

# Série de géodonnées *bathymétrie du lac de Bienne*

## Rapport technique

### Informations sur la saisie et le traitement des données

Un nouveau modèle numérique de terrain des fonds lacustres a été réalisé pour le lac de Bienne. Les données de base consistaient en deux jeux de données, soit une mesure par sonar (échosondeur) et une mesure LIDAR (télé-détection par laser). Ces deux jeux de données ont été fusionnés par la suite. À partir des données brutes rectifiées et contrôlées, un raster 1x1m, dont découle la série de géodonnées BATHYBIE, a été généré.

Le relevé par sonar a été réalisé en mars 2015 par des collaborateurs de l'institut de géologie de l'université de Berne à l'aide d'un échosondeur multifaisceaux. Les données LIDAR de la zone littorale ont été prélevées et analysées par l'entreprise Airborne HydroMapping AHM GmbH, Innsbruck. La prise des mesures a été réalisée le 6 janvier 2016 par vol d'avion. Les détails des deux prélèvements de données sont décrits ci-après.

Le regroupement des deux jeux de données a été réalisé par AHM GmbH, avec le soutien de l'université de Berne et de Swisstopo. La direction du projet incombait au Prof. Flavio Anselmetti de l'université de Berne. L'entreprise action-paysage bienne-seeland était responsable de la coordination administrative.



---

### Financement

Les institutions suivantes ont participé aux coûts:

- Office fédéral de l'environnement, OFEV
- Fonds de régénération des eaux du canton de Berne
- Office des eaux et des déchets, OED
- Swisstopo
- Service archéologique du canton de Berne
- Energie Service Biel, ESB
- Association pour le génie biologique

Berne, juillet 2017

## **Bathymetriedaten Bielersee 2015 (Version 1.0.1)**

Diese Notiz dokumentiert den bathymetrischen Datensatz **Bielersee 2015** (Version 1.0.1). Die Daten wurden während einer Messkampagne im März 2015 mit einem Fächerlot von einem Boot aus aufgenommen und decken die Bereiche des Bielersees mit einer Wassertiefe von mehr als 5 m ab. Das verwendete Messsystem besteht aus einem Fächerlot *Kongsberg EM2040* zur Tiefenmessung mit einem Fächer von mehreren hundert fokussierten „Schallstrahlen“ sowie weiteren Sensoren zur Bestimmung von Position und Orientierung der Messplattform sowie der Schallgeschwindigkeiten im Wasser. Die Aufnahme des Seebodens mit einem Fächerlotsystem erfolgt in der Regel anhand von mehr oder weniger parallelen Messstreifen mit Überlappungsbereichen. Der Verlauf der Messstreifen wird üblicherweise hangparallel gewählt, da die Aufnahmebreite bei geringerer Wassertiefe deutlich abnimmt (Abb. 1). Dies erlaubt bei einer Rate von bis zu einigen tausend gemessenen Tiefenpunkten pro Sekunde eine lückenlose Abdeckung des vermessenen Gebiets. Bei der Datenprozessierung wird aus den ermittelten Grössen (Tiefenpunkte: Laufzeit, Winkel; Messplattform: Position, Orientierung; Wassersäule: Schallgeschwindigkeitsmodell) über mehrere Schritte ein bathymetrischer Rasterdatensatz mit einer Zellengrösse von 1 m gewonnen (Abb. 2). Dieser liegt in Landeskoordinaten (LV95) vor und gibt die Höhe des Seebodens im Höhensystem LN02 an. Zusätzlich wurde ein reprojizierter Datensatz in LV03/LN02 erzeugt. Im Folgenden werden wesentliche Informationen zur Messkampagne, zu den Prozessierungsschritten sowie zu den Produkten in Stichworten zusammengefasst.

### **Bathymetrische Aufnahme März 2015**

*Zeitraum der Kampagne:* 04.03.2015 – 27.03.2015 (13 Messtage, 2 Tage Installation/Deinstallation);

*Durchführung:* Quartärgeologie und Paläoklimatologie, Institut für Geologie, Universität Bern; mit Unterstützung durch Zivildienstleistende des Landschaftswerks Biel-Seeland und Mitarbeiter der EPF Lausanne;

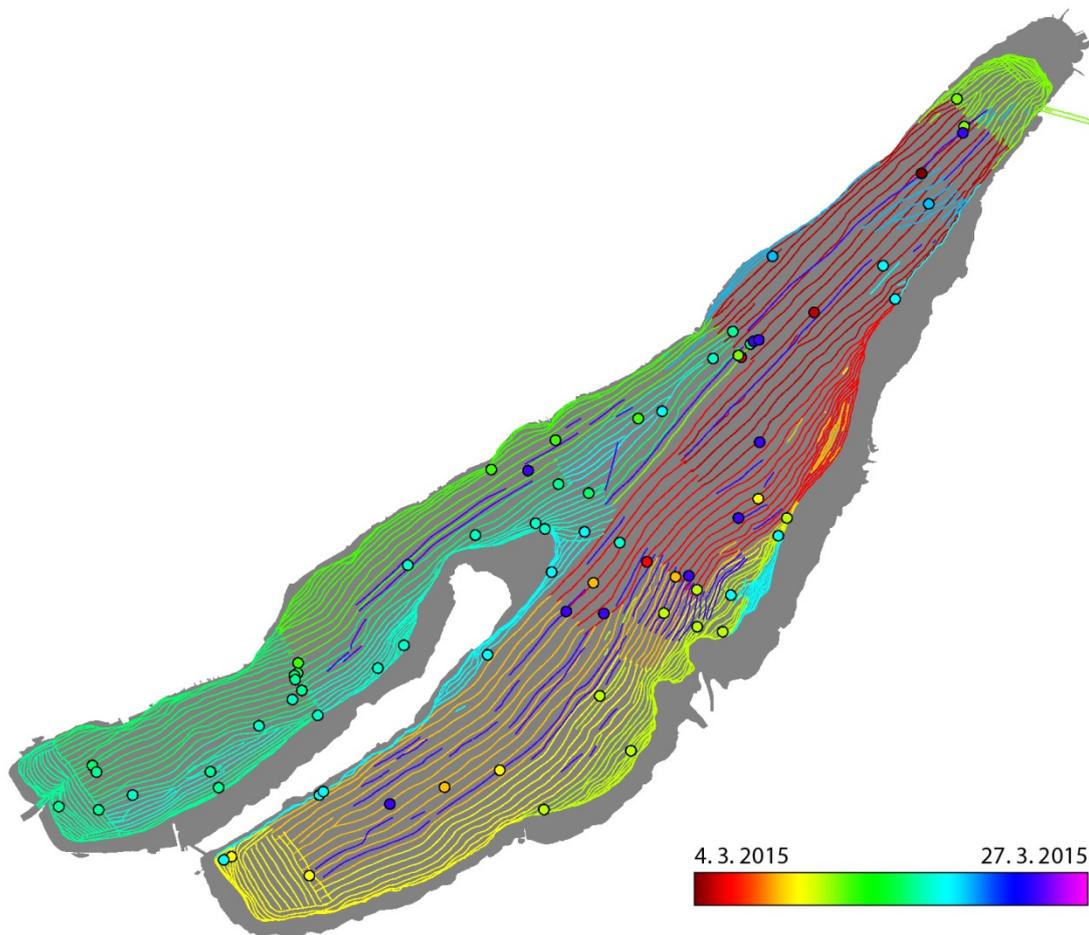
*Messboot:* „Arethuse“ (ETH Zürich), für die Dauer der Messungen im Kleinboothafen Biel stationiert;

*Fächerecholot:* Kongsberg EM2040 (Beamöffnung 1°x1°, Frequenz 300 kHz, 400 Tiefenwerte pro Schallpuls), max. Fächeröffnungswinkel 150° (75° je Seite), Bedienung über Kongsberg SIS;

*Positionierung:* Leica GX 1230+ GNSS mit swipos GIS/GEO (RTK, VRS) in Echtzeit über mobile Internetverbindung, ohne Transformation („LV95-LHN95“), Aufzeichnung Beobachtungsdaten zur Kontrolle/Ergänzung mit swipos PP; PPS-Puls des GNSS-Empfängers zur Zeitsynchronisation der verschiedenen Geräte;

*Orientierung Messboot:* Bewegungssensor (Inertialnavigation) Kongsberg Seatex MRU5+ und GPS-Kompass Trimble SPS361 mit 2 m Antennenabstand;

*Schallgeschwindigkeitssensoren:* Valeport MiniSVS (Wasseroberfläche), Valeport MiniSVP, 500m (Profil).



*Abbildung 1: Gefahrene Linien der Messkampagne März 2015 und Positionen der gemessenen Schallgeschwindigkeitsprofile, Farbe nach Datum der Messung.*

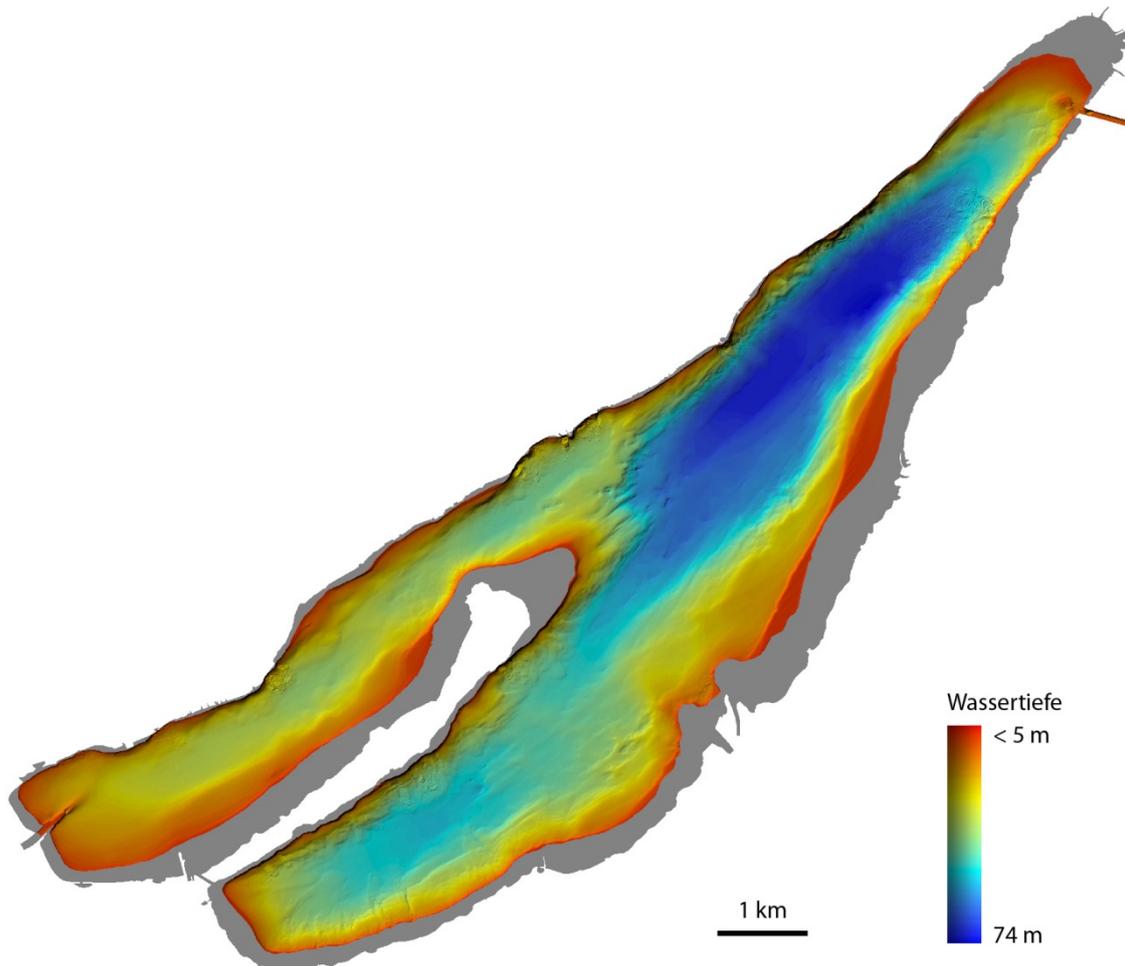


Abbildung 2: Darstellung des Datensatzes als farbiges, schattiertes Relief, graue Bereiche sind Flachwasserzonen, welche nicht vermessen wurden.

Das mobile Fächerlotsystem wurde für die Dauer der Messungen auf dem Forschungsboot „Arethuse“ installiert. Sämtliche Sensoren des Systems inklusive Schallgeber und –empfänger (Transducer) des Echolots befinden sich an einer starren Aufhängung mit fixen, bekannten Relativpositionen (Abb. 3). Zu Beginn und zum Ende der Messkampagne wurden eine Einmessung der Wasserlinie am Boot sowie eine Kalibration mittels „patch test“ zur Feststellung von Winkelverdrehungen der Sensoren vorgenommen. Die Schallgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche wurde während der Aufnahme kontinuierlich gemessen. Vertikale Profile der Schallgeschwindigkeit wurden üblicherweise mehrmals täglich ermittelt, um für die verschiedenen Messgebiete und –perioden ein repräsentatives Geschwindigkeitsmodell zu erhalten (Abb. 1 und 4). Informationen zur Schallgeschwindigkeit wurden bereits während der Datenaufnahme zur Qualitätskontrolle angewendet und bei der späteren Prozessierung optimiert.

In den tiefsten Bereichen des Sees wurde bei guten Verhältnissen ein Fächeröffnungswinkel um 48° je Seite (entsprechend einer Abdeckung von je etwa 80 m zu beiden Seiten) gewählt. In flacherem Wasser wurde der Fächeröffnungswinkel graduell vergrößert (wobei sich die Abdeckung durch die geringeren Wassertiefen verringert). In sehr geringen Wassertiefen um 5 m wurde der Fächer nach Möglichkeit bis zum maximalen Winkel von 75° geöffnet. Bei schlechteren Messbedingungen (z.B. starker Wellengang, Seegrund mit geringer Rückstreuung, starke Variabilität der Schallgeschwindigkeiten) wurde der Öffnungswinkel verringert. Typische Pulsraten sind 5 Hz in tieferen Bereichen und bis zu 20 Hz in sehr flachem Wasser, wobei bis zu 400 Tiefenwerte pro Puls aufgenommen werden. Die Aufnahme der Messstreifen erfolgte bevorzugt blockweise, wobei allerdings versucht wurde, Leerfahrten zu minimieren. Einige Bereiche, bei denen visuelle Kontrollen während der Aufnahme Datenlücken oder Probleme bei der Datenqualität vermuten liessen, wurden am letzten Messtag erneut erfasst (vgl. Abb. 1). Insgesamt wurden in 466 Messlinien mit einer Gesamtlänge von 588 km bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 2.4 Metern pro Sekunde 1.1 Milliarden Tiefenpunkte erfasst. Daneben wurden 75 Schallgeschwindigkeitsprofile aufgezeichnet (Abb. 4).



Abbildung 3: Messboot „Arethuse“ mit installiertem Fächerlotsystem im Kleinboothafen Biel. Wesentliche Komponenten des Systems sind bezeichnet.

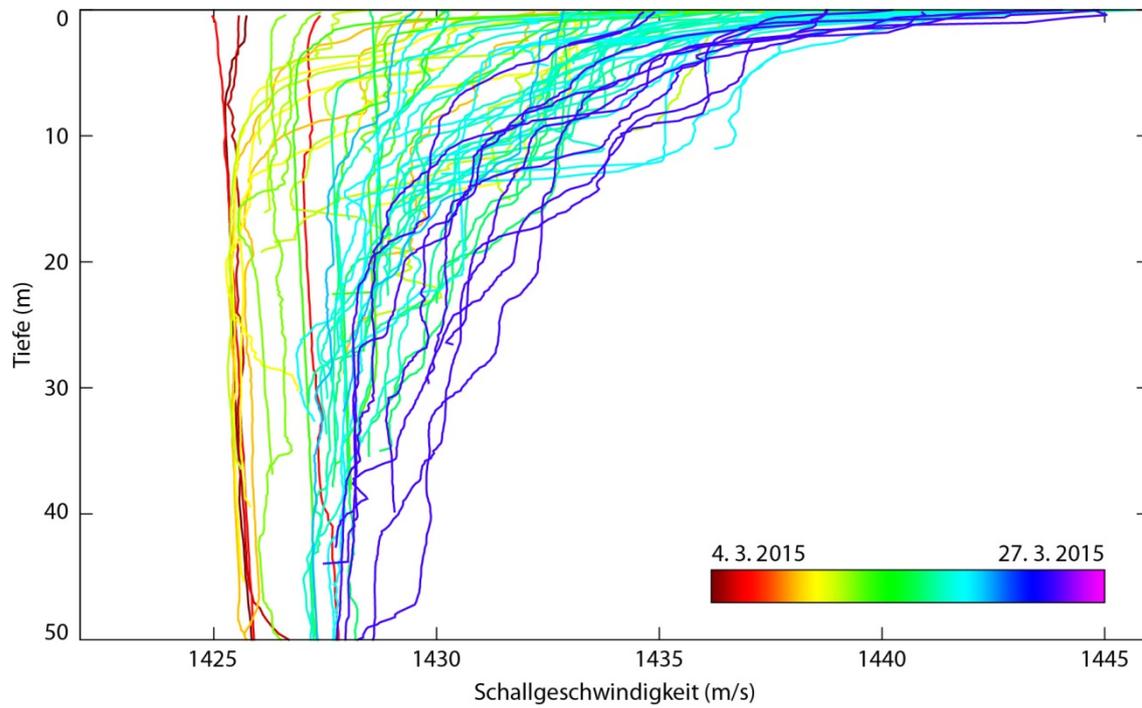


Abbildung 4: Schallgeschwindigkeitsprofile, welche während der Kampagne gemessen wurden (nur oberste 50 m); die Farbgebung nach Datum entspricht jener in Abbildung 1.

### Datenprozessierung

Die Prozessierung (Korrekturen, Berechnungen und Zusammenfügen) der Rohdaten (Sensordaten, für das Echolot z.B. Laufzeiten und Winkel) in ein Tiefenmodell (Rasterdatensatz) erfolgt in mehreren Schritten, von denen die wichtigsten nachfolgend zusammengefasst sind. Ein Teil der Prozessierungsschritte wird bereits während der Aufnahme zur Steuerung und zu einer ersten Qualitätskontrolle automatisiert ausgeführt und im Rahmen der Nachbearbeitung optimiert.

*Software für Prozessierung:* Caris HIPS/SIPS 8.1 und 9.0;

*Korrektur Positionsdaten:* Verwendung von Echtzeitdaten, visuelle Kontrolle, Identifizierung und Interpolation fehlerhafter Positionen; bei Überprüfung mittels postprozessierten Positionen (GNSS-Beobachtungsdaten und Daten der Referenzstation Neuchatel des AGNES-Netzes von swisstopo) wurden keine wesentlichen Differenzen festgestellt;

*Schallgeschwindigkeitskorrektur:* Aus den gemessenen Laufzeiten und Winkeln wird unter Berücksichtigung der Refraktion in horizontal geschichtetem Wasserkörper eine Position der Tiefenpunkte berechnet; die Wahl der passenden Geschwindigkeitsprofile im Rahmen der Prozessierung erfolgt manuell nach Zeitpunkt, Ort sowie Schallgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche und wird in mehreren Iterationen mit anschließender visueller Kontrolle des Resultats optimiert;

*Höhenbezug:* Wasserstandsdaten der Station „Ligerz, Klein Twann“ des Basismessnetzes Oberflächengewässer des BAFU (LH2208) wurden für die Transformation der gemessenen Wassertiefen auf ein Referenzniveau von 429.25 m (LN02; entsprechend dem langjährigen Mittel 1983-2013) verwendet, das Referenzniveau wurde für die Berechnung der LN02-Höhen verwendet; bei diesem Vorgehen wird implizit angenommen, dass die Seeoberfläche in Ruhe zu einem beliebigen Zeitpunkt eine konstante LN02-Höhe aufweist; eine Überprüfung mittels gemessener GNSS-Höhen (Mittel über die gesamte Kampagne) ergibt keinen systematischen Versatz;

*Säuberung Fehldaten:* Anhand von Darstellungen (hauptsächlich Reliefschattierungen von Rasterdaten) wurden Stellen mit Fehldaten identifiziert; mutmasslich fehlerhafte Tiefenpunkte in der Punktwolke (z.B. Echos aus der Wassersäule, unzureichende Bodenerkennung, falsche Schallgeschwindigkeiten) wurden flächenhaft manuell oder mit statistischen Methoden markiert und für die weiteren Schritte verworfen; auf eine vollständige manuelle Säuberung sämtlicher Tiefenpunkte wurde verzichtet;

*Berechnung Rasterdaten:* Aus den verbleibenden Tiefenpunkten wurde unter Berücksichtigung des beschallten Bereichs („footprint“) und mit Gewichtung nach Beamwinkel im Fächer („swath angle surface“ in der Software Caris) ein Rasterdatensatz in Landeskoordinaten (LV95/LN02) mit einer Rasterweite von 1 m berechnet; für einzelne leere Zellen wurde die Tiefeninformation aus direkt benachbarten Zellen interpoliert (max. 2x2 Zellen); eine Glättung oder ähnliche Operationen wurden nicht durchgeführt;

*Bearbeitung Rasterdaten:* Aufgrund vertraglicher Bestimmungen wurden im Rasterdatensatz potentiell sensitive Objekte auf dem Seegrund maskiert, wodurch die Tiefeninformationen in unmittelbarer Umgebung der Objekte geringfügig verändert wurden (um max. 0.8 m); im gleichen Schritt wurde auch eine grössere Lücke (6 m Breite, 70 m Länge) mittels Interpolation geschlossen.

### **Abdeckung, Qualität**

Der resultierende Datensatz umfasst generell das Becken des Bielersees bis zu einer minimalen Wassertiefe von < 5 m (bezogen auf das Referenzniveau). Die Minimaltiefe von 5 m konnte an drei kurzen Uferabschnitten aufgrund des steil abfallenden Ufers oder von Installationen an der Wasseroberfläche nicht ganz erreicht werden; hier erreicht der Datensatz < 7 m. Abbildung 5 zeigt für den Datensatz die erreichten Punktdichten je Rasterzelle, die Standardabweichungen der Tiefenwerte je Zelle sowie die Unsicherheit, welche aus Genauigkeitsangaben der gemessenen Parameter berechnet wird. Typische Punktdichten pro Zelle liegen in grösseren und mittleren Wassertiefen zwischen 5 und 25, während sie im Flachwasser oft deutlich über 100 liegen. Die Standardabweichung der Tiefenwerte in Überlappungsbereichen der Messstreifen in flachen Gebieten ist meist geringer als 0.1 m und nur in wenigen Zonen etwas höher (0.1 – 0.2 m). Ausserdem ist die Standardabweichung naturgemäss an steilen Hängen sowie in morphologisch stark strukturierten Gebieten erhöht, wobei dies hier nicht mit der Datenqualität zusammenhängt. Die berechnete Unsicherheit beträgt im Flachwasser um 0.2 m und erhöht sich in mittleren bis grösseren Wassertiefen auf 0.3 m sowie für einzelne Bereiche mit einer geringen Dichte von Tiefenpunkten, die zudem in den äusseren Fächerbereichen liegen, auf 0.4 m.

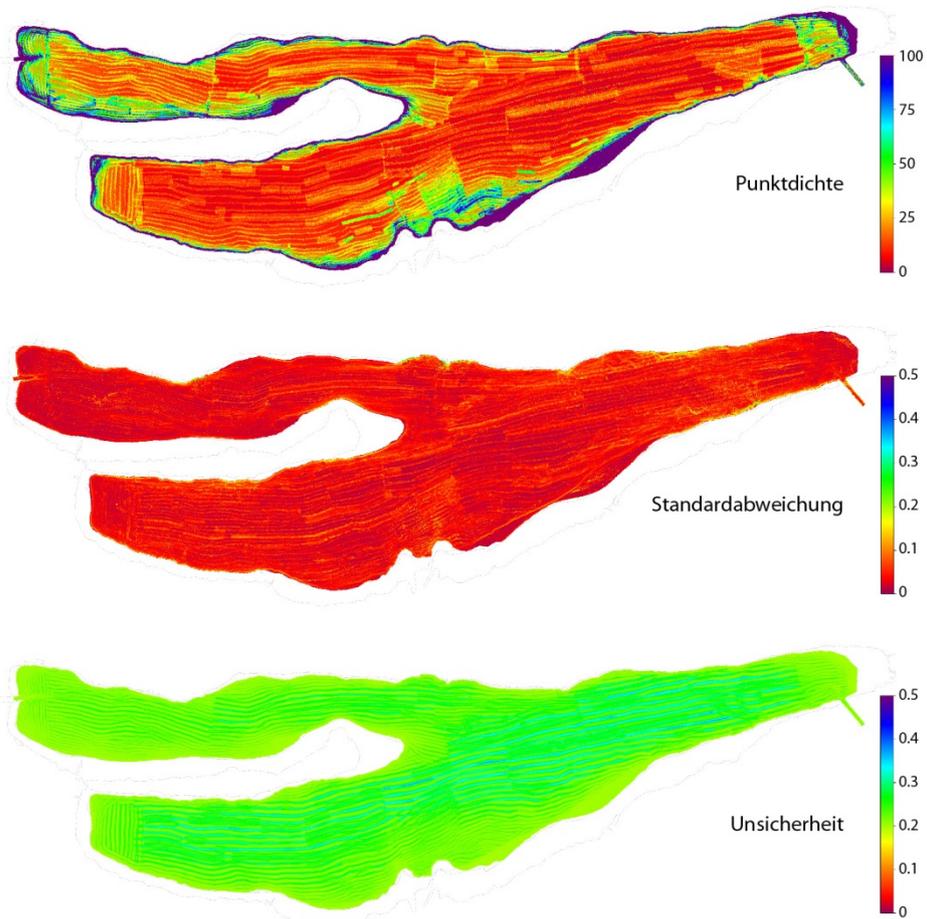


Abbildung 5: Punktdichte, Standardabweichung der Tiefenpunkte in einer Rasterzelle sowie berechnete, theoretische Unsicherheiten der Bathymetriedaten.

Bern, 28.12.2015

Michael Hilbe



Airborne HydroMapping GmbH

Technikerstr. 21a  
A - 6020 Innsbruck  
www.ahm.co.at  
info@ahm.co.at

**Projektleitung:** Frank Steinbacher

**Berichtsautor:** Ramona Baran

**Datenprozessierung:** Ramona Baran  
Torsten Pöhler  
Manfred Niederwieser

Contact Partner:

DI Frank Steinbacher

☎ +43 (0)512 / 507 378 - 00

☎ +43 (0)512 / 507 378 - 99

## Projektbericht: Bieler See – LiDAR–Daten und Digitales Geländemodell in Kombination mit Echolot–Daten

### 1. Zielstellung und Projektgebiet

Für den Bieler See in der Schweiz (Kanton Bern, Swisstopo und Landschaftswerk Biel-Seeland AG) soll ein neues detailliertes Geländemodell (DGM) erstellt werden, das aus zuvor erfassten LiDAR–Daten der Flachwasserzone und Echolotdaten abgeleitet wird. Die Vermessung der Flachwasserzone erfolgt durch AHM mittels topobathymetrischem Laserscanning und die Vermessung der tieferen Bereiche mittels Fächerecholotung (Universität Bern). Der Bieler See liegt im Schweizer Molassebecken ca. 25 km nordwestlich von Bern.

### 2. Topobathymetrisches Laserscanning der Flachwasserzone

Die Vermessung der Flachwasserzonen und der angrenzenden Uferbereiche des Bieler Sees fand am 06. Januar 2016 statt (Abb. 1). Es wurde der topobathymetrische Laserscanner VQ–880G (Riegl LMS, grüner Laser mit 532nm) verwendet, der in einem Flächenflieger integriert ist (Tecnam P2006T). Die Sohle des Sees konnte bis in eine Tiefe von ca. 6–7 m erfasst werden. Der Bieler See wurde mit 35 Scanstreifen erfasst (Abb. 2). Da es mit dem VQ–880G erstmals möglich ist gleichzeitig nach vorn und nach hinten zu scannen, setzt sich ein Scanstreifen jeweils aus 2 Einzelstreifen zusammen. In einem ersten Schritt der Datenprozessierung wird für die Streifen des Bieler Sees eine in sich konsistente Punktwolke erzeugt, d.h. Versätze zwischen einzelnen Scanstreifen werden beim sogenannten Streifenabgleich korrigiert. Die relative Genauigkeit dieses Streifenabgleichs liegt bei ca. 10 cm (gegeben als Standardabweichung).

Bei der Prüfung der ersten Datenlieferung vom Juli 2016 durch Herrn Artuso (Swisstopo; August 2016) wurden lokale Versatzkanten von bis zu ca. 50 cm Höhe festgestellt (Abb. 3). Grund hierfür war, dass die berechnete Flugtrajektorie zeitweilig



CEO: ZT Dipl.-Ing. Frank Steinbacher | Prof. Dr.-Ing. Markus Aufleger

Registernummer: FN 398330f | Court: Landesgericht Innsbruck

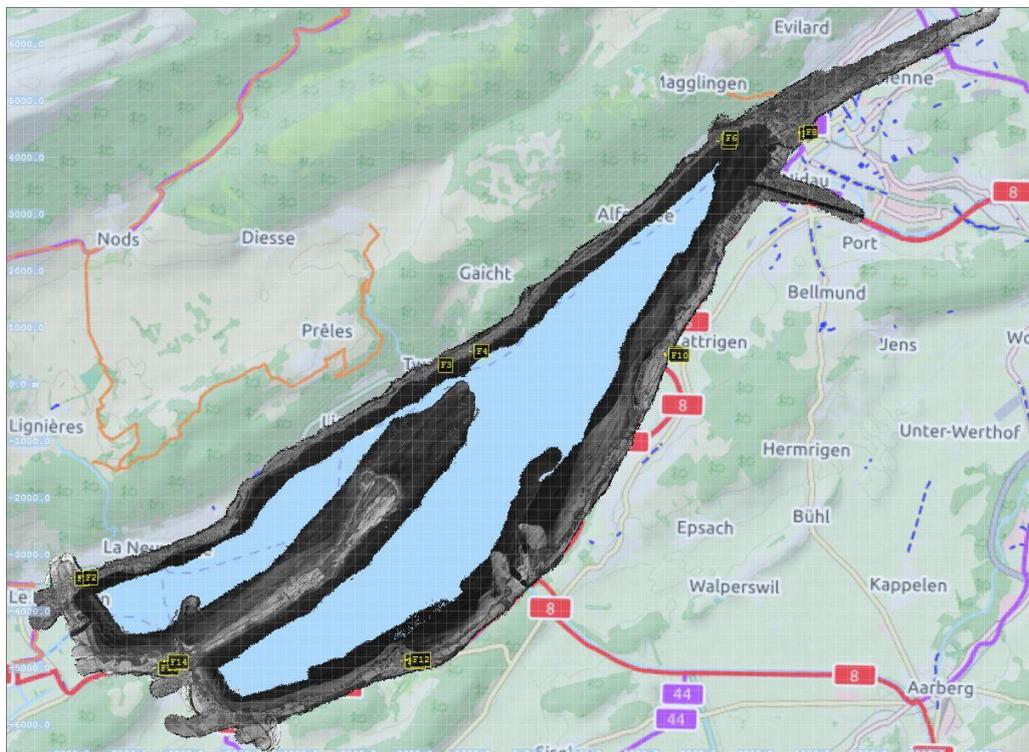
VAT(AT): ATU68023569 | VAT(DE): DE290333295

EasyBank BIC, IBAN: EASYATW1, AT061420020010926590

BankAustria: BIC, IBAN: BKAUATWW, AT881200052736064152

von schlechterer Qualität war trotz der Verwendung von Korrekturdaten von GPS-Basisstationen bei der Berechnung der Trajektorie. Dies führte dazu, dass die Qualität des Streifenabgleichs entlang der festgestellten Kanten deutlich schlechter war. Für die Korrektur dieser Versatzkanten wurden zunächst die klassifizierten Geländepunkte aus den bisher nicht-klassifizierten Punkten nachverdichtet und im Anschluss wurde der Streifenabgleich lokal neu berechnet. Abbildung 4 zeigt hier einen Vorher-Nachher-Vergleich. Die klassifizierten Geländepunkte sind hier nach Standardabweichung eingefärbt und die festgestellten Versatzkanten sind deutlich erkennbar in dieser Darstellung (Abb. 4 oberes und mittleres Bild), wohingegen diese im korrigierten Zustand nicht mehr auftreten (Abb. 4 unteres Bild).

Im Anschluss wurden anhand der LiDAR-Daten Passpunkte definiert (Dachecken und Eckpunkte von Fußgängerüberwegen), die vom Auftraggeber terrestrisch vermessen wurden (Koordinatensystem ETRS89/UTM32N). Die Passpunkte sind rund um den Bieler See verteilt und aus diesen wurden einzelne Passflächen abgeleitet (gelb markiert in Abb. 1). Dann wurden die LiDAR-Daten auf diese Passflächen absolut georeferenziert (absolute Genauigkeit 5 cm gegeben als Standardabweichung).



**Abbildung 1** Topobathymetrische Daten des Bieler Sees. Die Lage der aus den terrestrisch vermessenen Passpunkten abgeleiteten Passflächen ist gelb markiert.

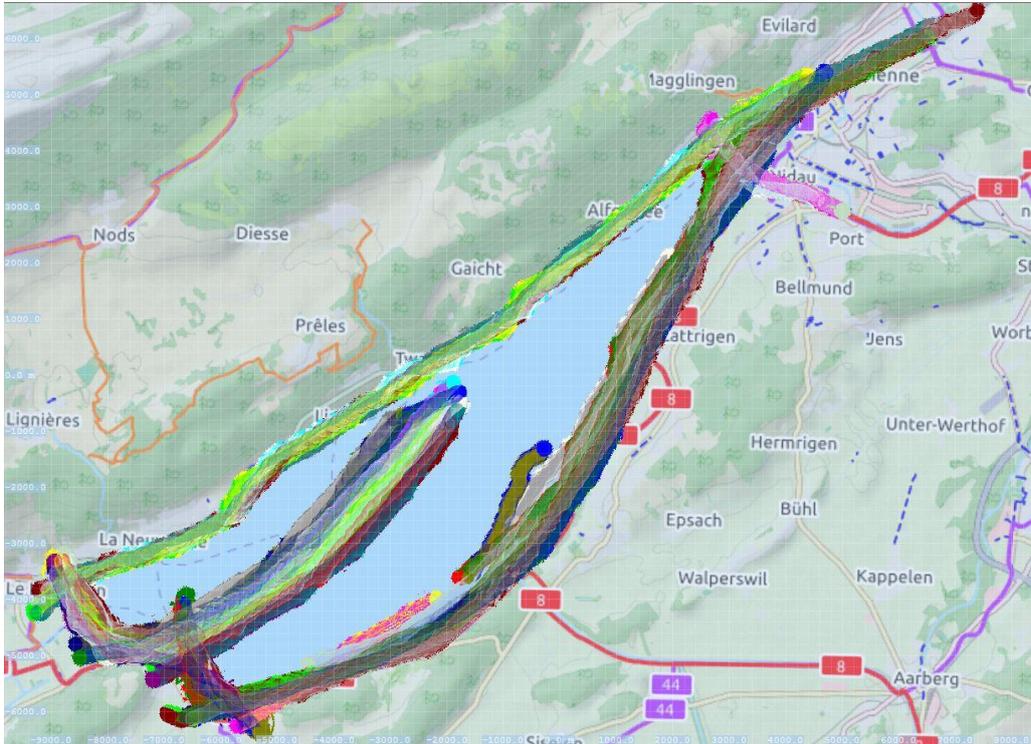


Abbildung 2 Scanstreifen farblich kodiert des Bieler Sees.

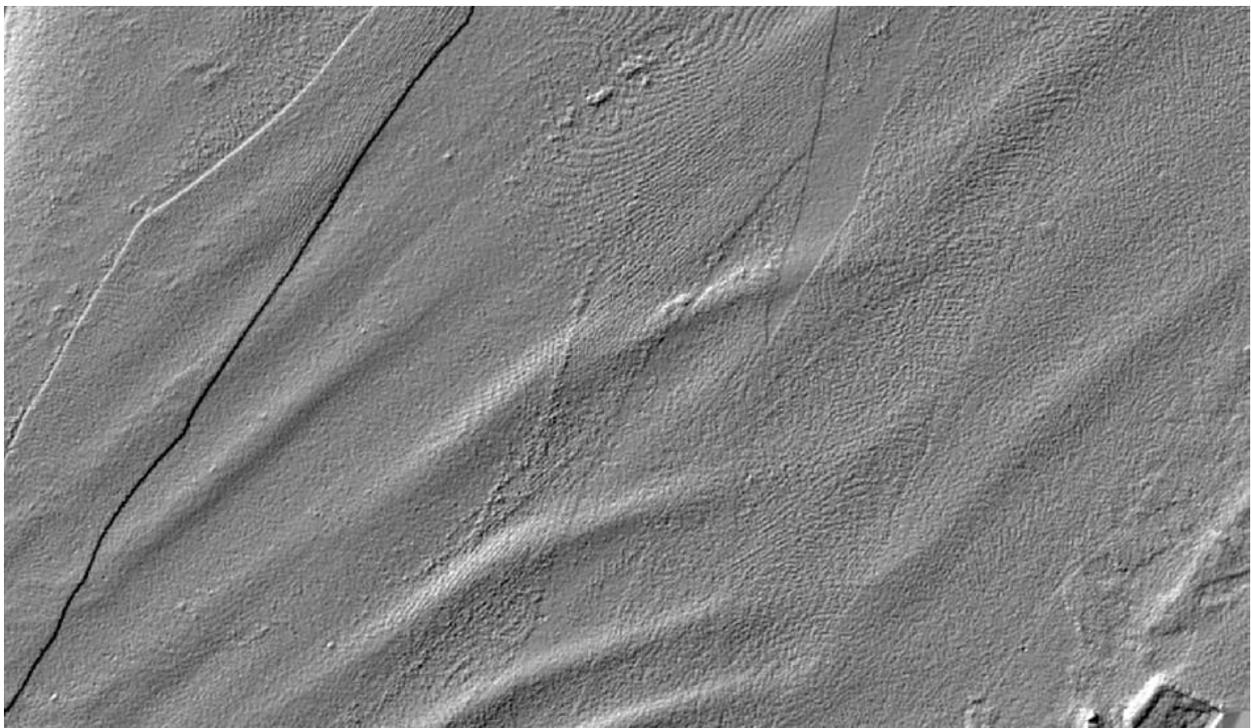
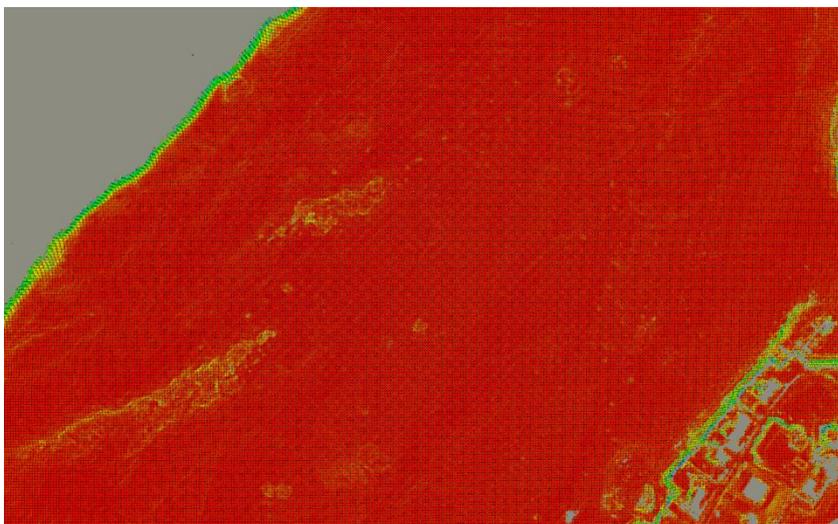
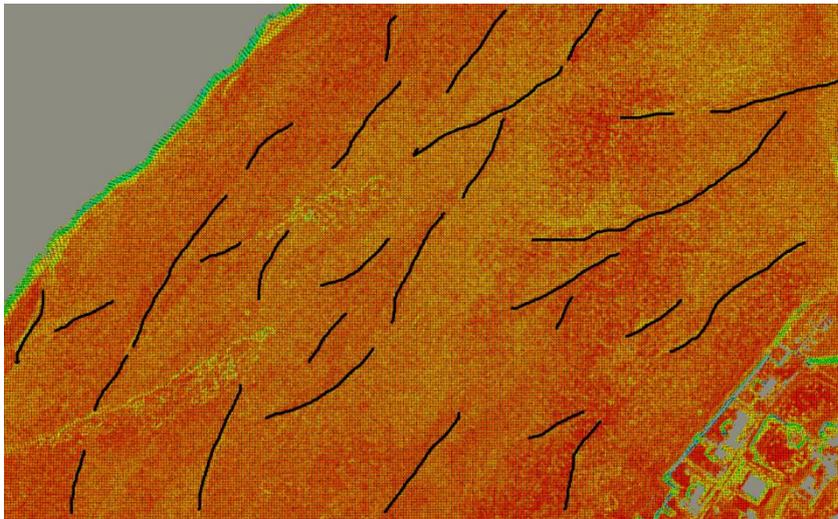
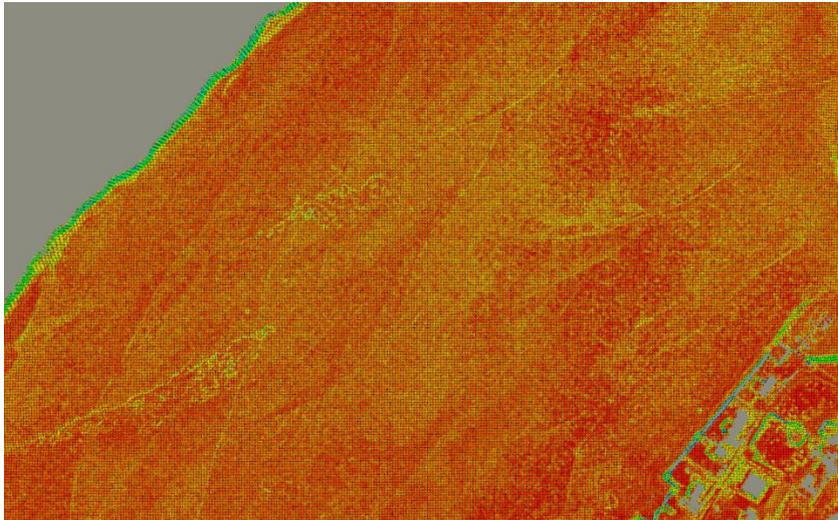


Abbildung 3 Deutlich sichtbare Versatzkanten in DGM-Schummerung basierend auf Datenlieferung vom Juli 2016 (Herr Artuso, Swisstopo, August 2016).



← **Abbildung 4** Klassifizierte Geländepunkte eingefärbt nach Standardabweichung: Rot bedeutet Abweichung ca. 0 m und gelb-orange ca. 0.2–0.25 m. Oberes Bild: Die festgestellten Kanten sind in dieser Darstellung deutlich zu erkennen und im mittleren Bild schwarz markiert. Unteres Bild: Mit der Nachverdichtung der Geländepunkte aus den unklassifizierten Punkten heraus, lassen sich die beobachteten Versatzkanten nach Neuberechnung des Streifenabgleichs korrigieren.

### 3. Klassizierung der LiDAR-Daten, Refraktion und Ableitung DGM

Für die Klassifizierung der LiDAR Punktwolke, Berechnung der Refraktion (Laufzeitkorrektur des Laserlichts für das Medium Wasser) und die Ableitung der finalen DGMs wurde die Software HydroVISH verwendet. Zunächst wird die Punktwolke von Fehlechos bereinigt und anschließend der tiefste Punkt auf ein 1x1 m Raster abgebildet unter der Annahme, dass dies das Gelände über und unter Wasser bestmöglich abbildet. Fehlklassifizierungen in diesem Raster werden manuell korrigiert. Dies ist beispielsweise in Bereichen notwendig, wo die Sohle nicht mehr erfasst wurde, aber der Wasserkörper. Hier müssen Rasterpunkte, die als Gelände/Sohle klassifiziert wurden als Wasserkörper umklassifiziert werden. Das so korrigierte Raster wird als Seed-Information verwendet, um die Klassifizierung auf die Punktwolke zu übertragen und das Ergebnis wird anschließend überprüft. Aus der Klasse Wasserkörper werden quasi die obersten Punkte im 99%-Quantil als Wasseroberfläche klassifiziert.

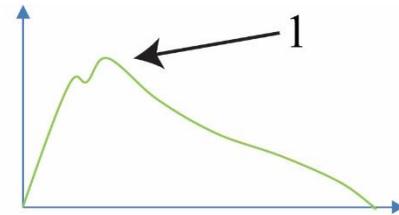
#### 3.1 Wasserspiegel und Wasseroberflächenmodell

Im Rahmen der Punktwolkenklassifizierung wurden alle Punkte klassifiziert, die die Lage des Wasserspiegels zum Zeitpunkt der Vermessung definieren. 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. 5).

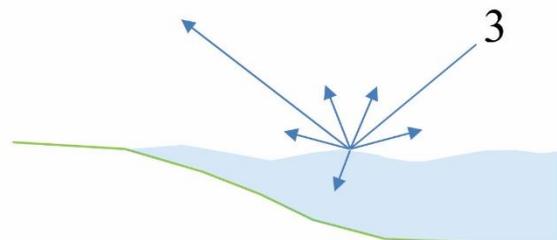
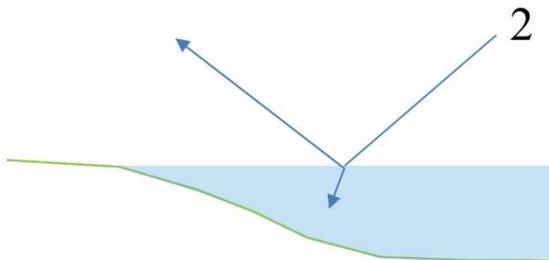
Zum Zeitpunkt der Messungen am Bieler See herrschte geringer Wind, so dass die Wasseroberfläche ruhig und verhältnismäßig glatt erschien. Bei einer Laserfootprintgröße von 0.5 m wird somit ein homogenes Abbild der Wasseroberfläche aus den Messdaten abgeleitet. Die geringe Auslenkung der Wasseroberfläche trug zu einer sehr gleichmäßigen Verteilung der Wasseroberflächenpunkte bei, die für das Wasseroberflächenmodell herangezogen werden (Abb. 6).

Das Wasseroberflächenmodell wird in solchen Fällen für die Refraktionsberechnung in Elementgrößen von 1.5 m bis 5 m Kantenlänge aufgelöst (Abb. 7). 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. 5a). Das Wasseroberflächenmodell wird bis zur Uferlinie ausgedehnt und dort mit dem Geländemodell zur Ermittlung der Wasseranschlagslinie verschnitten.

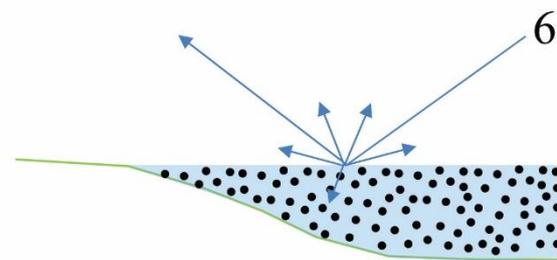
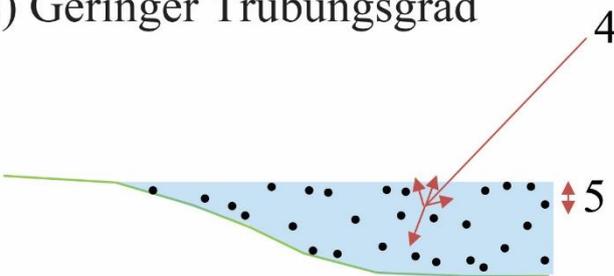
a) Wassertiefe zu gering



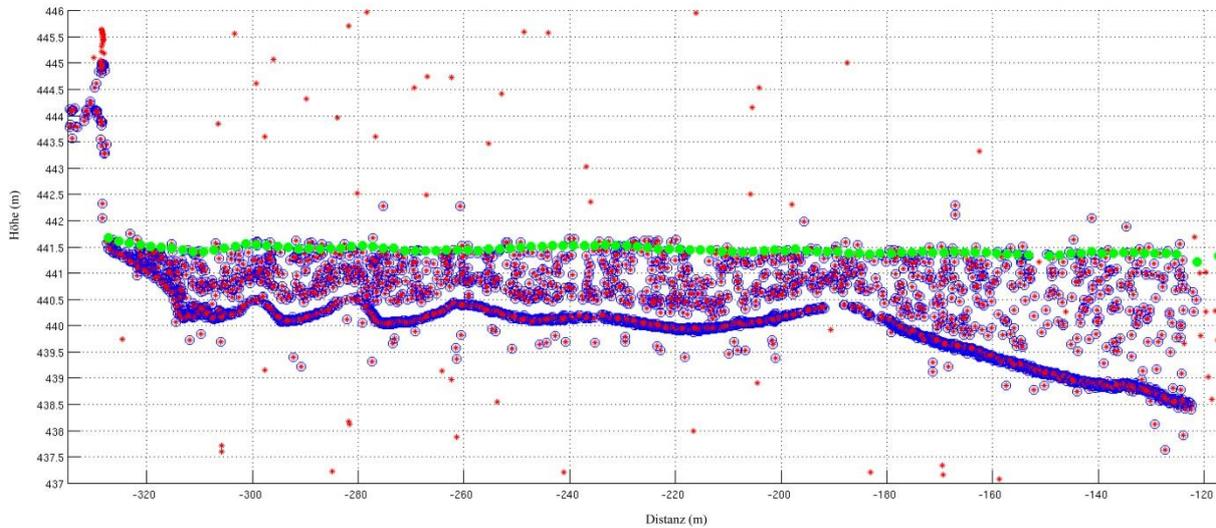
b) Glatte Wasseroberfläche



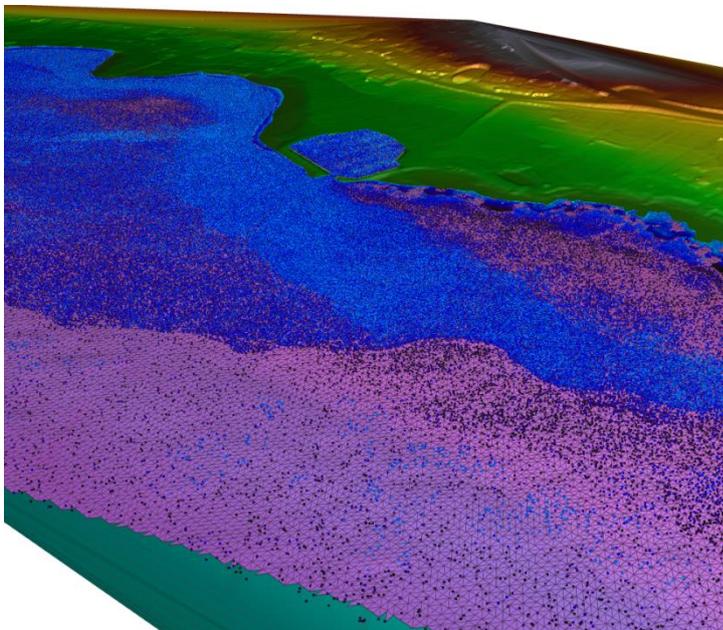
c) Geringer Trübungsgrad



**Abbildung 5** 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 6** Querprofil durch eine unklassifizierte Punktwolke (nur Wasserseite; Messpunkte in rot/blau umrandet und Fehlechos in rot). Die grünen Punkte zeigen die Lage des 99%-Quantils, das auf einem 2x2 m Raster aller als Wasserkörper klassifizierten Punkte berechnet wurde.



**Abbildung 7** Beispielhaftes trianguliertes Wasseroberflächenmodell (magenta), klassifizierte Wasserspiegelpunkte (blau) und digitales Geländemodell (nach Höhe eingefärbt).

### 3.2 Berechnung der Refraktion

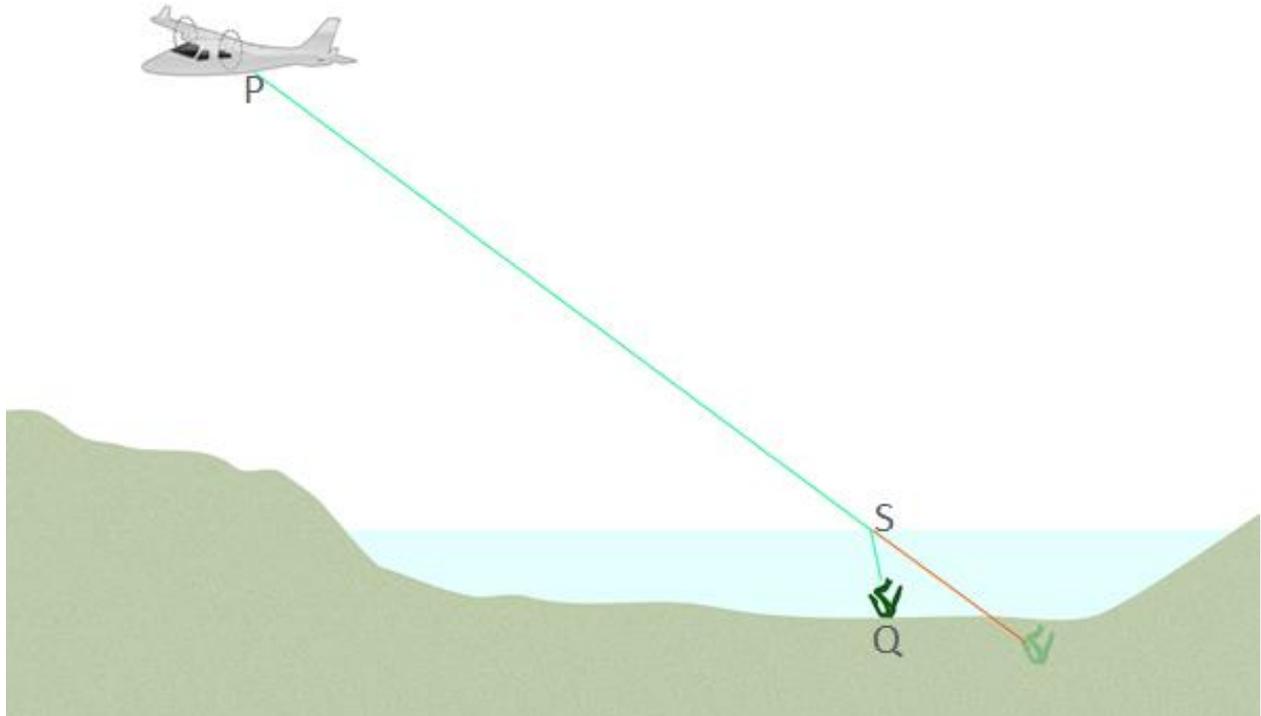
Bei der Refraktion wird für alle Geländepunkte (Sohle), die unterhalb der Wasseroberfläche liegen, die eigentliche Tiefe und Lage berechnet. Als Ausgangsdatensatz wird hierbei die Punktwolke mit dem Zeitstempel für jeden Punkt, das triangulierte Wasseroberflächenmodell und die Flugtrajektorie mit dem Zeitstempel für jeden Punkt benötigt. Prinzipiell wird zunächst ein Punktpaar mit gleichem Zeitstempel – Punkt P aus der Trajektorie und Punkt Q aus der Punktwolke – sowie deren Verbindungsvektor betrachtet (Abb. 8). Daraus wird der Punkt ermittelt, wo der Strahl P–Q die Wasseroberfläche S schneidet (Abb. 8). 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. 8). 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.*

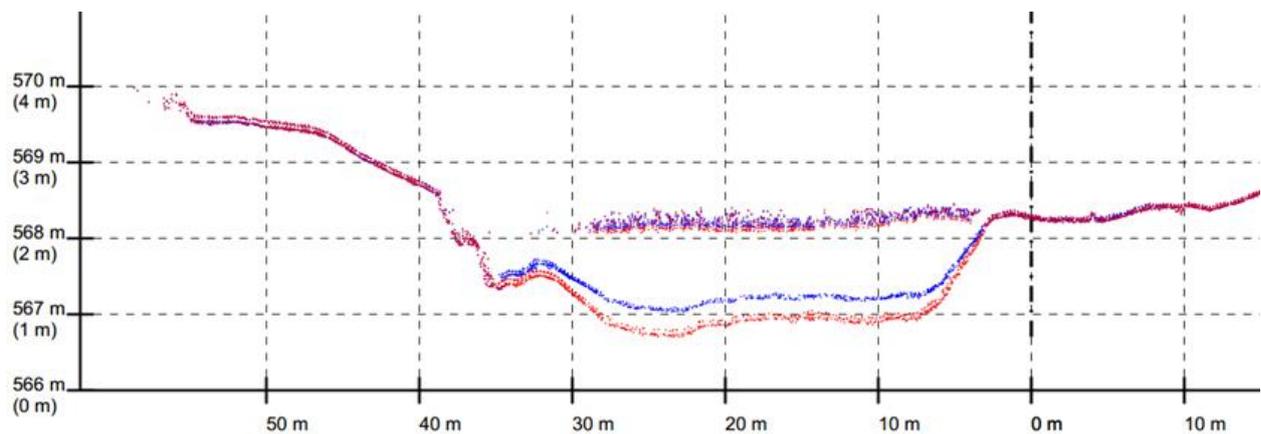
Die Winkelkorrektur wird mit dem Brechungsgesetz nach Snellius berechnet:

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

In Abbildung 9 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. 9).



**Abbildung 8** Schematische Darstellung zur Berechnung der Refraktion (Erläuterungen im Text).

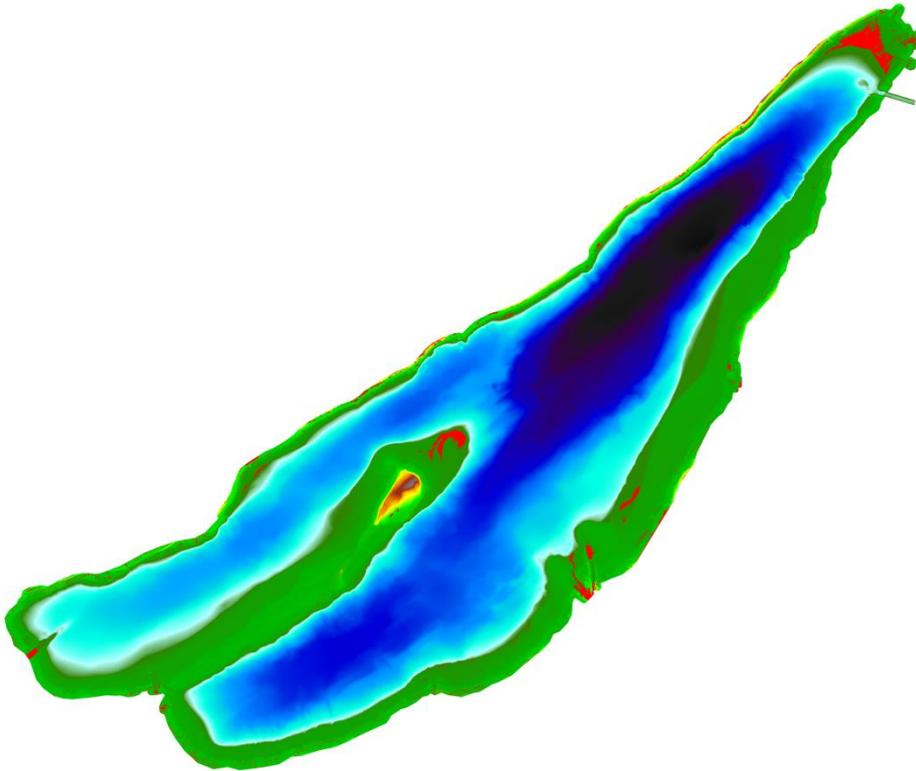


**Abbildung 9** Querschnitt durch eine Punktwolke vor (in rot) und nach (in blau) Berechnung der Refraktion.

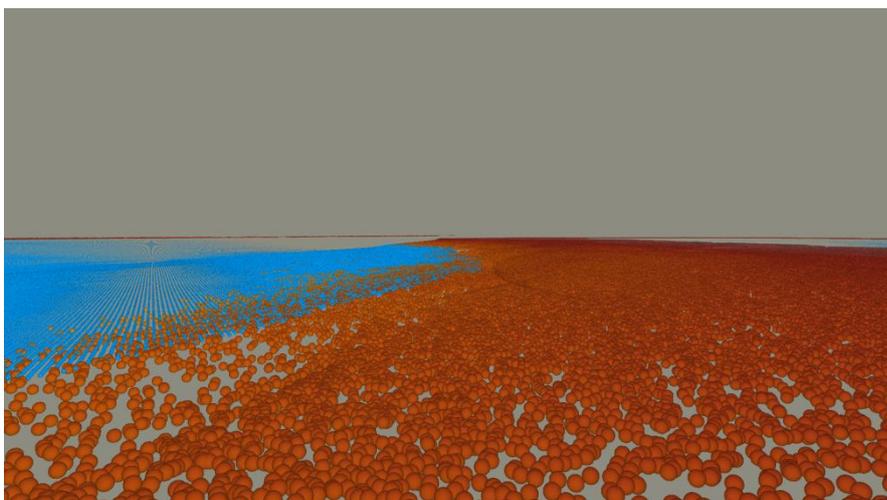
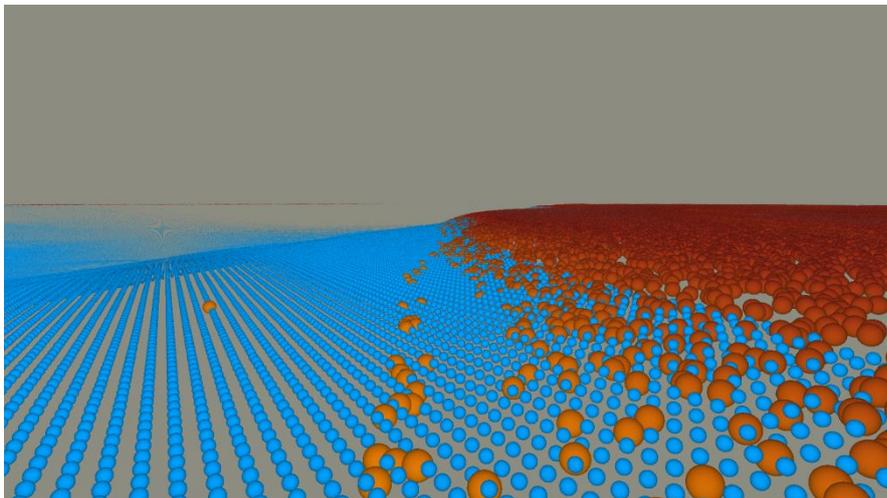
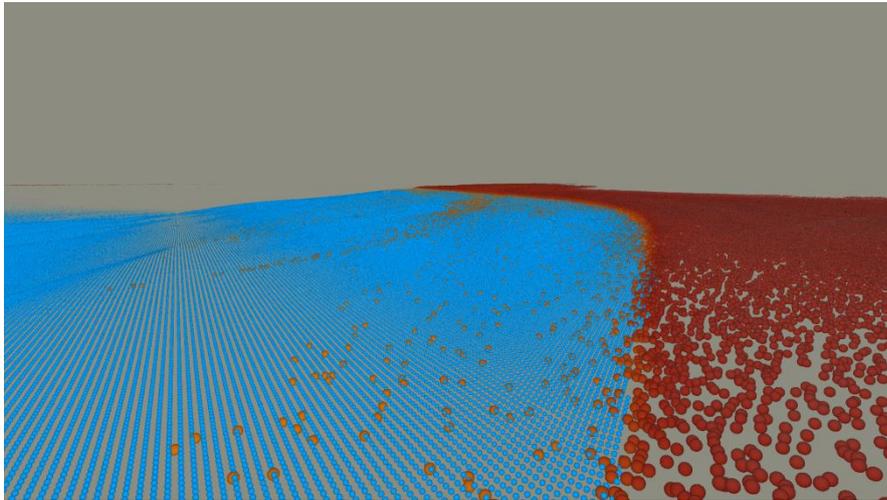
### 3.3 Ableitung DGM

Für den gesamten Bieler See wurde ein 1x1m DGM aus den klassifizierten LiDAR-Geländepunkten und den Echolot-Daten abgeleitet und in den Koordinatensystemen ETRS89/ UTM32N, LV95-LN02 und LV03-LN02 geliefert (Abb. 10). Die Echolot-Daten wurden dafür von den Kollegen der Universität Bern als 1x1m Raster im Koordinatensystem LV95-LN02 zur Verfügung gestellt und mit Reframe nach ETRS89/UTM32N transformiert. Dieses wurde dann mit den klassifizierten LiDAR-Geländepunkten zu einem Datensatz vereinigt und anschließend wurde die mittlere Höhe aller Punkte je Zelle auf ein 1x1 m Raster abgebildet und übergeben. Um für die beiden Schweizer Koordinatensysteme ein jeweils glattes 1x1 m Raster zu liefern, wurde für ETRS89/UTM32N ein 0.25x0.25 m DGM erzeugt, das mit Reframe nach LV95-LN02 und LV03-LN02 transformiert wurde. Aus diesen beiden 0.25x0.25 m DGMs für LV95-LN02 bzw. LV03-LN02 wurde dann ein entsprechendes 1x1m DGM extrahiert und geliefert.

Zuvor wurde die Passgenauigkeit der LiDAR-Geländepunkte (braun in Abb. 11) und der Echolot-Punkte geprüft (blau in Abb. 11). Kleinere Abweichungen der dargestellten Daten sind dem Umstand geschuldet, dass die LiDAR-Punkte einen Horizont aus Geländepunkten von ca. 20 cm Stärke darstellt, während die Echolotdaten ein Raster aus Mittelwerten repräsentieren. Augenscheinlich größere Abweichungen können vor allem an sehr steilen Uferbereichen (z.B. Kanten, Kaimauern und Steilhängen) auftreten. In diesen Bereichen liegen keine bzw. kaum Echolot-Daten für die Übergangszone vor, was zu größeren "Sprüngen" zwischen beiden Datensätzen führen kann.



**Abbildung 10:** DGM Bieler See. Interpolierte Bereiche zwischen LiDAR und Echolot in rot gekennzeichnet.



**Abbildung 11** Visueller Vergleich der klassifizierten LiDAR-Geländepunkte (braun) mit Echolotdaten (blau) bezüglich Passgenauigkeit am Bieler See für verschiedene Stellen.