



AWEL  
Abteilung Wasserbau  
Geoinformation und Hydrometrie  
z.H. Maja Rapp  
Walcheplatz 2  
8090 Zürich  
Schweiz

Airborne HydroMapping GmbH  
Feldstr. 1b  
A – 6020 Innsbruck  
www.ahm.co.at  
info@ahm.co.at

Contact Partner:  
DI Frank Steinbacher  
☎ +43 (0)512 / 31 90 70

## Projektbericht: Zürichsee – 18. März 2020

### AHM-Team

Projektleitung	Frank Steinbacher
Projektmanagement	Ramona Baran
Datenprozessierung	Manfred Niederwieser Ramona Baran

Datum 21. Oktober 2020



CEO: ZT Dipl.-Ing. Frank Steinbacher | Prof. Dr.-Ing. Markus Aufleger  
Registernummer: FN 398330f | Court: Landesgericht Innsbruck  
VAT(AT): ATU68023569 | VAT(DE): DE290333295  
EasyBank BIC, IBAN: EASYATW1, AT061420020010926590  
BankAustria: BIC, IBAN: BKAUATWW, AT881200052736064152

## Inhaltsverzeichnis

1. Technologie, Zielstellung und Projektgebiet	3
2. Methodik	5
2.1. Flug- und Messinstrumente	5
2.2. Messbedingungen	6
2.3. ALB-Datenprozessierung - Abbildung 4	7
2.3.1. Trajektorie, Kalibrierung, Streifenabgleich und Georeferenzierung	8
2.3.2. Softwarepaket HydroVISH	9
2.3.3. Auswertung Full Waveform	11
2.3.4. Klassifizierung der Punktwolke	12
<i>Filterung von Fehlechos</i>	12
<i>Automatische Klassifizierung</i>	15
<i>Manuelle Klassifizierung</i>	16
2.3.5. Wasseroberflächenmodell und Refraktion	17
<i>Wasserspiegel und Wasseroberflächenmodell</i>	17
<i>Berechnung der Refraktion</i>	20
2.3.6. Ableitung digitaler Modelle	22
<i>Kombination ALB und Echolot zum digitalen Geländemodell</i>	22
<i>Berechnung digitales Oberflächenmodell</i>	22
2.3.7. Korrekturen	24
3. Literaturverzeichnis	27
4. Metainformation gelieferte Datensätze	29
<i>Klassifizierte ALB-Punkte</i>	29
<i>DGM aus ALB und Echolot</i>	29
<i>DOM aus ALB</i>	29

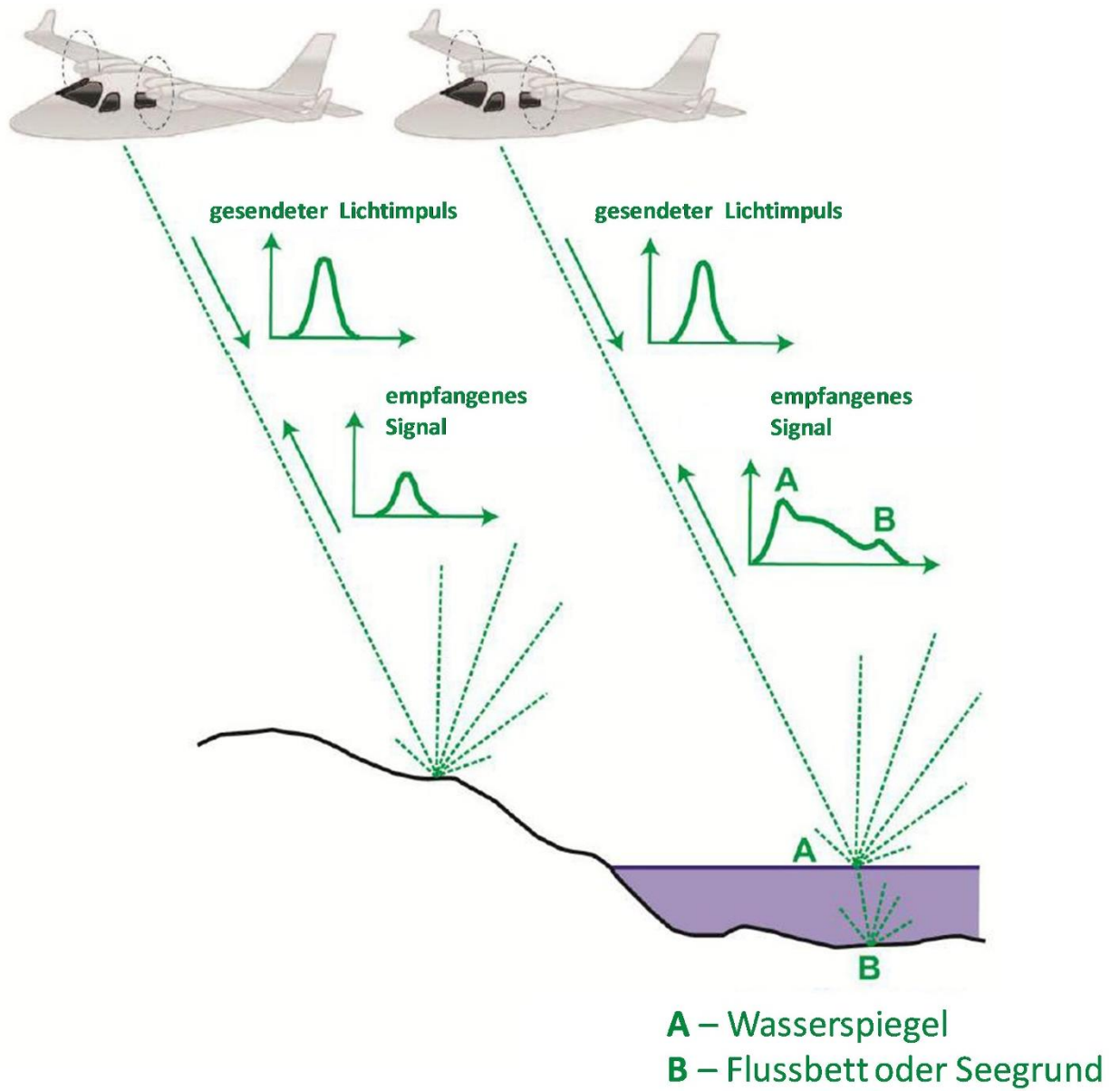
## 1. Technologie, Zielstellung und Projektgebiet

Mit traditionellen Methoden der Gewässervermessung ist man kaum in der Lage, hochauflösende und flächendeckende räumliche Daten der Flachwasserzone zu erfassen. Zudem haben die Ergebnisse oftmals eine eher geringe räumliche Auflösung und sind teuer und zeitintensiv. Im Gegensatz dazu ermöglicht das luftgestützte topo-bathymetrische Laserscanning durch die Verwendung einer neuen Generation von Laserscangeräten mit grüner Wellenlänge (532 nm) sehr genaue ( $\pm$  einige Zentimeter) und sehr hoch auflösende (ca. 20–30 Punkte/m<sup>2</sup>) Vermessungen der Landoberfläche und des Gewässerbettes in einem Messvorgang (Abb. 1).

Die neue Messtechnik, im folgenden auch ALB für Airborne Laser Bathymetry genannt, und die daraus gewonnenen umfassenden räumlichen Informationen sind gegenüber der bisherigen, meist querschnittsbasierten oder nur Teilflächen betrachtenden Gewässervermessung eine deutliche Weiterentwicklung. Die Eindringtiefe des Laserstrahls hängt u.a. wesentlich von der Trübung des Wasserkörpers ab: bei idealen Sichtverhältnissen kann die Gewässersohle bis in eine Tiefe von max. ca. 10–11m erfasst werden. Mit Hilfe einer vertieften Signalanalyse, der sogenannten Full Waveform Analyse (FWF-Analyse) kann die Eindringperformance sogar noch um ca. 35% gesteigert werden. Dies bedeutet jedoch einen höheren zeitlichen Prozessierungsaufwand. Neben der erhöhten Eindringung können aber zudem noch weitere Informationen aus den Daten mit Hilfe der FWF-Analyse, wie z.B. Trübung oder Sohligenschaften abgeleitet werden.

Im Vergleich mit topographischen Laserdaten ist die Signalform der Daten für den Gewässerbereich komplexer (Abb. 1), weshalb an die Datenprozessierung entsprechend höhere Ansprüche gestellt werden. Für Punkte unterhalb der Wasseroberfläche, muss zudem eine Refraktion (Brechungs- und Laufzeitkorrektur) durchgeführt werden, da sich der Laserstrahl durch zwei Medien (Luft und Wasser) mit unterschiedlicher Geschwindigkeit bewegt. Zudem funktionieren klassische Ansätze aus der Verarbeitung topographischer Laserdaten zur Klassifizierung bzw. Filterung im topo-bathymetrischen Gewässerbereich nicht, so dass hier neue Algorithmen entwickelt bzw. bestehende Algorithmen erweitert wurden.

Auf Grundlage einer Befliegung mittels grünem Laser entlang der Uferlinie des Zürichsees im Kanton Zürich (Abb. 2) sollen im Anschluss ein neues Geländemodell des Sees in Kombination mit hochauflösenden Echolotdaten erstellt werden. Die Echolotung am Zürichsee wurde 2014 durch die ETH Zürich durchgeführt.



**Abbildung 1** Messprinzip topographisches (links) und bathymetrisches (rechts) Laserscanning aus der Luft.



**Abbildung 2** Übersicht zur topo-bathymetrischen Befliegung der Uferlinie am Zürichsee im Kanton Zürich im März 2020. Die Lokationen der Passpunktevermessung sind gelb markiert.

## 2. Methodik

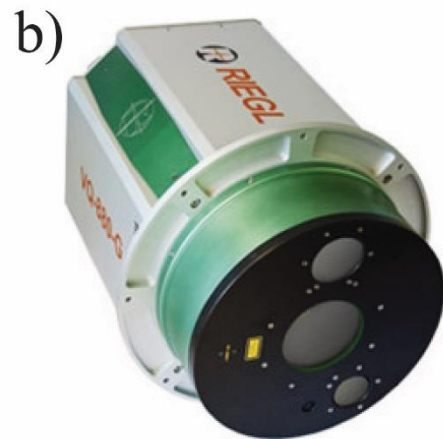
### 2.1. Flug- und Messinstrumente

Als Flugplattform diente ein zweimotoriges Flugzeug (Tecnam P2006T, Abb. 3). Im vorderen Teil des Flugzeuges ist der Laserscanner VQ-880-NG (Riegl Laser Measurement Systems) integriert. Das Gerät verwendet einen grünen Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm und bei der Datenaufnahme wurde mit einer Messfrequenz von 550 kHz gearbeitet. Im hinteren Teil des Flugzeuges ist eine Luftbildkamera (Hasselblad H/39) mit einer Brennweite von 35 mm und eine Wärmebildkamera VarioCAM HD 900 (InfraTec, langwelliges Infrarot 0.75–1.4  $\mu\text{m}$ ) integriert. Daten zur

Flugbahn werden über eine außen am Flugzeug befestigte GPS-Antenne (NovAtel kompakte GNSS-Antenne 42G1215A-XT-1-2-CERT) und eine zusammen mit dem Laserscanner installierten Inertial Measurement Unit (IMU, IGI Aero Controller) mit einer Datenrate von 256 Hz aufgezeichnet.

## 2.2. Messbedingungen

Die Befliegung der Uferlinie des Zürichsees erfolgte am 18. März 2020 bei guten Mess- und Flugbedingungen: klare Sicht, teilweise bewölkt, leichter Wind sowie klares Wasser. Die Vermessung dauerte ca. 1 3/4 Stunden von 08:00 bis 09:45 Uhr (UTC) und es wurden 68 Scanstreifen aufgenommen (= 34 Streifenpaare aus Vor- & Rückstreifen; Abb. 2). Die Sohle des Zürichsees wurde dabei bis in eine Tiefe von ca. 7–8 m erfasst und die generelle Sohlbedeckung ist als sehr gut zu bewerten, wobei die Sohle streckenweise steil vom weg in den See abfällt.



**Abbildung 3** (a) Flugzeug Tecnam P2006T (AHM GmbH); (b) hydrographischer Laserscanner VQ-880-G (RIEGL LMS).

### 2.3. ALB-Datenprozessierung – Abbildung 4

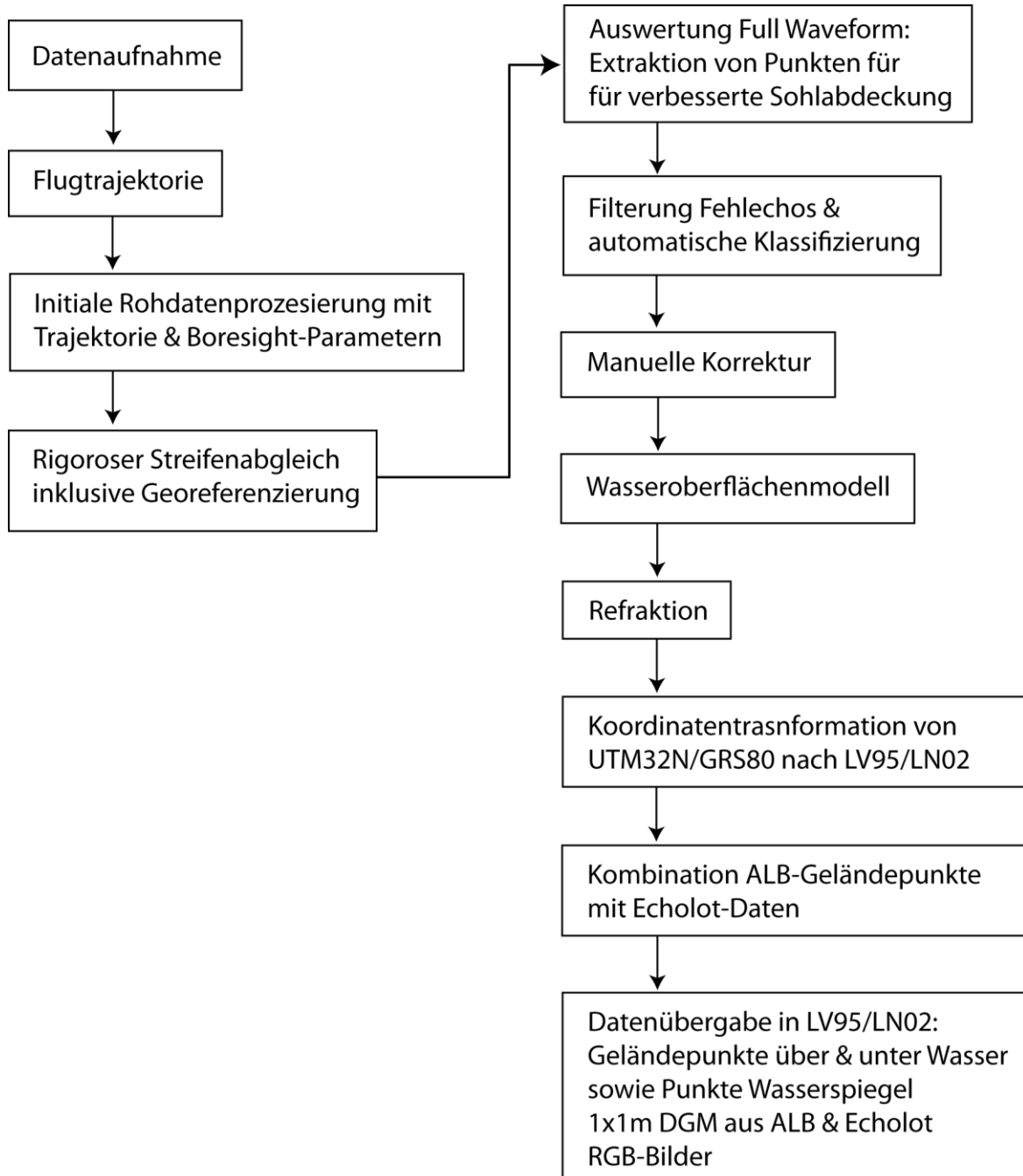


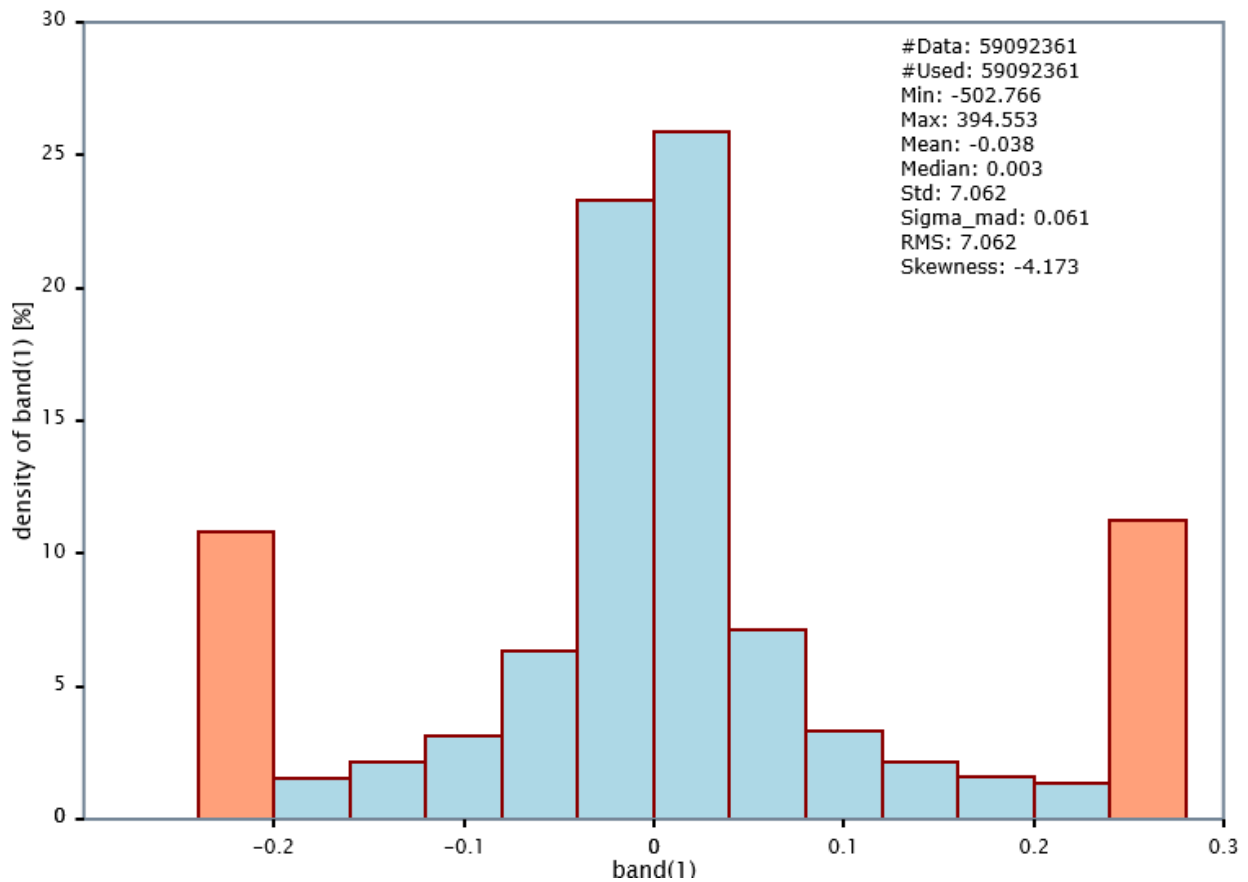
Abbildung 4 Workflow zur ALB-Datenprozessierung.

### 2.3.1. Trajektorie, Kalibrierung, Streifenabgleich und Georeferenzierung

Im ersten Schritt wird die Flugtrajektorie als wesentliche Grundlage für die weitere Prozessierung der Laserdaten unter Verwendung der beiden Softwarepaketen 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 am Zürichsee liegt bei  $\pm 5-10$  cm.

Die sogenannten Boresight-Parameter für eine Vermessungskampagne (= roll, pitch und yaw-Winkel zwischen Laserscanner und IMU) werden auf Grundlage von separat erhobenen Daten eines Kalibrationsfluges ermittelt. Ohne Ermittlung der Boresight-Parameter können keine aussagefähigen Ergebnisse für den Streifenabgleich und die Georeferenzierung erhobener Laserdaten gewonnen werden.

Die initiale Rohdatenprozessierung und erste Evaluierung der Laserdaten bzgl. Eindringtiefe und Sohlabdeckung wird mit der Software HydroVISH (AHM GmbH) durchgeführt unter Nutzung der final berechneten Flugtrajektorie und der derzeit gültigen Boresight-Parameter. Im Anschluss erfolgt der sogenannte rigorose Streifenabgleich, bei dem Positionsversätze zwischen den Scanstreifen korrigiert werden und die ALB-Punktwolke auf einen Referenzdatensatz georeferenziert wird. Hierfür wird ebenfalls die Software HydroVISH verwendet (siehe Abschnitt 2.3.2.). Für die Georeferenzierung der ALB-Daten am Zürichsee wurden durch den Auftraggeber terrestrisch vermessene Passpunkte (Dachecken) als Referenzdatensatz verwendet, aus denen Passflächen abgeleitet wurden (gelb in Abb. 2). Im Ergebnis des Streifenabgleichs wurden die Versätze zwischen den Scanstreifen und in Bezug auf den Referenzdatensatz im Wesentlichen auf weniger als 8 cm minimiert, wie das kumulative Histogramm aller Differenzen in Abbildung 5 für den Zürichsee zeigt. 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.

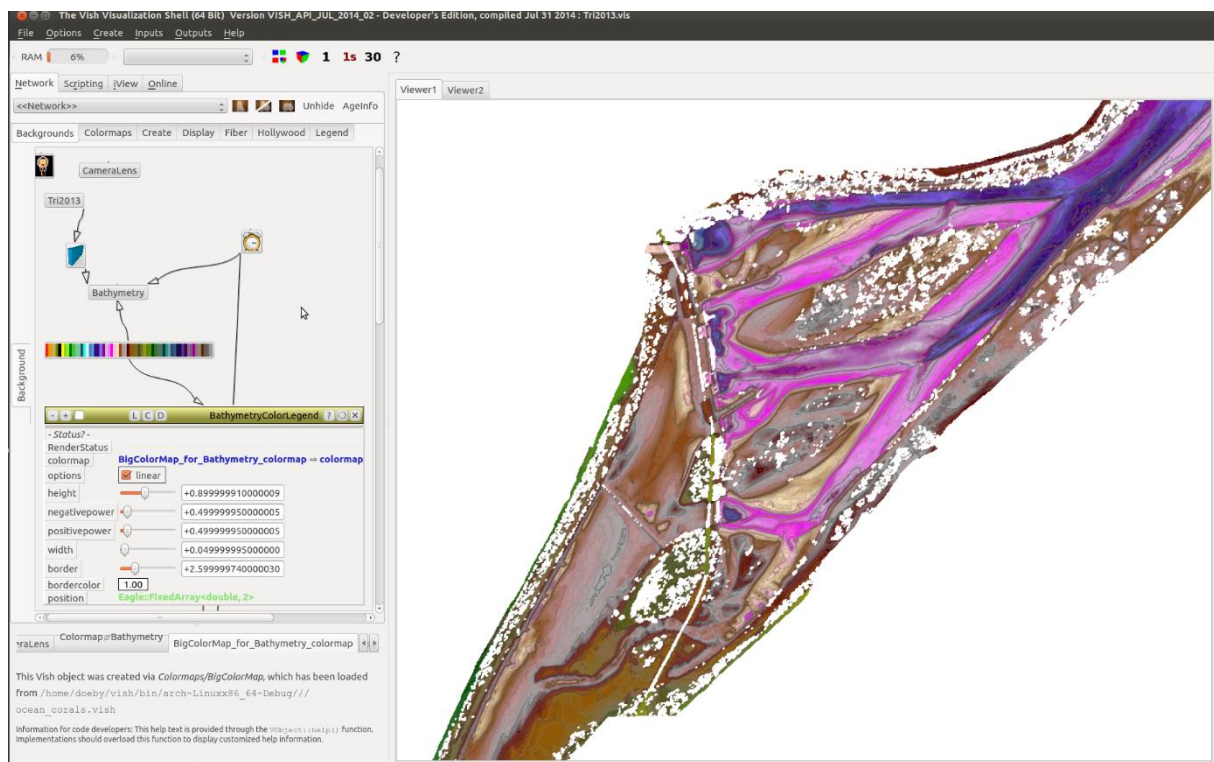


**Abbildung 5** Kumulatives Histogramm der Streifendifferenzen am Zürichsee nach dem rigorosen Streifenabgleich und Georeferenzierung auf terrestrisch vermessene Passpunkte.

### 2.3.2. Softwarepaket HydroVISH

Topo-bathymetrische Punktwolken haben einmal mehr die Anforderungen an eine sehr flexible und Datenquellen unabhängige Softwarelösung zur Datenprozessierung und -analyse erhöht. Eine Reihe weiterer Parameter muss dabei berücksichtigt werden, um die Ergebnisse automatisierter oder auch semi-automatischer Analysen der Punktwolken zu verbessern. Dazu gehören beispielsweise RGB-Werte aus Luftbildern, räumliche Informationen zu Sediment- und Bodentyp, Werte zur Trübung des Wassers während der Datenaufnahme, Wassertemperaturverteilung oder einfach nur Wasserstand an einer Pegelstation und Gewässergrunddaten aus Echolotungen. HydroVISH ist die einzige Softwarelösung zur Handhabung raumzeitlicher Daten unabhängig von Datenformat und Menge an Datenattributen (Benger et al., 2007, 2017).

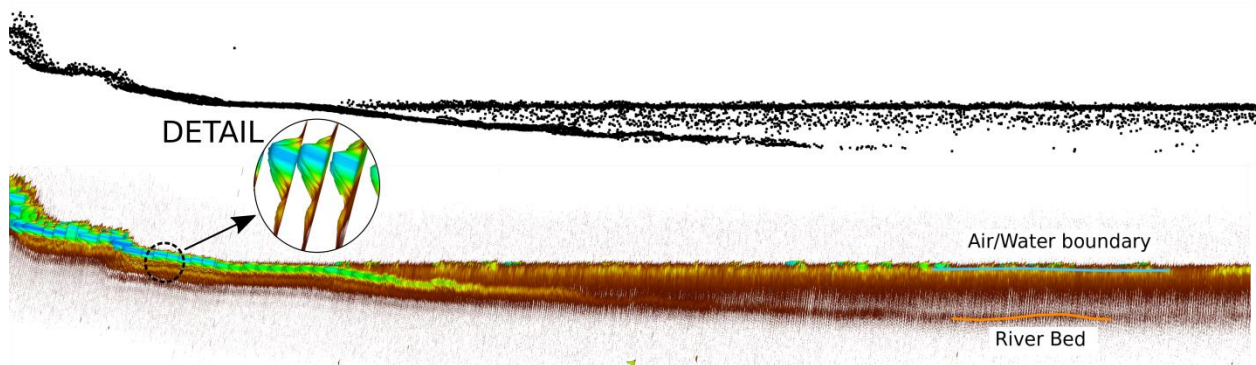
Für die durchgehende Datenspeicherung verwendet HydroVISH ein offenes, transparentes, flexibles und dabei effizientes HDF5-basiertes Datenformat, das beim Datenmanagement die Berücksichtigung von verschiedensten raumzeitlichen Parametern in einem vereinheitlichten Datenmodell erlaubt. So können z.B., Punktwolken, Netze, Bilder und Linien in der gleichen Datei zu verschiedenen Zeitpunkten und in unterschiedlichen Koordinatensystemen abgespeichert werden. HDF5 wurde für Anwendungen im Bereich des High Performance Computing entwickelt mit effizientem und portablen I/O großer Datenmengen. HydroVISH handhabt größer-als-RAM Datenmengen via out-of-core Datenmanagement und unter Verwendung des Grafikprozessors (GPU). Nicht-interaktive Batch-Anwendungen für wiederholte Prozessierungsschritte ist genauso möglich wie die interaktive Datenanalyse bei Nutzung der graphischen Nutzeroberfläche (Abb. 7). KomVISH, der Visualisierungsabweger von HydroVISH ermöglicht einen schnellen Datenzugang und eine Kopplung mit GIS-Applikationen um die Datenmengen weiter verwalten zu können.



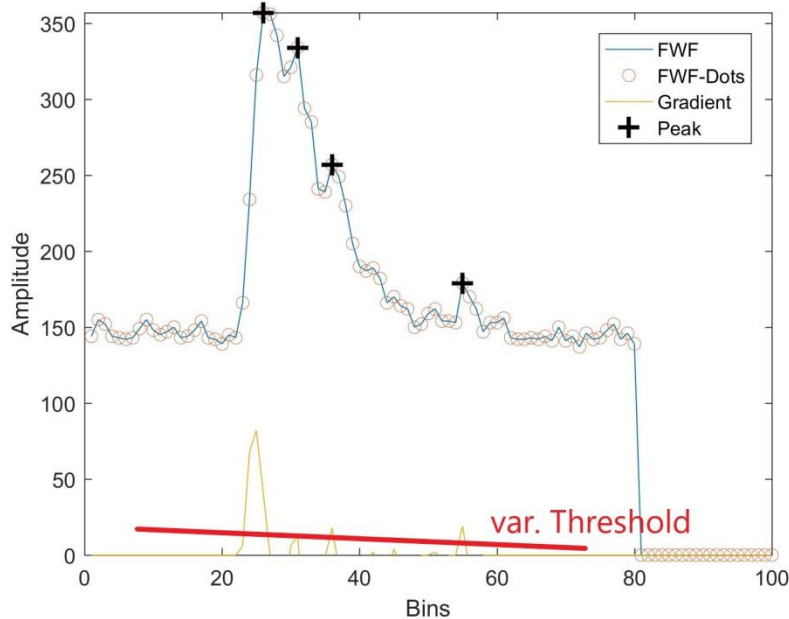
**Abbildung 7** HydroVISH Nutzeroberfläche zur Erstellung von integrierten Prozessierungsabläufen in einem Netzwerk.

### 2.3.3. Auswertung Full Waveform

Die bei der Datenerhebung mit abgespeicherten Amplitudenverläufe der reflektierten Lasersignale (Full Waveform FWF, Abb. 1) wurden in HydroVISH dahin gehend ausgewertet, um zusätzliche Punktinformationen zu extrahieren und damit die räumliche Sohlabdeckung und Eindringtiefe zu verbessern. Zunächst wird jedem durch den Sensor digitalisiertem Messpunkt (sogenannte Online-Prozessierung) die zugehörige FWF zugeordnet (Abb. 8). Aus den FWFs werden Punktkoordinaten abgeleitet, wobei der verwendete Algorithmus auf einem Gradientenfeld basiert, in dem abhängig von einem Schwellenwert Peaks detektiert werden (Dobler et al., 2019). Zusätzlich wird der Schwellenwert in tieferen Gewässerbereichen geringer angesetzt, um auch die schwach ausgeprägten Sohlpeaks zu finden (Abb. 9). Die so detektierten Peaks werden als Punkte mit 3D-Koordinaten umgesetzt. Diese Punkte werden bei der Klassifizierung in den folgenden Arbeitsschritten inkludiert.



**Abbildung 8** Oben: Beispielhafter Flussquerschnitt der Online-Prozessierung. Unten: Gerenderte FWFs entlang der Lasertrahlrichtung. Sohlpeaks sind sichtbar, die wesentlich mehr abdecken als in der vom Sensor ausgegebenen Punktwolke.



**Abbildung 9** Mit einem variablen Schwellenwert werden im Gradientenfeld der FWF Peaks detektiert.

### 2.3.4. Klassifizierung der Punktwolke

#### *Filterung von Fehlechos*

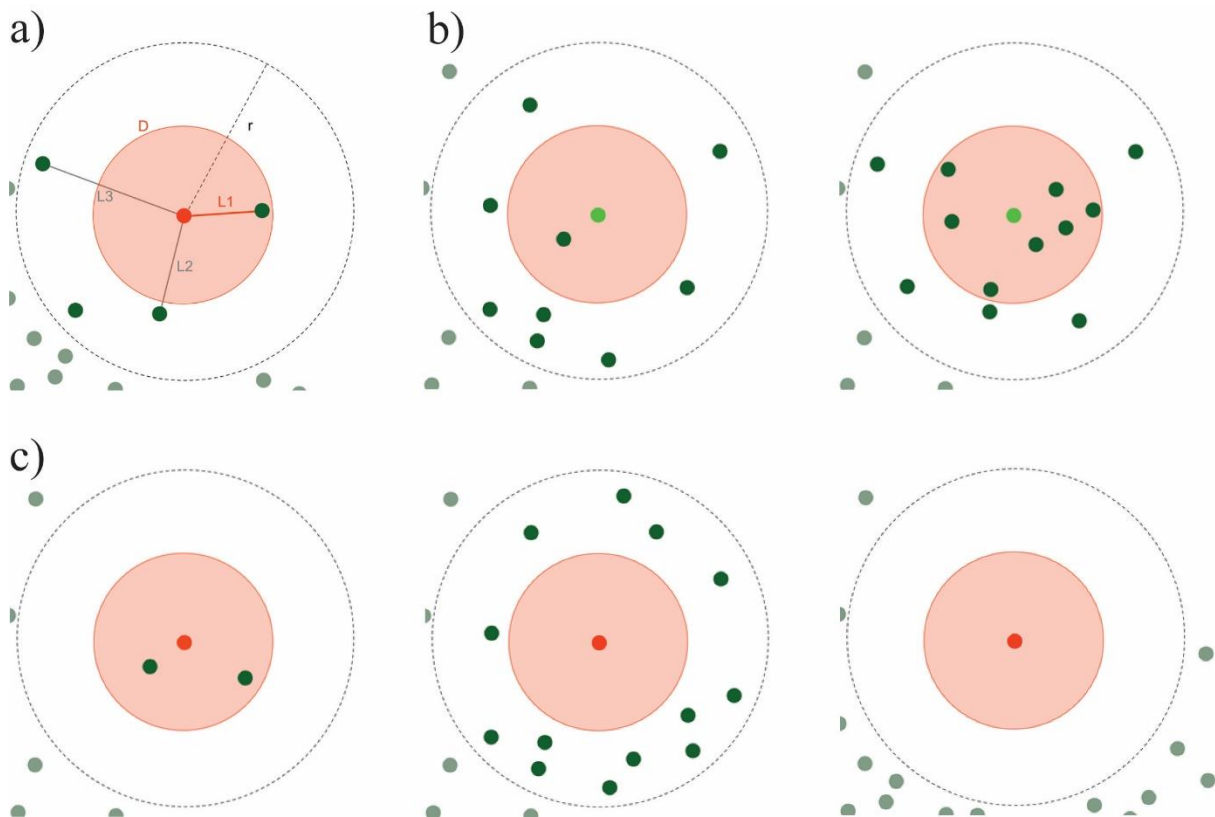
Für eine sinnvolle Klassifizierung der Punktwolke müssen Fehlechos (bzw. das „Rauschen“) von den Messdaten abgetrennt werden (Abb. 10). Die Messoptik des Laserscanners war während der Messkampagne über dem Zürichsee besonders sensitiv eingestellt, um möglichst viele Signale von der Wasseroberfläche aufzuzeichnen und die Eindringung in den Wasserkörper zu erhöhen. Diese Sensoreinstellung führt dazu, dass besonders viele Echodetektionen stattfinden. Diese werden beispielsweise durch Reflektionen des Laserstrahls an kleinsten Partikeln in der Luft hervorgerufen und können z.B. durch hohe Luftfeuchtigkeit begünstigt werden.

Zum Bereinigen der Fehlmessungen mit der Software HydroVISH wurde jeder Datenpunkt hinsichtlich seiner Lage im Raum und hinsichtlich seiner Lage zu anderen Punkten der Punktwolke untersucht. Dabei wurden Punkte, die sich mehr als 50 m über der realen Geländehöhen und mehr als 50 m unterhalb des Gewässergrunds befinden, von der Berechnung ausgeschlossen. Dadurch wurde die eigentliche Analyse auf den relevanten Teil der Rohpunktwolke, den so genannten Space of Interest (SOI), beschränkt.

Die Punkte innerhalb dieses SOI wurden nun einer Nachbarschaftsanalyse unterzogen (Abb. 11). Hierbei wurden innerhalb eines definierten Radius um jeden Messpunkt die Punktdichte (Anzahl der Punkte in der Nachbarschaft) und die Abstände zu den Nachbarpunkten in Beziehung zueinander und zu definierten Schwellenwerten gesetzt. Erfüllte ein Untersuchungspunkt die definierten Bedingungen (Schwellenwerte) nicht, wurde er automatisch der Klasse „Fehlecho“ zugeordnet und vorläufig von der weiteren Datenprozessierung ausgeschlossen. Die Klasse der Fehlechos blieb erhalten, um sie für eine spätere manuelle oder automatisierte Klassifizierung und etwaige Nachbesserungen nutzen zu können, da auf der Wasserseite oftmals Punkte als Fehlecho klassifiziert wurden, die eigentlich zum Wasserkörper, dem Wasserspiegel oder dem Gewässerboden gehören.



**Abbildung 10** Querschnitt durch eine Punktwolke im Bereich einer Hafenanlage: Visuell können Fehlechos und echte Daten klar voneinander getrennt werden.



**Abbildung 11** Nachbarschaftsanalyse in HydroVISH zur Klassifizierung von Fehlechos. Der Suchradius  $r$  beschreibt den Radius der Nachbarschaftsanalyse (a). Das Abstandskriterium  $D$  ist die Distanz, innerhalb der sich der nächstgelegene Punkt befinden muss. Ein Dichtekriterium (nicht gezeigt) definiert die Mindestpunktdichte innerhalb des Suchradius. Ein Punkt ist kein Fehlecho, wenn er innerhalb des Suchradius  $r$  liegt, und das Dichtekriterium und der Abstand zum nächst gelegenen Punkt  $L1$  erfüllt wird. Die Kriterien sind ein Suchradius  $r = 0.75$  m mit einem Dichtekriterium von 5 Punkten innerhalb des Suchradius. Im Teilbild (b) ist der untersuchte Punkt (hellgrün) kein Fehlecho, da das Dichtekriterium (Anzahl dunkelgrüne Punkte) überschritten wird und diese Punkte innerhalb des Suchradius liegen. In Teilbild (c) werden die Daten als Fehlechos (rot) klassifiziert, weil ihre nächsten Nachbarpunkte zu wenig bzw. zu weit entfernt sind.

## ***Automatische Klassifizierung***

In einem ersten Schritt werden alle benachbarten Punkte eines jeden Punktes innerhalb eines definierten Radius untersucht. Die tiefsten 5% und obersten 5% aller Punkte werden nicht weiter berücksichtigt, da diese meist Ausreißer oder nicht relevante Daten repräsentieren. Dann werden durch planare Regression Ebenen berechnet, die am besten zu den Punkten und ihren Nachbarschaftskriterien passen (= Minimierung des Abstandes zwischen Punkten und Ebenen mit Methode der kleinsten Quadrate). Alle Punkte über der berechneten Ebene werden als nicht-Geländepunkt angenommen und entsprechend klassifiziert. Dieser Prozess wird so lange iterative wiederholt bis keine Neuklassifizierung von Punkten erfolgt. Im letzten Schritt der planaren Regression werden alle Punkte, die unterhalb eines definierten Abstandes zur zuletzt berechneten Ebene liegen als negative Ausreißer klassifiziert.

Da die nächsten automatischen Klassifizierungsschritte sehr rechen- und zeitintensiv wären, wenn sie auf der gesamten Punktwolke angewendet würden, wird diese auf ein 0.5x0.5 m Raster abgebildet und die Klassifizierungsschritte werden auf das Raster der Punktwolke angewendet. Nach Fertigstellung der Klassifizierung werden die Ergebnisse der Rasterklassifizierung auf die Punktwolke übertragen.

Zunächst werden alle Rasterpunkte bezüglich ihrer Nachbarschaft untersucht und ihre Shape-Faktoren berechnet. Dies sind Kriterien wie die Planarität, die genutzt werden können, um einen bestimmten Punkt als Geländepunkt zu klassifizieren, oder ob/ob nicht dieser Punkt zu einem Gebäude gehört. Somit werden alle Rasterpunkte, die nicht die festgesetzten Schwellwertkriterien erfüllen, als nicht-Geländepunkte klassifiziert. Die nicht-Geländepunkte werden einer weiteren planaren Regressionsanalyse unterzogen und wieder als Gelände klassifiziert, wenn sie bestimmte Schwellwertkriterien erfüllen. Dieser Schritt kann als Gegenprobe zu den bis hierhin gemachten Klassifizierungsschritten verstanden werden, um Fehlklassifizierungen zu minimieren.

Im Anschluss werden die klassifizierten Geländepunkte auf unvermittelte Höhengsprünge untersucht, um zu prüfen, ob sie nicht doch zu Dachflächen gehören, die oftmals als Gelände klassifiziert wurden. Dies muss unter der Annahme korrigiert werden, dass Dächer und Gebäude Objekte mit beschränkten räumlichen Grenzen sind. In diesen lokalisierten Bereichen wird vom höchsten Punkt aus so lange extrapoliert, bis alle Punkte des betreffenden Objektes ermittelt sind, oder bis ein definiertes Abstandsabbruchkriterium erfüllt ist. Somit werden zwei Fälle unterschieden:

- a) Alle Punkte einer Dach/Gebäude-Struktur sind durch die Extrapolation ermittelt worden, bevor das Abstandsabbruchkriterium erreicht wurde, und werden daher auch als solche klassifiziert.
- b) Das Abstandsabbruchkriterium wird erreicht, so dass die betreffenden Punkte als Geländepunkte gelten und nicht neu klassifiziert werden.

Für die rasterbezogene Klassifizierung des Wasserkörpers inklusive Wasserspiegel wird der gemittelte Reflectance-Wert (bzw. Intensity-Wert) verwendet.

Folgende Klassifizierungszuweisung erfolgt grundsätzlich:

- |  |           |
|--|-----------|
| - Gelände über Wasser bzw. Boden trocken | Klasse 2  |
| - Gelände unter Wasser bzw. Sohle        | Klasse 27 |
| - Wasserspiegel                          | Klasse 9. |

### ***Manuelle Klassifizierung***

Bei der Analyse und Interpretation von 3D-Daten kann kein Algorithmus die menschliche Fähigkeit der kognitiven Abstraktion und Antizipation ersetzen. Daher wird eine manuelle Korrektur der automatischen Klassifizierung durchgeführt, um die Richtigkeit der Ergebnisse zu prüfen und die Datenqualität sicher zu stellen. Somit werden die klassifizierten Punkte kontrolliert und wenn nötig korrigiert. Die Qualität der automatischen Klassifizierungsergebnisse hängt stark von der generellen Qualität der Rohpunktwolke ab. Letztere hängt einerseits hauptsächlich von den Wetter- und Wasserbedingungen während der Befliegung und andererseits von den morphologischen Gegebenheiten im Projektgebiet ab. Faktoren, die die Qualität der automatischen Klassifizierung reduzieren sind: komplexe Geländemorphologie, dichte Vegetationsbedeckung, sehr weite Bereiche mit sehr geringer Wassertiefe (0–20 cm), hohe Trübung, Flussabschnitte mit Weißwasserbildung, Sohlmaterial mit starker Lichtabsorption (Unterwasservegetation, organisches Material im Sohlsediment etc.). Die manuelle Korrektur kann also diesbezüglich zeitaufwändig sein.

Das Vorgehen zur automatisierten Klassifizierung wie oben beschrieben wird ständig weiterentwickelt, um den Zeitaufwand der manuellen Korrektur weitestgehend zu minimieren. So konnte dies innerhalb der letzten Jahre drastisch reduziert werden beispielsweise durch die Verwendung von Machine-Learning-Algorithmen.

Im finalen Schritt der Klassifizierung wird das Ergebnis der Rasterklassifizierung auf die Punkt看ke übertragen, wie oben bereits erwähnt, so dass die klassifizierte

Punktwolke für alle weiteren Datenanalyse- und Modellierungsabsichten verwendet werden kann.

### 2.3.5. Wasseroberflächenmodell und Refraktion

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 alle Messpunkte unterhalb der Wasseroberfläche eine korrigierte Tiefen- und Positionslage berechnet. Dafür muss zuerst die Wasseroberfläche zum Zeitpunkt der Messung modelliert werden, bevor im Anschluss die Refraktion durchgeführt wird.

#### *Wasserspiegel und Wasseroberflächenmodell*

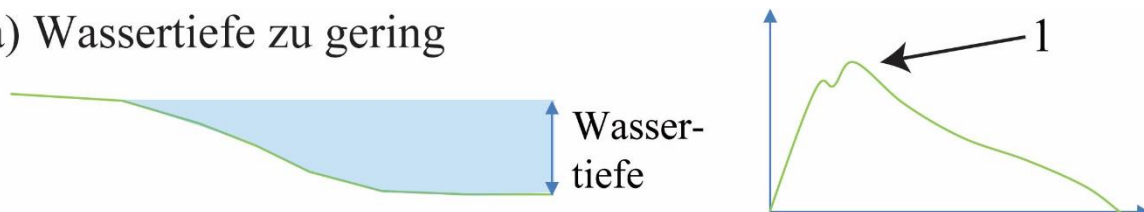
Im Rahmen der Punktwolkenklassifizierung wurden alle Punkte klassifiziert, die den Wasserkörper inklusive Wasserspiegel abbilden. Diese Punkte dienen als Grundlage zur Modellierung der Wasseroberfläche und liegen in einem ca. 20–30 cm breiten Bereich um den wahren Wasserspiegel, da nicht jeder ausgesendete Laserpuls zwingend die Wasseroberfläche detektiert. Die beobachtete Streuung um die Wasseroberfläche hängt dabei wesentlich von der Wassertiefe, dem Wellengang und der Trübung in der Wassersäule ab (Abb. 12).

Zum Zeitpunkt der Messungen am Zürichsee herrschte geringer Wind, so dass die Wasseroberfläche ruhig und verhältnismäßig glatt erschien. Bei einer Laserfootprintgröße von 0.5 m wird somit ein homogenes Abbild der Wasseroberfläche aus den Messdaten abgeleitet. Die geringe Auslenkung der Wasseroberfläche trug zu einer sehr gleichmäßigen Verteilung der Wasseroberflächenpunkte bei, die für das Wasseroberflächenmodell herangezogen werden (Abb. 13).

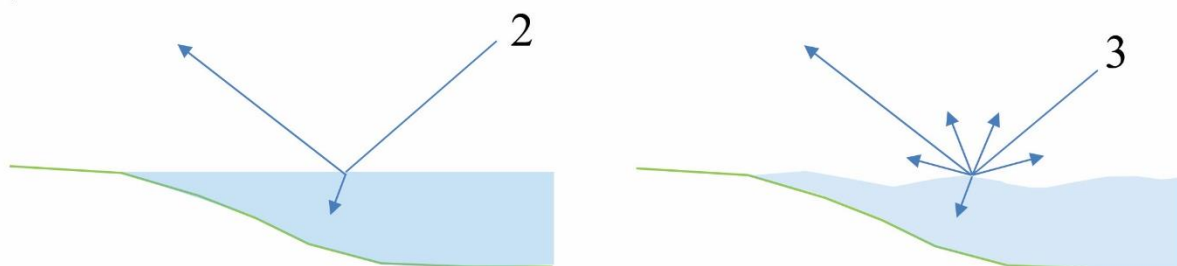
Das Wasseroberflächenmodell wird in solchen Fällen für die Refraktionsberechnung in Elementgrößen von 1.5 m bis 5 m Kantenlänge aufgelöst (Abb. 14). Nur die obersten Punkte der klassifizierten Wasseroberflächenpunkte (99%-Quantile) werden als gültige Punkte für die Modellierung der Wasseroberfläche herangezogen (Mandlbürger et al. 2013) und durch einen einzelnen Punkt ersetzt, der sich im Zentrum der Rasterzelle befindet und die Höhe  $z = q_{0.99}$  besitzt. Für das Wasseroberflächenmodell werden die so ermittelten Höhen der Rasterpunkte miteinander trianguliert, um damit die Refraktion zu berechnen. Zusätzlich ist eine Extrapolation der Wasseroberfläche notwendig, da in sehr seichten Gewässerabschnitten mit einer Wassertiefe kleiner als 15 cm die Wasserspiegellage mit der verwendeten Lasertechnologie nicht erfasst

werden kann (Abb. 12a). Das Wasseroberflächenmodell wird bis zur Uferlinie ausgedehnt und dort mit dem Geländemodell zur Ermittlung der Wasseranschlaglinie verschnitten.

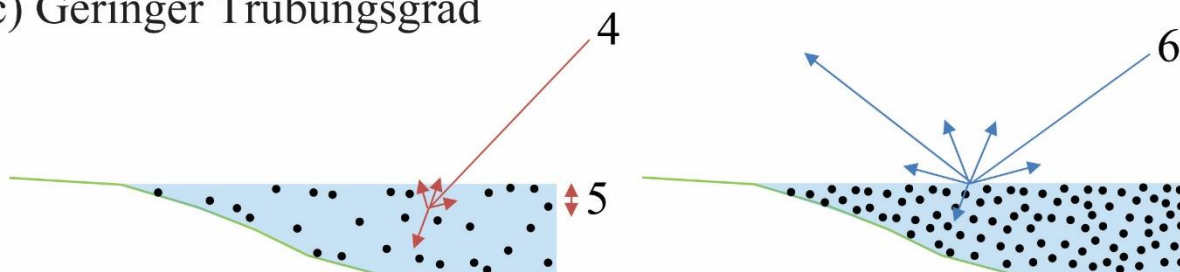
### a) Wassertiefe zu gering



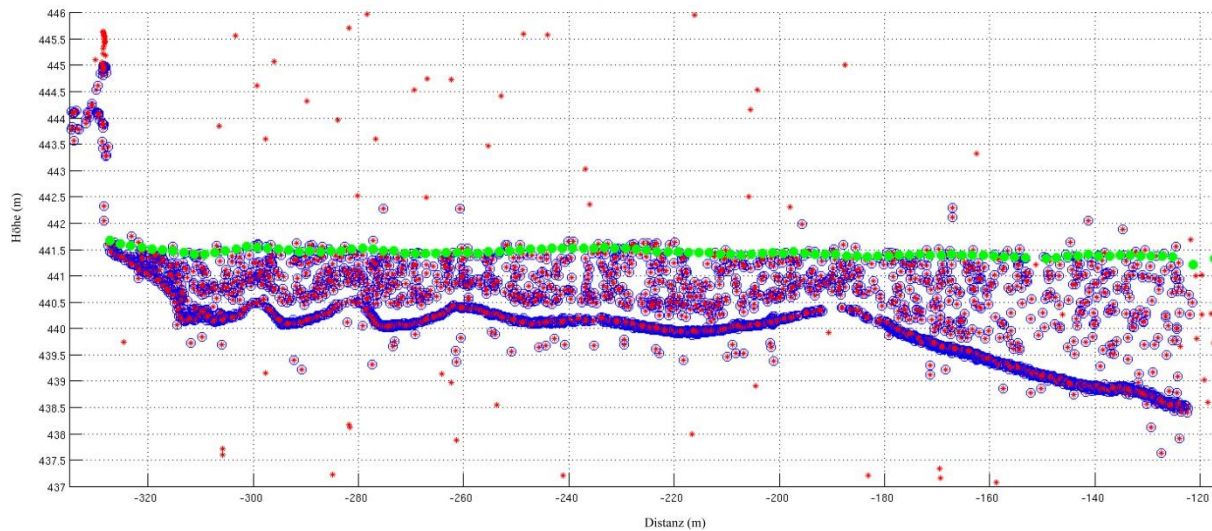
### b) Glatte Wasseroberfläche



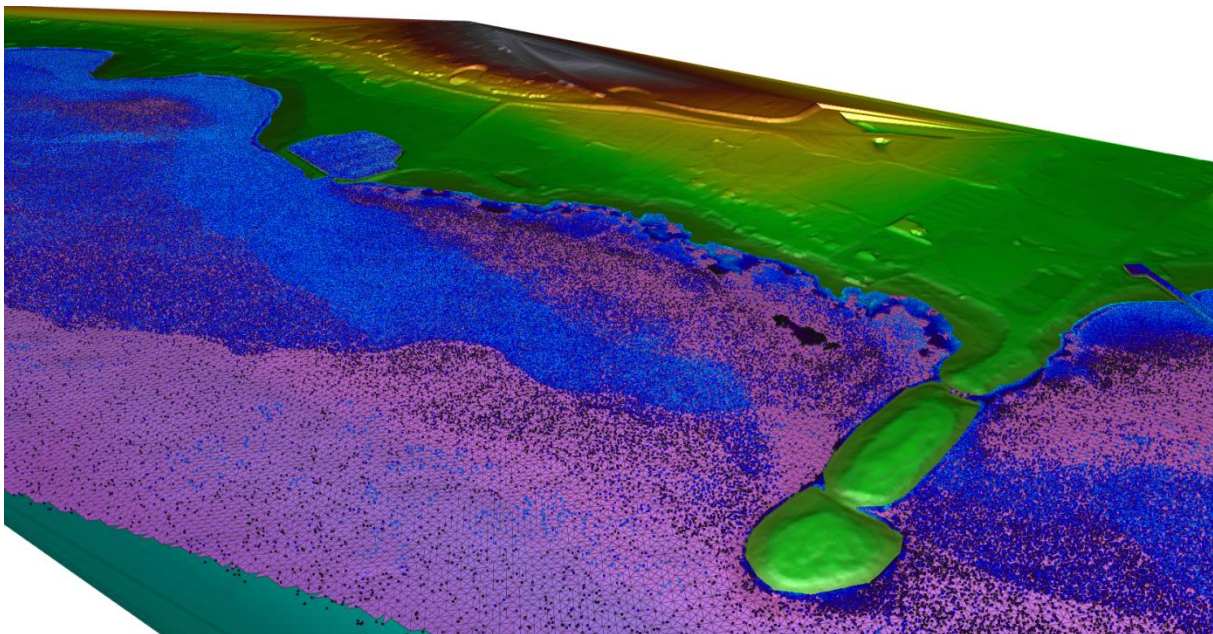
### c) Geringer Trübungsgrad



**Abbildung 12** Die Streuung der Wasserspiegelpunkte ist abhängig von der Wassertiefe (a), von der Form der Wasseroberfläche zum Messzeitpunkt (b) und der Trübung innerhalb der Wassersäule (c). Erläuterungen: Der Laserscanner ist zugleich Sender und Empfänger des ausgesendeten und empfangenen Laserpulses; 1) Zeitunterschied zu klein, so dass keine Unterscheidung zwischen Wasseroberflächen- und Sohlecho möglich ist (Tiefe ca. 15 cm); 2) Totalreflektion des Signals ist möglich; 3) kleine Wellen sind gut zur Vermeidung von Totalreflektion; 4) starke Trübung reduziert die Rückstreuenergie, Boden ist nicht detektierbar; 5) Größere Signaleindringung in den Wasserkörper, bevor das erste Echo zurück gestreut wird; 6) stärkere Trübung ist gut zur Detektion der Wasseroberfläche und schlecht für eine hohe Eindringung.



**Abbildung 13** Querprofil durch eine unklassifizierte Punktwolke (nur Wasserseite; Messpunkte in rot/blau umrandet und Fehlechos in rot). Die grünen Punkte zeigen die Lage des 99%-Quantiles, das auf einem 2x2 m Raster aller als Wasserkörper klassifizierten Punkte berechnet wurde.



**Abbildung 14** Beispielhaftes trianguliertes Wasseroberflächenmodell (magenta), klassifizierte Wasserspiegelpunkte (blau) und digitales Geländemodell (nach Höhe eingefärbt).

### ***Berechnung der Refraktion***

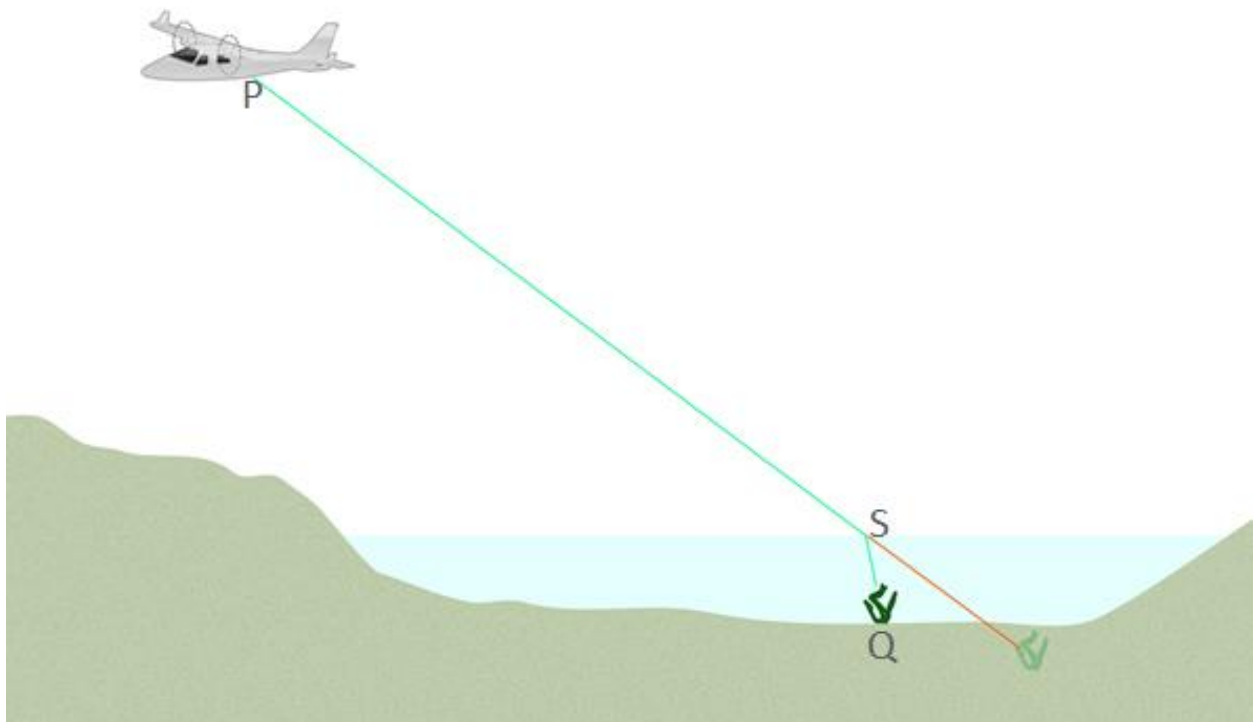
Bei der Refraktion wird für alle Geländepunkte (Sohle), die unterhalb der Wasseroberfläche liegen, die eigentliche Tiefe und Lage berechnet. Als Ausgangsdatensatz wird hierbei die Punktwolke mit dem Zeitstempel für jeden Punkt, das triangulierte Wasseroberflächenmodell und die Flugtrajektorie mit dem Zeitstempel für jeden Punkt benötigt. Prinzipiell wird zunächst ein Punktepaar mit gleichem Zeitstempel – Punkt P aus der Trajektorie und Punkt Q aus der Punktwolke – sowie deren Verbindungsvektor betrachtet (Abb. 15). Daraus wird der Punkt ermittelt, wo der Strahl P–Q die Wasseroberfläche S schneidet (Abb. 15). Einerseits wird damit 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. 15). Mit dem Refraktionsindex von 1.33 für Wasser und 1.000292 für Luft wird die Längenkorrektur wie folgt berechnet:

*Strahllänge unter Wasser  $\times$  (1/Refraktionsindex Wasser) = Strahllänge unter Wasser  $\times$  0.75.*

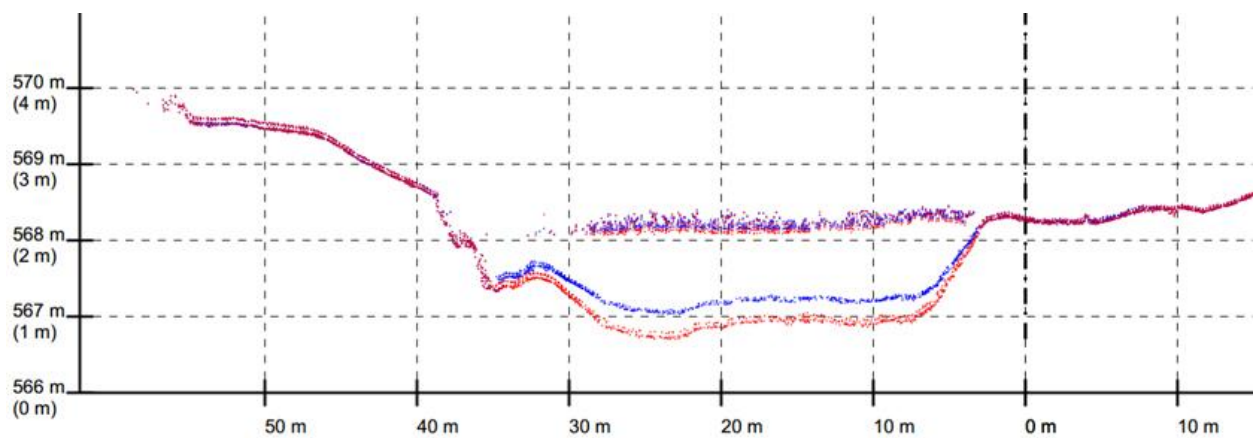
Die Winkelkorrektur wird mit dem Brechungsgesetz nach Snellius berechnet:

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

In Abbildung 16 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. 16).



**Abbildung 15** Schematische Darstellung zur Berechnung der Refraktion (Erläuterungen im Text).



**Abbildung 16** Querschnitt durch eine Punktwolke vor (in rot) und nach (in blau) Berechnung der Refraktion.

### 2.3.6. Ableitung digitaler Modelle

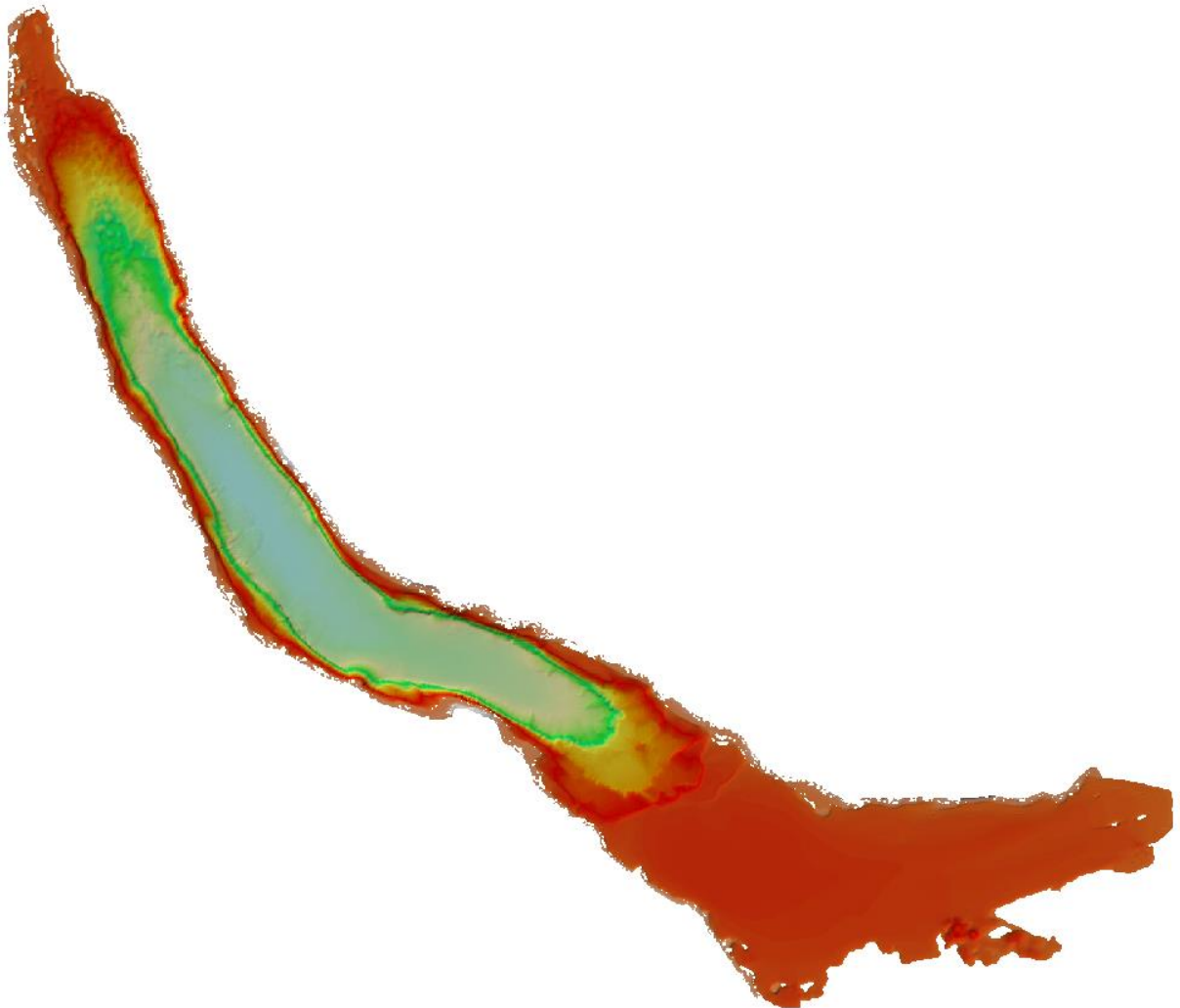
#### *Kombination ALB und Echolot zum digitalen Geländemodell*

Für die Koordinatentransformation in das finale Schweizer Koordinatensystem LV95 mit LN02-Höhenbezug wurde die Software Reframe der Swisstopo verwendet. Durch die ETH Zürich wurden 2014 am Zürichsee hochauflösende Echolotdaten erhoben, die dem AN im Koordinatensystem LV95-LN02 als 1x1 m Raster übergeben wurden. Der Echolotdatensatz wurde mit den für den Zürichsee klassifizierten ALB-Geländepunkten über und unter Wasser zu einem digitalen 1x1 m Geländemodell kombiniert.

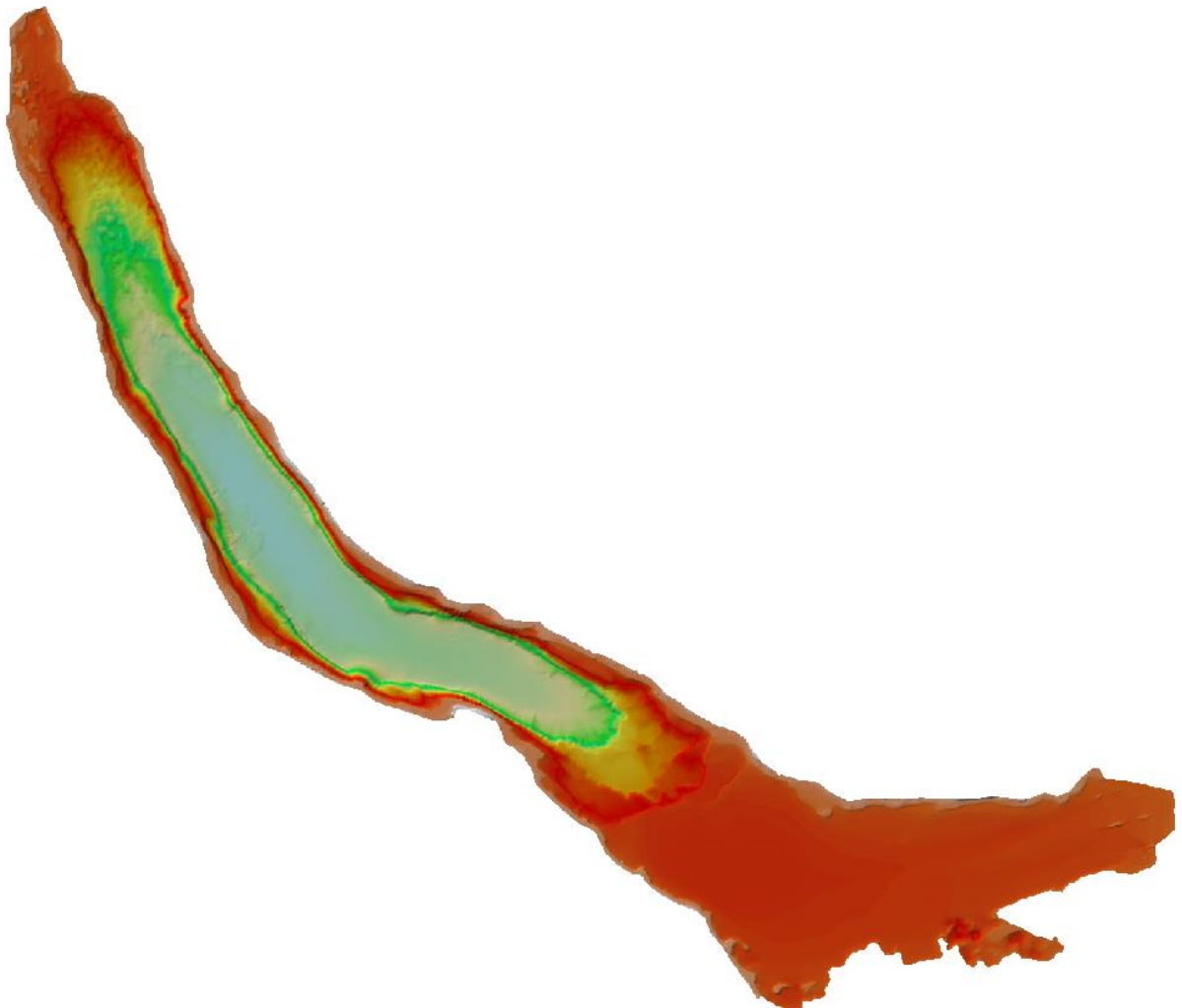
Dabei werden zunächst die ALB-Geländepunkte über und unter Wasser auf ein 1x1 m Raster abgebildet unter Verwendung der mittleren Höhe aller ALB-Geländepunkte je Rasterzelle. Das 1x1 m ALB-Raster und das 1x1 m Echolot-Raster werden dann zu einem 1x1 m Gesamtraster zusammengefasst unter Verwendung des Mittelwertes im Überlappungsbereich zwischen ALB- und Echolot-Raster. Dieser Ansatz ist zweckdienlich, da die klassifizierten ALB-Sohlpunkte und die Echolotdaten generell eine gute Übereinstimmung zeigen. Verbleibende Lücken zwischen den ALB- und Echolotdaten wurden zusätzlich auch linear interpoliert (Abb. 17-18).

#### *Berechnung digitales Oberflächenmodell*

Für die Berechnung des digitalen Oberflächenmodells wurden die klassifizierten ALB-Geländepunkte über Wasser, Wasserspiegelpunkte und unklassifizierte nicht-Geländepunkte (Gebäude, Vegetation etc.) zu Grunde gelegt. Letztere wurden von Fehlechos sowie Krananlagen auf Baustellen und größeren Schiffen bereinigt. Diese Punkte wurden auf ein 1x1 m Raster unter Verwendung der maximalen Höhe aller Punkte je Rasterzelle abgebildet. Verbleibende Lücken zwischen den ALB-Punkten wurden zusätzlich auch linear interpoliert.



**Abbildung 17** Gesamt-DGM des Zürichsee ohne Interpolation von Datenlücken zwischen ALB und Echolot.

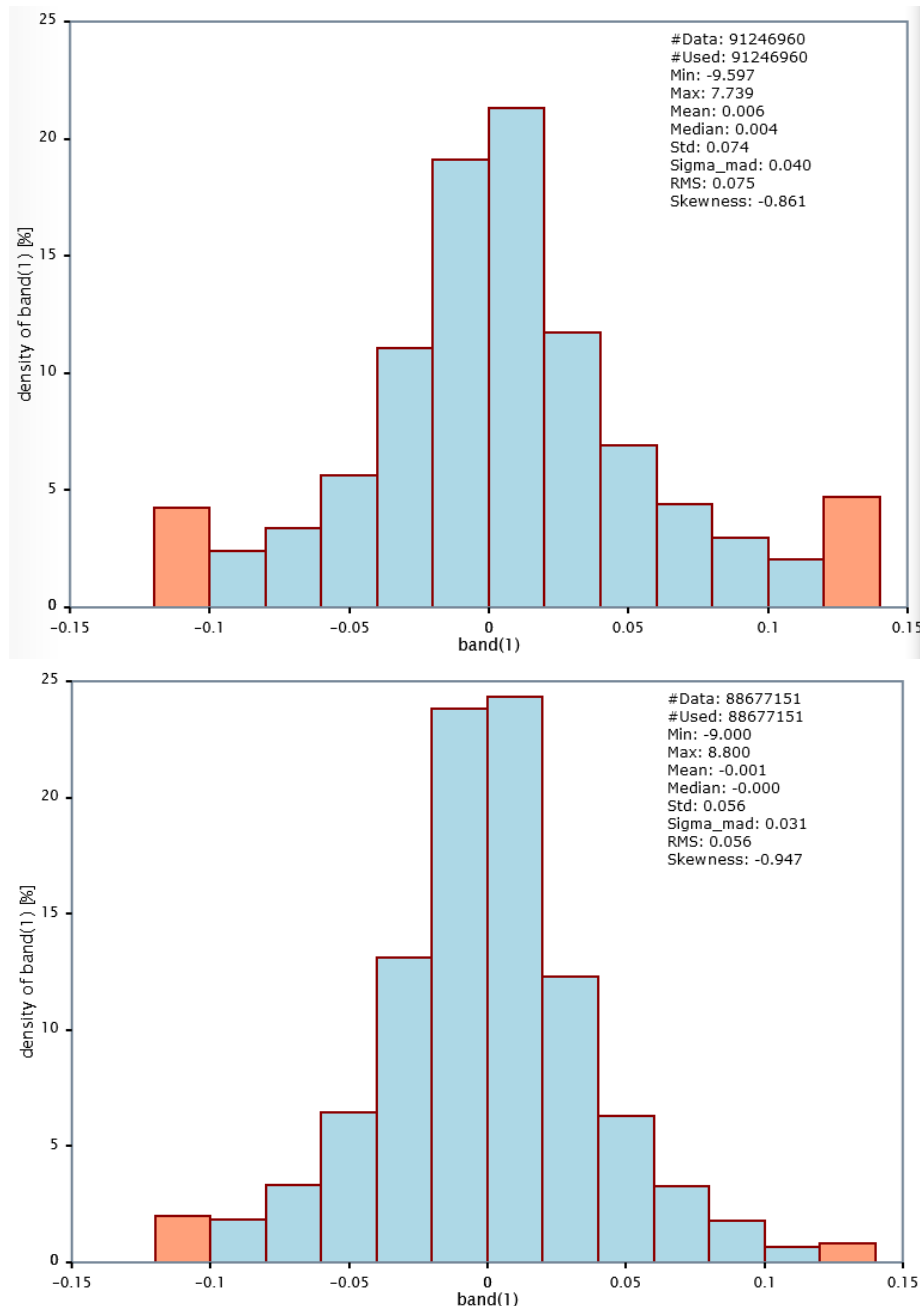


**Abbildung 18** Gesamt-DGM des Zürichsee mit Interpolation von Datenlücken zwischen ALB und Echolot.

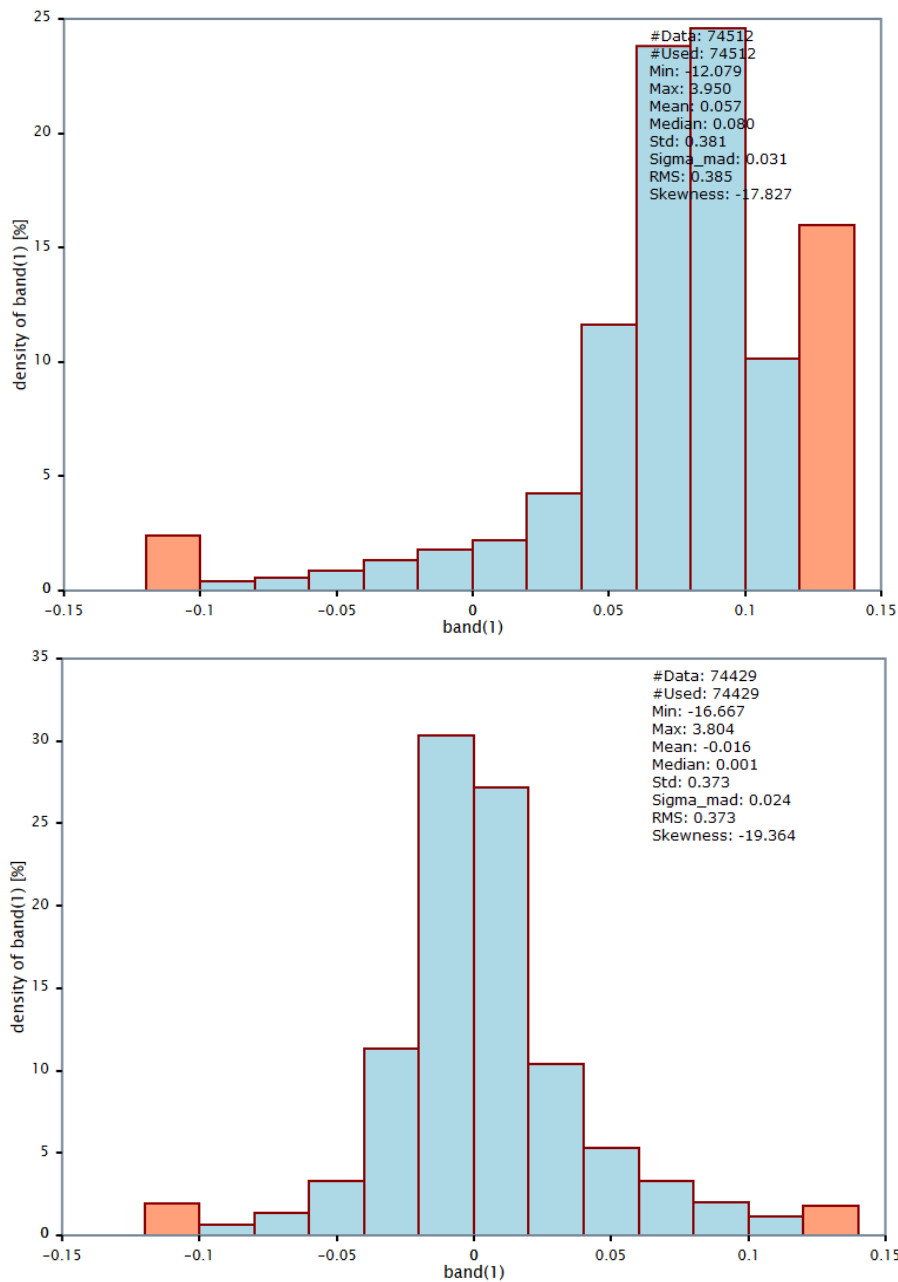
### 2.3.7. Korrekturen

Bei der Auftraggeber-seitigen Überprüfung der zunächst übergebenen klassifizierten ALB-Geländepunkte durch das Büro Meisser Vermessungen AG wurden teilweise Abweichungen  $> \pm 10$  cm im Vergleich zu Kontrolldaten festgestellt. Diese Abweichungen wurden durch eine erneute Berechnung des rigorosen Streifenabgleichs (Abschnitt 2.3.1.) bei Verwendung der klassifizierten ALB-Geländepunkte korrigiert. In den Abbildungen 19 und 20 sind die Ergebnisse dieser Korrektur anhand von zwei Vorher (oben) - Nachher (unten) Vergleichen dargestellt, um die deutliche Verbesserung der Ergebnisse aufzuzeigen. In Abbildung 19 sind die kumulativen

Histogramme aller Streifendifferenzen unter Verwendung der klassifizierten Gelände- und refraktierten Sohlpunkte dargestellt und in Abbildung 20 die kumulativen Histogramme aller Differenzen zwischen klassifizierten Gelände- und refraktierten Sohlpunkten zu den Kontrolldaten für die drei Kontrollbereiche zusammen.



**Abbildung 19** Kumulatives Histogramm aller Streifendifferenzen am Zürichsee vor (oben) und nach (unten) dem erneuten rigorosen Streifenabgleich für die klassifizierten Gelände- und refraktierten Sohlpunkte.



**Abbildung 20** Kumulatives Histogramm aller Differenzen am Zürichsee vor (oben) und nach (unten) dem erneuten rigorosen Streifenabgleich zwischen klassifizierten Gelände- und refraktierten Sohlpunkten im Vergleich zu Kontrolldaten aller drei Kontrollbereiche.

### 3. Literaturverzeichnis

- Aufleger, M., Steinbacher, F., Baran, R. and Woerndl, M., 2013: 'Alpine Airborne Hydromapping'. In: The Ministry of Water Resources, P.R. China and International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (Ed.): *35th IAHR World Congress*. ISBN 978-7-89414-588-8.
- Baran, R., Dobler, W., Steinbacher, F., Ritter, M., Niederwieser, M., Benger, W. and Aufleger, M., 2013: 'Verschneidung von Airborne Hydromapping und Fächerecholotvermessung bei Rheinfeldern'. In: *WasserWirtschaft – Fachzeitschrift für Wasser und Umwelttechnik* 9/2013, P. 18 – 25.
- 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., Benger, W. & Leimer, W. (2019); Die Möglichkeiten der Full Waveform für bathymetrische Airborne LiDAR Daten; Publikationen der DGPF, Band 28, Dreiländertagung der DGPF, der OVG und der SGPF, Wien, Austria, pp.10.
- Dobler, W. et al. (2014): High resolution bathymetric lidar data as base for hydraulic modelling of a mountain stream, *International Conference on Hydroinformatics 2014*, New York, USA. Available at <http://www.proceedings.com/25674.html>
- Hecht, E. & Zajac, A. (2003): *Optics*; Fourth Edition, Pearson Higher Education, ISBN 978-0-321-18878-6.
- Jocham S., Dobler W., Baran R., Aufleger M. & Steinbacher F. (2014) *Einsatz hochgenauer Bathymetriedaten aus luftgestützter Vermessung in der Abfluss- und Habitatmodellierung*. Österreichische Wasser- & Abfallwirtschaft, Vol. 66 Issue, 5-6, S. 206-213.
- 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.
- 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.

- Steinbacher, F., Pfennigbauer, M., Aufleger, M., and Ullrich A., 2010, AirborneHydroMapping – Area wide surveying of shallow water areas. Proc. of 38th ISPRS Congress, ISPRS.
- Steinbacher, F., Baran, R., Dobler, W., Aufleger, M. and Christiansen, L., 2013: 'Combining Novel and Traditional Survey Technologies to Monitor Coastal Environments: Airborne Hydromapping and Sonar Data along the Baltic Sea Coastline, Schleswig-Holstein, Germany'. In: The Ministry of Water Resources, P.R. China and International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (Ed.): *35th IAHR World Congress*. ISBN 978-7-89414-588-8.
- 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.

#### 4. Metainformation gelieferte Datensätze

##### *Klassifizierte ALB-Punkte*

Dateiformat	Laz 1.4
Koordinatensystem	LV95/LN02
Klassenschlüssel	2 = BodenLand 9 = Wasserspiegel 27 = Sohle

Zuerichsee\_2020\_BodenLand\_LV95\_LN02\_korr.laz  
Zuerichsee\_2020\_Sohle\_LV95\_LN02\_korr.laz  
Zuerichsee\_2020\_Wasseroberflaeche\_LV95\_LN02.laz

##### *DGM aus ALB und Echolot*

Dateiformat	EsriGrid
Koordinatensystem	LV95/LN02
Varianten	ohne/mit Interpolation

Zuerichsee\_DGM\_1x1m\_LV95\_LN02\_korr.grd  
Zuerichsee\_DGM\_1x1m\_LV95\_LN02\_korr\_interpoliert.grd

##### *DOM aus ALB*

Dateiformat	EsriGrid
Koordinatensystem	LV95/LN02
Varianten	ohne/mit Interpolation

Zuerichsee\_DOM\_1x1m\_LV95\_LN02.grd  
Zuerichsee\_DOM\_1x1m\_LV95\_LN02\_interpoliert.grd