
- Schwarz, R., Pfeifer, N., Pfennigbauer, M., & Mandlbürger, G. (2020). Depth Measurement Bias in Pulsed Airborne Laser Hydrography Induced by Chromatic Dispersion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* PP (99): 1–5. DOI:10.1109/LGRS.2020.3003088.
- Sithole G. (2001) Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXIV(3/4):203–210*.
- Steinbacher, F., Dobler, W., Benger, W., Baran, R., Niederwieser, M., & Leimer, W. (2021) Integrated Full-Waveform Analysis and Classification Approaches for Topo-Bathymetric Data Processing and Visualization in HydroVISH; *PFG Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, <https://doi.org/10.1007/s41064-021-00150-3>.
- Tilton, L.W., & Taylor, J.K. (1938): Refractive index and dispersion of distilled water for visible radiation at temperatures 0 to 60°C; *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol. 20, p. 419–477.
- Wu, J., van Ardt, J.A.N., & Asner, G.P. (2011): A comparison of signal deconvolution algorithms based on small-footprint LiDAR waveform simulation; *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*; <https://doi.org/10.1109/TGRS.2010.2103080>.