



# **Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee**

Ein Interreg IV-Forschungsprojekt von 2012 – 2015



## Impressum

Titel Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee · Bericht Nr. 61

Herausgeber Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB),  
Blaue Reihe, Bericht Nr. 61



EUROPÄISCHE UNION

Europäischer Fonds  
für Regionale Entwicklung



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Bearbeitung Institut für Seenforschung (ISF)  
der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz  
Baden-Württemberg (LUBW), Argenweg 50/1, 88085 Langenargen,  
[www.lubw.baden-wuerttemberg.de](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de)  
Tel. 07543/304-0, Fax 07543/304-299, [isf@lubw.bwl.de](mailto:isf@lubw.bwl.de)

Autoren Martin Wessels, Flavio Anselmetti, Ramona Baran, Michael Hilbe, Stefan Gessler,  
Paul Wintersteller

Redaktion Martin Wessels (LUBW)

Layout, Lektorat Lorth Gessler Mittelstaedt GmbH, Konstanz, [www.LGM.info](http://www.LGM.info)  
Irmintraut Hetzenauer, Martin Wessels (LUBW)

Bildnachweis Die Bildrechte sämtlicher Bilder liegen bei der LUBW

Stand Dezember 2016, 1. Auflage

Copyright Der Nachdruck ist – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung  
des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von  
Belegexemplaren gestattet. © IGKB 2016

Internet <http://www.igkb.org>

ISSN 1011-1263 Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee ·  
Bericht Nr. 61



Hochauflösende  
Vermessung  
Bodensee



# **Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee**

Ein Interreg IV-Forschungsprojekt von 2012 – 2015

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Tiefenschärfe – Projektüberblick</b>	<b>10</b>
2.1	Frühere Vermessungen des Bodensees	10
2.2	Motivationen zur Vermessung des Bodensees	13
2.3	Die Projektorganisation	14
<b>3</b>	<b>Aufnahmen mit dem Fächerecholot in tieferem Wasser</b>	<b>17</b>
3.1	Messprinzip Fächerecholot	17
3.1.1	Komponenten eines Fächerlotsystems	18
3.1.2	Einsatz moderner Fächerlotsysteme	19
3.2	Das auf dem Bodensee eingesetzte System	20
3.2.1	Eigenschaften des Kongsberg EM2040 und der Nebensensoren	21
3.2.2	Aufgezeichnete Daten	22
3.3	Durchführung der Vermessungsarbeiten auf dem See	22
3.3.1	Messkampagne Frühling/Sommer 2013	23
3.3.2	Messkampagne Februar 2014	27
3.4	Prozessierung der Fächerecholotdaten	27
3.4.1	Korrektur der Positionsdaten und Höhenbezug	29
3.4.2	Schallgeschwindigkeitskorrektur	31
3.4.3	Bereinigen der Punktwolke, Umgang mit Objekten	33
3.5	Fakten zum Datensatz	34
<b>4</b>	<b>Topobathymetrisches Laserscanning der Flachwasserzone</b>	<b>35</b>
4.1	Die Technologie des Topobathymetrischen Laserscanning	35
4.2	Projektdurchführung	35
4.2.1	Anforderungen der Ausschreibung und notwendige Abweichungen	35
4.2.2	Verwendete Flug- und Messinstrumente	36
4.2.3	Die Befliegung mit dem Laserscanner	37
4.3	Prozessierung der Laserscanning-Daten	38
4.3.1	Trajektorien, Kalibrierung, Streifenabgleich und Georeferenzierung	39
4.3.2	Klassifizierung der Punktwolke	42
4.3.3	Wasserflächenmodell und Refraktion	47
4.3.4	Digitale Geländemodelle und Datenlücken	51
4.4	Luftbilder: Vom Einzelbild zum Orthofotomosaik	52
4.4.1	Aerotriangulation	53
4.4.2	Herstellen von Orthofotos	53
4.4.3	Mosaikierung	54
4.4.4	Interne Qualitätssicherung	54
<b>5</b>	<b>Qualitätssicherung der Vermessung</b>	<b>58</b>
5.1	Rahmenbedingungen für die Qualitätssicherung	58
5.2	Kontrolle der Tiefendaten mit dem Sedimentecholot	59
5.2.1	Auswertung der Sedimentecholotdaten und Vergleich mit dem Fächerecholot	60
5.3	Kontrollmessungen durch Archäologie und Vermessungsverwaltungen	61
5.4	Erfüllung der Qualitätsanforderungen an die Fächerlotmessungen	63
5.4.1	Einmessung und Kalibration des Fächerecholotes	64
5.4.2	GPS-RTK und Tidenkorrektur	65
5.4.3	Korrektur der Schallgeschwindigkeit	65

5.4.4	Manuelles Editieren und Klassifizieren der Punktwolken	66
5.4.5	Kontrolle des Endproduktes und Vergleich mit der Vermessung von 1990	67
5.4.6	Fazit zur Qualität der Vermessung mit dem Fächerecholot	71
5.5	Vorgaben für die Lasermessungen	71
5.5.1	Begleitung der Ausschreibung für das bathymetrische Laserscanning	71
5.5.2	Erfüllen der technischen Rahmenbedingungen lt. Ausschreibung	71
5.5.3	Kontrolle des Endprodukts des topo-bathymetrischen Laserscanning	73
5.5.4	Fazit zur Qualität der Vermessung mit LiDAR	74
5.6	Bewertung der verschnittenen Datensätze	74
5.7	Erfüllen der Vorgaben für Orthofotos	75
5.8	Projektzeitplan	76
<b>6</b>	<b>Verschneiden der Daten und Herstellen der Produkte</b>	<b>77</b>
6.1	Zusammenführen der Echolot- und LiDAR-Daten	77
6.1.1	Datengrundlage, Projektion	77
6.1.2	Verschneiden der Datensätze und Umgang mit Datenlücken	77
6.2	Produkte und Formate, Langzeitarchivierung	79
<b>7</b>	<b>Projektbegleitende Öffentlichkeitsarbeit</b>	<b>81</b>
7.1	Das Erscheinungsbild des Projektes Tiefenschärfe	81
7.2	Die Website	81
7.3	Pressekonferenzen und -mitteilungen	82
7.4	Drucksachen	84
7.5	Projektfilm	84
7.6	Präsentationen in Fachzeitschriften und auf politischer Ebene	85
<b>8</b>	<b>Erste Verwendungen der Daten aus dem Projekt Tiefenschärfe</b>	<b>86</b>
8.1	Projekte mit Daten aus dem Projekt Tiefenschärfe	86
8.1.1	Das Projekt „Seezeichen“	86
8.1.2	Das Projekt „HyMoBioStrategie“	87
8.1.3	Seebodenstrukturen am Schweizer Seeufer	88
8.1.4	Hochauflösende Modellierung des Seerheins und des „Orkopfes“	90
8.1.5	Schiffswracks am Seeboden	91
8.1.6	Megarippel in der Flachwasserzone	91
8.1.7	Methanentgasungen aus dem Seeboden	93
8.1.8	Hangrutschungen	93
8.2	Nutzungen durch die Wasserwirtschaft und andere Interessenten	94
8.3	Beschreibende Daten des Bodensees	95
8.4	Das Projekt Tiefenschärfe	96
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>97</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b>	<b>100</b>
10.1	Spezifikationen der Ausschreibungen	100
10.2	Anforderungen der IHO	103
10.3	Beteiligte Personen und Institutionen	104
<b>11</b>	<b>Liste der vorhandenen „Blauen“ IGKB-Berichte</b>	<b>107</b>

# 1 Zusammenfassung

Nach 1893 und 1990 wurde der Bodensee im Projekt „Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee“ mit modernsten Methoden neu vermessen. Für Wassertiefen tiefer als 5 m wurde ein Fächerecholot verwendet, um einen flächhaften Datensatz der Gewässertiefe herzustellen. Landseitig schloss sich eine Befliegung mit einem topobathymetrischen Laser zur Vermessung der Flachwasserzone und des Ufers an. Die Zielsetzung des Projektes war die Schaffung einer langfristig gültigen, detaillierten Kartengrundlage für vielfältige Aspekte des modernen Gewässerschutzes. Neben den Vertretern der IGKB begleiteten die Vermessungsverwaltungen aus Bayern, Baden-Württemberg, Österreichs und der Schweiz das Projekt und sicherten die hohe Qualität der neuen Vermessung mit ihrer Expertise und Kontrollmessungen.

Insgesamt 21 Wochen war das Forschungsschiff „Kormoran“ des Instituts für Seenforschung (ISF) mit einem Fächerecholot der Forschungsgruppe Quartärgeologie und Paläoklimatologie der Universität Bern unterwegs. Zur Vermessung der Gewässertiefen >5 m wurde ein System der aktuellen Generation (Kongsberg EM2040) mit weiteren Sensoren verwendet. Über 600 Vertikalprofile zur Messung der Schallgeschwindigkeit wurden gemessen und mit neuen Verfahren zur Korrektur des umfangreichen Datensatzes verwendet. Dieser immense Aufwand war notwendig, um der kleinräumigen horizontalen und vertikalen Temperaturentwicklung im See gerecht zu werden. Da ein Modell der natürlichen Geländeoberfläche angefertigt werden sollte, wurden Wracks und Leitungen (vor allem zur Trinkwasserentnahme) aus dem Datensatz entfernt.

Im zweiten Projektabschnitt wurden die Flachwasserzone und das Vorland des Bodensees von der Fa. Airborne Hydro Mapping GmbH (AHM) aus Innsbruck entlang der Ufer mit einem luftgestützten topobathymetrischen grünen Lasers (Riegl VQ820-G) vermessen. Mit dieser neuen Methode konnten topographische und bathymetrische Objekte mit einer hohen räumlichen Auflösung (20-40 Punkte/m<sup>2</sup>) und einer Genauigkeit von wenigen cm an vier Messtagen zwischen

Ende März 2014 und Mitte Juni 2014 erfasst werden. Die Eindringung des Laserstrahls in den Wasserkörper betrug in der Regel 5-7 m. Nach einem Abgleich der Flugstreifen wurden die Laserdaten mit terrestrischen Passpunkten kalibriert. Die ufernahe Punktwolke wurde manuell und die landseitigen Datenpunkte automatisiert klassifiziert. Für alle Messpunkte unterhalb der Wasseroberfläche wurde eine Brechungs- und Laufzeitkorrektur (Refraktion) durchgeführt, um die korrekte Tiefenlage und Position der Punkte zu ermitteln. Zeitgleich mit den Laserdaten wurden hochaufgelöste Luftbilder (Pixelgröße ca. 7 cm) aufgenommen, aus denen in mehreren Schritten Orthophotomosaik abgeleitet wurden.

Im Rahmen der Qualitätssicherung begleitete das Zentrum für Marine Umweltwissenschaften (MARUM) der Universität Bremen mit der Arbeitsgruppe seafloor imaging das Projekt von der Ausschreibung der Fächerlot- und Laser-Vermessung, dem Prozessieren und Nachbearbeiten der Daten bis hin zur Fertigstellung der Produkte. Eigens für die Qualitätskontrolle der LIDAR-Daten haben die Vermessungsverwaltungen über 3.400 Messpunkte mit eigenen Verfahren aufgenommen, dokumentiert und für die Qualitätskontrolle zur Verfügung gestellt. Unter Wasser wurden von Forschungstauchern des Landesamtes für Denkmalpflege in Hemmenhofen über 300 Messwerte meistens entlang von Stegen aufgenommen, um auch im Flachwasserbereich Referenzdaten für die Laserscan-Messungen zu haben. Mit einem montierten Sedimentecholot (Innomar SES-2000 Light) stand zudem ein vom Fächerecholot unabhängiges Messverfahren für die Qualitätskontrolle zur Verfügung. Statistische Methoden und visuelle Kontrollen führten zu wesentlichen Verbesserungen der Produkte. Das finale Verschneiden der beiden Datensätze erfolgte mithilfe spezieller Algorithmen aus der industriellen Hydroakustik.

Das resultierende Tiefenmodell des Sees bietet im Vergleich mit den früheren Aufnahmen einen um Größenordnungen besseren Detailgrad. Neben der plastischen Darstellung der Seegrundmorphologie, welche die geologische Geschichte des Sees und aktuelle Prozesse widerspiegelt,

ermöglichen die Daten eine Dokumentation sehr kleinräumiger Strukturen bis hin zu archäologisch wertvollen Objekten. Zur Erfassung und Bewertung zukünftiger Veränderungen – vor allem an Flussmündungen und in der Flachwasserzone – bietet das Tiefenmodell eine hochwertige Grundlage.

Noch vor Fertigstellung des endgültigen Datensatzes wurden neue Forschungsprojekte gestartet, welche die Tiefenschärfe-Daten intensiv nutzen: Im Projekt „Seezeichen“ wird das Einschichtungsverhalten von Flusswasserfahnen untersucht, ein weiterer Schwerpunkt ist die Untersuchung von Strukturen, die vermutlich von Grundwasserzutritten geschaffen oder begünstigt wurden. Ein anderes Projekt („HyMoBioStrate-

gie“) untersucht die Auswirkungen von anthropogenen Veränderungen auf die Flachwasserzone. Auch hier ist die erstmals mit hoher Auflösung gemessene Bathymetrie der Ufer- und Flachwasserzone von hoher Bedeutung. Daneben wurden die Daten bereits vielfach für konkrete Planungen in der Ufer- und Flachwasserzone aber auch im tieferen Bereich des Bodensees genutzt. Weitere technische und wissenschaftliche Projekte mit einer intensiven Nutzung der Tiefenschärfe-Daten wie die Abbildung des tieferen Untergrundes mit reflexionsseismischen Verfahren, sind für die nähere Zukunft geplant. Das enorme Potential hochauflösender Tiefenvermessungen für einen modernen Gewässerschutz wurde im IGKB-Projekt „Tiefenschärfe“ somit frühzeitig sichtbar.

## Summary

In the tradition of surveys from 1893 and 1990, Lake Constance was now surveyed with latest technologies within the project „Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee“. Water depths deeper than 5 m were measured using a multibeam echosounder to receive a gapless grid as bathymetric data set. In water depths shallower than 5 m, a topobathymetric laser scanner was used to survey the shallow-water area and the shoreline. The primary goal was to provide detailed data covering all aspects of modern water-protection issues for the near future. Representatives of the International Commission for the Protection of Lake Constance (IGKB) and the governmental surveying authorities of Bavaria, Baden-Württemberg, Austria and Switzerland accompanied the project and ensured the high quality of the project with their expertise and independent control measurements.

The research vessel “Kormoran” of the Institute for Lake Research (ISF) was used for 21 weeks with a multibeam echosounder from the research group Quaternary Sciences and Paleoclimatology of the University of Bern. A Kongsberg EM2040 including further sensors was used for water depth >5 m. More than 600 vertical sound-velocity profiles were measured, which required the establishment of new methods for the processing of this huge data set. This was inevitable to consider the small-scale lateral and vertical temperature distribution within the lake. As the primary goal was a natural digital terrain model, wrecks and technical infrastructure (especially of water suppliers) were removed from the data.

In a second step, the shallow-water zone and the shoreline of Lake Constance were surveyed using an airborne topobathymetric green laser (Riegl VQ820-G) through an Innsbruck-based private company (Airborne Hydro Mapping GmbH, AHM). This device mapped topographic and bathymetric objects with high resolution (20-40 data points / m<sup>2</sup>) and an accuracy of few centimeters within four working days between end of March and middle of June 2014. The penetration of the laser beam into the water varied between 5 and 7 m. After initial corrections of the flight

stripes, laser data were calibrated with a high number of terrestrial ground control points. Close to the shoreline, the point cloud was manually classified whereas on land, automatic algorithms classified the data. All values below the water level were corrected for refraction and travel-times to ensure correct depth and positions. Laser-scan data were accompanied by high-resolution aerial images (ca. 7 cm / pixel), which were used to calculate orthofotos.

The working group “seafloor imaging” of the Center for Marine Environmental Sciences (MARUM), located at the University of Bremen, was responsible to ensure the quality of the entire outcome of the project. They accompanied the project from first calls for multibeam echosounding, topobathymetric laserscanning, processing of data to completion of products. To support this, surveying state authorities measured more than 3.400 points with their own procedures, which were then documented and provided for quality assurance. Below the water level, research divers from the state administration for the preservation of ancient monuments in Hemmenhofen measured more than 300 data points along footbridges to provide reference data from the shallow-water zone for the laserscanning data. A sediment echosounder (Innomar SES-2000 Light) was used as an independent system to check the quality of the multibeam data. Statistical procedures and visual inspections strongly helped to improve the products through quality assurance. Final completion of the data sets was done using specific algorithms from standards in commercial hydroacoustics.

Compared with previous data, the resulting depth model of the lake now shows structures, which are an order of magnitude more detailed. Besides a three-dimensional visualization of the lake floor morphology, which documents the geologic history and present-day processes at the lake bottom, the data also document very small-scale structures and objects relevant for archeology. For future registrations and evaluations of changes in the vicinity of rivers and the shallow-water zone, the depth model is a very valuable basis of high quality.

Before finishing the work on the final data sets, they were already intensively used for several research activities: The project "Seezeichen" investigates the intrusion of river water into the lake and structures possibly used or induced by groundwater intrusions into the lake. Another project ("HyMoBioStrategie") investigates anthropogenic changes within the shallow-water zone. Here, high-resolution bathymetry is of specific importance for the understanding of lake-floor processes. Besides these, a number of specific

technical projects are intended using the data from the shoreline, the shallow-water zone and deeper areas. A deep reflection seismic campaign is moreover planned on the basis of the bathymetric grids to image the sedimentary subsurface below the lake floor. Thus, the enormous potential of high-resolution data to support modern water protection policies is already visible at an early stage of the IGKB-project "Tiefenschärfe".

## 2 Tiefenschärfe – Projektüberblick

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für die neue Vermessung des Bodensees im Projekt „Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee“ beschrieben. Hierzu werden zunächst die vorherigen Vermessungen des gesamten Sees rekapituliert, danach die Motivation der IGKB für die neue Vermessung gezeigt. Anschließend wird die Organisation des Gesamtprojektes vorgestellt, und in den Folgekapiteln 3 – 7 mit den Teilberichten näher erläutert. Am Schluss dieses Berichtes werden in Kapitel 8 erste Ergebnisse und Konsequenzen aus der Vermessung und darauf aufbauende Folgeprojekte genannt.

### 2.1 Frühere Vermessungen des Bodensees

Die Geschichte der systematischen Erkundung der Tiefe des Bodensees reicht in das frühe 19. Jahrhundert zurück: schon im Jahr 1825 führte ein Herr Paulus und 1826 „Kommissär“ Johann Gasser im Auftrag des „königlichen statistischen topographischen Bureau“ erste Vermessungen der Tiefe des Sees durch (Abb. 2-1). Die Motivation für Gassers Messungen waren die Überprüfung älterer, deutlich tieferer Tiefenangaben und das „Interesse überhaupt, wel-

ches die nähere Kenntnis von der Tiefe eines so merkwürdigen Kessels hat“ (Gasser, 1826). Mit insgesamt 13 Profilen zwischen den Hauptorten am Bodensee-Obersee wurden mit dem Boot eines Lindauer Kaufmanns 333 Lotungen mit einem Senkblei durchgeführt. Dieses Boot war „nach Art der Dampfschiffe mit einem Räderwerk versehen“ – allerdings mit Muskelkraft betrieben. Die Bathymetrie wurde grob erfasst, und das Volumen und die maximale Tiefe des gesamten Sees abgeschätzt (Gasser, 1826). Die wesentlichen Abmessungen ergaben eine Länge und Breite von 17,5 bzw. 5 „Stunden“ und ein Volumen von ca. 2 Milliarden „Kubikruthen“. Man berechnete, dass der Rhein 2 Jahre und 20 Tage benötigte, um den Seekessel aufzufüllen. An der Mündung des Rheins fand man ein Tal mit steilen Schultern und führte dies auf die Schuttablagerungen des Rheins zurück, der übrige Seegrund sei weitgehend schlammig.

Im weiteren Verlauf des 19. Jahrhunderts wurden Teilgebiete des Sees auch detaillierter aufgenommen. Dabei handelte es sich um Aufnahmen für den innerörtlichen Ausbau und die Nutzung der Ufer und Hafenanlagen und nicht so sehr um eine Beschreibung der tieferen Gebiete. Diese Teilvermessungen des Sees finden

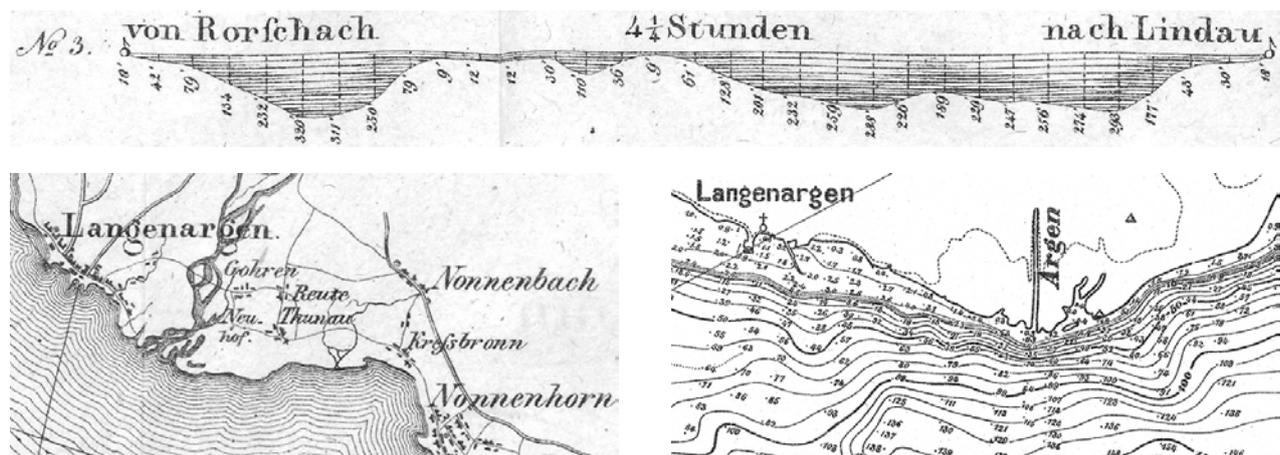


Abb. 2-1: Der Bodensee in alten Kartendarstellungen. Die vom Landeshauptmann Gasser in den Jahren 1825 und 1826 angefertigten Profillinien waren die ersten systematischen Überprüfungen der Tiefe des Bodensees (oben). Die Karte von Gasser gibt landseitig einen guten Eindruck von weitgehend unverbauten Seeufern und zum Beispiel einer weiträumig entwickelten Argen (unten links), auch wenn der Verlauf der Uferlinie nicht überinterpretiert werden sollte. Die Zepelin-Karte (unten rechts) lieferte 1893 einen erstaunlich guten und konsistenten Datensatz der Tiefenverhältnisse im Bodensee (unten rechts). Auch wenn die Ufer nicht sehr detailliert wiedergegeben sind, ist zu erkennen, dass die Argen bereits kanalisiert war. Die dünne gestrichelte Linie zeigt die Hochwasserlinie des Jahres 1876.

sich möglicherweise in kommunalen Archiven und Bauunterlagen, wurden aber nicht gesondert erfasst. Sie wurden aber am Ende des 19. Jahrhunderts zusammengeführt und mit systematischen Einzelmessungen zur heute so genannten Zeppelin-Karte ergänzt, nachdem 1886 ein Beschluss zur Neuvermessung des gesamten Bodensees gefallen war (Hörnlimann, 1893; Zeppelin, 1893). Im Auftrag der „von den fünf Uferstaaten eingesetzten Kommissionen“ wurden 11.147 Lotungen mit einem „Sondirapparat“ (Abb. 2-2) durchgeführt. Diese Vermessung wurde mit vielen Beobachtungen von namhaften Naturwissenschaftlern (z.B. F.A. Forel, A. Penck) verknüpft und vor allem als Grundlage für die beginnende Erforschung des Sees auf vielen wissenschaftlichen Gebieten gesehen. Eine nicht unwesentliche Motivation mag auch die Tatsache gewesen sein, dass einige Dampfschiffe innerhalb weniger Jahre auf Grund liefen

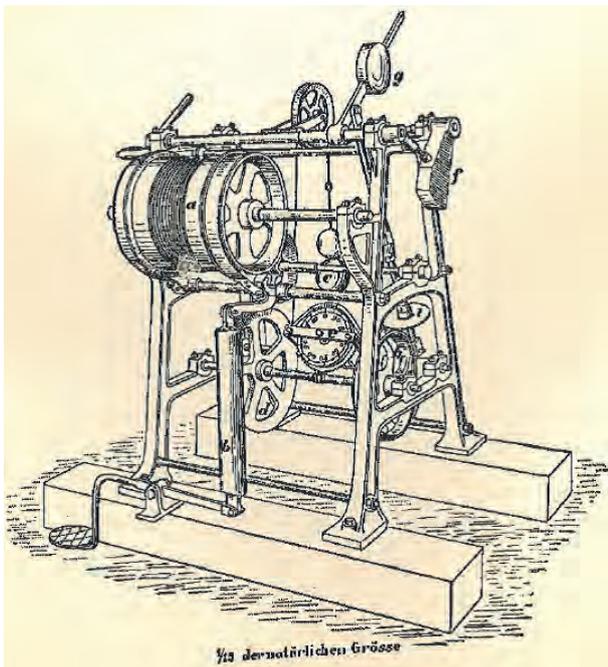


Abb. 2-2: Der „Sondir-Apparat“ der Vermessung aus dem 19. Jahrhundert. Mit einem 0,8 mm dicken Stahldraht wurden insgesamt 11.147 Lotungen im Untersee und Obersee von Ingenieur Hörnlimann unter Verwendung einiger älterer Daten für den topographischen Atlas der Schweiz („Siegfried-Karte“) durchgeführt. Das fertige Produkt war die von Graf Eberhard von Zeppelin veröffentlichte Bodensee-Karte von 1893.

(Zeppelin, 1893). Als Besonderheit ist zu erwähnen, dass die ursprüngliche Karte im Maßstab 1:25.000 mit sämtlichen Messpunkten als Basis für eine dann veröffentlichte Karte 1:50.000 mit einer reduzierten Punktdichte diente. Schon Ende des 19. Jahrhunderts musste man sich offensichtlich mit dem Problem großer Datenmengen auseinandersetzen. Das Resultat der Zeppelinkarte ist für die damals eingesetzte Technik bemerkenswert gut. Sogar kleinere Strukturen wie der Mäander vor Langenargen wurden erkannt, und die Punktdichte reichte aus, den Verlauf des Canyons von der Rheinmündung bis ins Profundal grob zu rekonstruieren (Abb. 2-3). Zudem war man sich der Problematik von Überschwemmungen sehr bewusst – auf der ganzen Karte ist die Hochwasserlinie des Jahres 1876 eingetragen (Abb. 2-1). Aus der Aufnahme von 1893 wurden eine Seefläche von 538,52 km<sup>2</sup> und ein Volumen von 49,369 km<sup>3</sup> berechnet. Das sind Werte, die im Rahmen der Genauigkeit auch heute noch gut verwendbar sind. Die maximale Tiefe betrug 251,8 m unter dem Mittelwasserstand, der mit einer Höhe von 395 m über dem „Berliner Norm.-Null“ angegeben wurde.

Annähernd einhundert Jahre wurde die Zeppelin-Karte bzw. deren Derivate verwendet, bis die IGKB auf ihrer 31. Kommissionstagung im Jahre 1985 beschloss, den See mit modernen Methoden zu vermessen. Nach den Plänen der IGKB sollte ein Echolot verwendet werden, das Schiff sollte mit Funkfeuern geortet werden und die Flachwasserzone (<2 m) mit einer stereoskopischen Auswertung von Orthofotos vermessen werden (IGKB, 1985). Mit diesen Methoden wurden reguläre Messprofile mit einem Abstand von maximal 200 m gefahren und alle 8-10 m die Tiefe gemessen. Angaben zur Berücksichtigung der kleinräumigen Variation der Schallgeschwindigkeit (täglich wurde die Wassertemperatur bis in 50 m Wassertiefe gemessen und eine Temperaturkonstanz in größeren Tiefen angenommen), und eine Kompensation der Schiffsbewegungen wurden nicht durchgeführt. Die Daten wurden mit Computerhilfe gespeichert und weiterverarbeitet. Für die Herstellung der Karte wurden die Profile auf einen Gitterabstand von

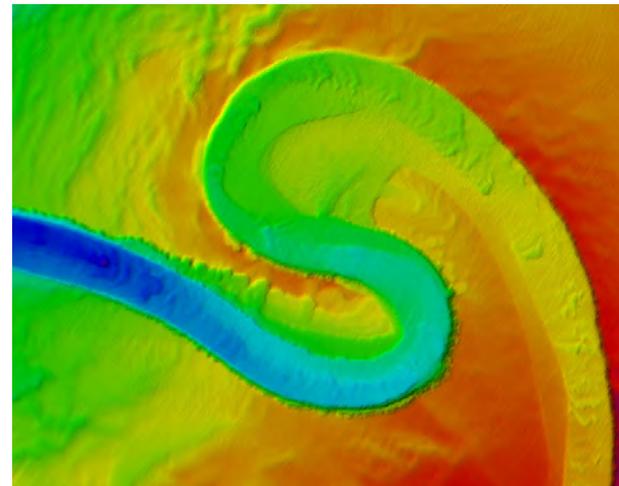
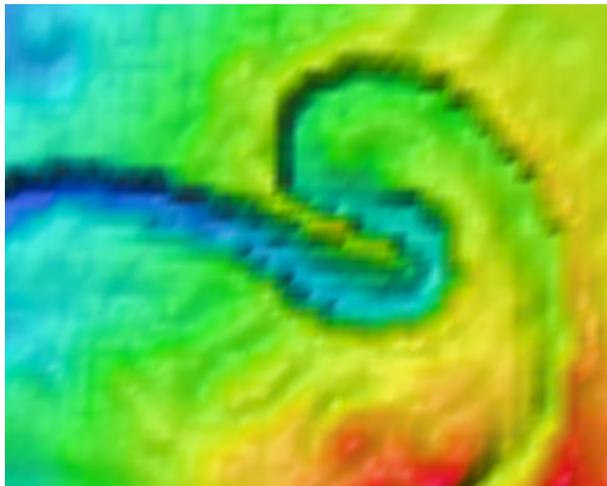
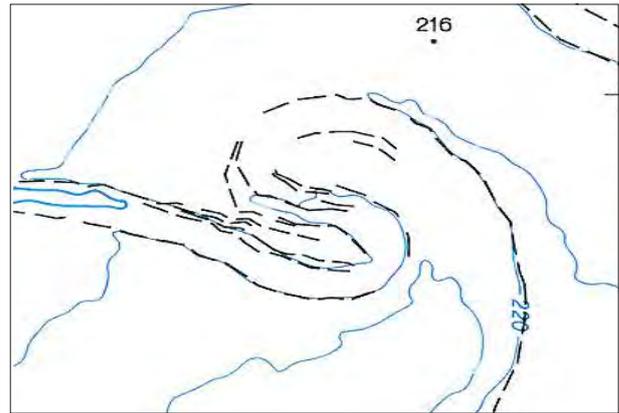
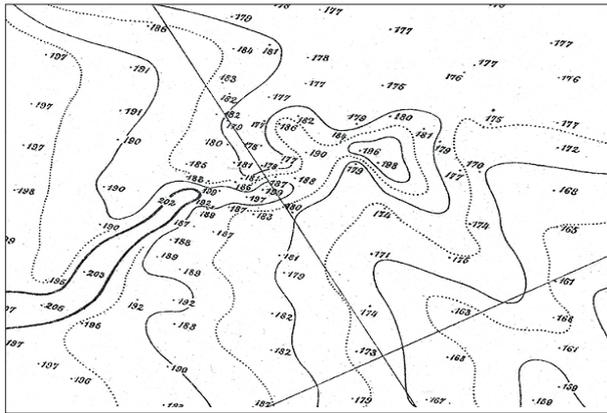


Abb. 2-3: Der Mäander vor Langenargen wurde schon bei den Vermessungen von 1893 als sehr komplexes Objekt erfasst. Zu sehen sind die Tiefenaufnahme mit dem Handlot (Zeppelinkarte von 1893, links oben), das Ergebnis der Aufnahme mit dem Einstrahlecholot (IGKB-Aufnahme von 1990, rechts oben), die Aufnahme von 1990 als geschummerte Tiefenkarte (links unten) und der Mäander in der aktuellen Fächerlotaufnahme von 2015 (rechts unten).

40 m in tiefem Wasser und 10 m in der Flachwasserzone interpoliert. Für die Genauigkeit der Tiefenmessungen wurden bei ebenem Seeboden systematische Fehler zwischen  $0,04 \text{ m} \pm 0,11 \text{ m}$  und  $0,23 \text{ m} \pm 0,14 \text{ m}$  angegeben (Braun & Schärpf, 1994), was angesichts der verwendeten Geräte (Atlas Deso 20 mit 33 und 210 kHz bei  $8^\circ$  bzw.  $9^\circ$  Öffnungswinkel) ein relativ optimistischer Wert zu sein scheint. Zudem wurde eine „Hangneigungskorrektur“ durchgeführt, der die Überlegung zugrunde liegt, dass der Ersteintritt des Echos an einem geneigten Hang nicht von einem Punkt senkrecht unter dem Schiff, sondern von einem hangaufwärts liegenden Punkt stammt.

Bei der Vermessung 1990 wurde ein hoher Aufwand betrieben: auf ca. 3.000 km Fahrtstrecke wurden über 900.000 Datenpunkte gemessen. Wegweisend war schon damals das Herstellen eines dreidimensionalen Geländemodells, das in den Folgejahren für vielfältige Fragestellungen verwendet wurde. Als maximale Tiefe wurden 253,55 m, bezogen auf einen mittleren Wasserstand von 395,45 m angegeben. Schon 1990 wurde die damals neue Karte mit älteren Karten verglichen: Zur Zeppelin-Karte von 1893 fand man eine mittlere Abweichung von etwa 3 m, die allerdings keine Abhängigkeit von der Tiefe oder Hangneigung erkennen ließ. Verglichen mit den Seegrundaufnahmen der Internationalen Rheinregulierung wurde an einzelnen Profilen in der Bregenzer Bucht ebenfalls ein

systematisches Tieferliegen der Vermessung von 1990 um ca. 0,7 m festgestellt (Braun & Schärpf, 1994).

Mit der Entwicklung von Computer-Hardware und -Software, der GPS-Technik sowie der Entwicklung mobiler Fächerecholote am Ende des 20. Jahrhunderts wurden die Möglichkeiten zur detaillierten Kartierung und Visualisierung vervielfacht. Die Vermessung einzelner Gebiete im Bodensee zeigte das enorme Potential der neuen Technik für ein ganz neues Verständnis aller mit dem Seeboden zusammenhängenden Prozesse (IRR, 2009; Wessels et al., 2010).

## 2.2 Motivationen zur Vermessung des Bodensees

Am Bodensee wird seit 1911 die Entwicklung der Rheinmündung in den Bodensee mit wiederkehrenden Vermessungen dokumentiert. Hierbei zeigten sich immer wieder zum Teil deutliche Differenzen zwischen den Seegrundaufnahmen der Rheinbauleitung (im Nahbereich des Alpenrheins) und dem Anschluss an die großräumigen Vermessungen des gesamten Sees (Zeppelin, 1893; IRR, 2009). Zudem wurden in mehreren wissenschaftlichen Projekten Seegrundaufnahmen mit einem Fächerecholot durchgeführt, aus denen hochauflösende Geländemodelle gerechnet wurden und sich das hohe Potential der Technik zeigte (Wessels et al. 2010, 2013). Die Rheinbauleitung regte deshalb bei der IGKB an, nach 1990 den gesamten See mit moderner Technik erneut zu vermessen. Auf der 57. Kommissionstagung der IGKB im Jahre 2011 wurden die Sachverständigen gebeten, Notwendigkeiten, Anwendungsbereiche, Nutzen und Finanzierbarkeit einer Neuvermessung des Bodensees zu prüfen.

Im Folgejahr wurden die Ergebnisse einer international besetzten Arbeitsgruppe von Experten unterschiedlicher Institutionen mit jeweils eigenen Fragestellungen rund um den See präsentiert (s. Tabelle 10.1 im Anhang). Mit ihren Empfehlungen rückte die Vorbereitungsgruppe

fünf wesentliche Zielrichtungen für eine erneute Vermessung des Bodensees in den Vordergrund:

- **Grundlagendaten:** Außer Extremereignissen und den gut untersuchten großen Veränderungen bei der Nährstoffsituation gibt es langfristige Trends bei Wasserständen, die zudem von Klimaänderungen überlagert werden. Beide Prozesse haben direkte Auswirkungen in der Flachwasserzone (etwa die Lage der Schilffronten, Wachstum von Unterwasservegetation), und beeinflussen ihrerseits die Sedimentdynamik und Erosions-/Akkumulationsprozesse in der Flachwasserzone. In tiefem Wasser zeigt die Seebodentopographie vor allem Eintragsprozesse durch Zuflüsse, gibt Hinweise auf Hanginstabilitäten oder kleinräumige Bodenstrukturen. Eine genaue Bodentopographie ist deshalb die Grundlage für eine Vielzahl wissenschaftlicher und wasserwirtschaftlicher Fragestellungen und Nutzer; Geländemodelle mit <1 m horizontaler Auflösung im Flachwasser und 1-2 m in tiefem Wasser eröffnen völlig neue Perspektiven im Vergleich mit den vorhandenen Daten. Genauere Grundlagendaten sollen helfen, viele dieser Prozesse im Sinne eines langfristigen Gewässerschutzes besser zu verstehen.
- **Uferplanungen:** Seeweit wurden in den vergangenen Jahren ca. 36,5 km Ufer mit einem Aufwand von mind. 11,8 Mio. Euro (Stand 2008) renaturiert. Auch zukünftig wird es umfangreiche Aktivitäten zur Renaturierung bzw. naturnahen Ufergestaltung geben. Für die meisten Planungen ist eine genaue Kenntnis der Bodentopographie zwingend notwendig. Mit einer besseren Kenntnis der flächenhaften Geländebeschaffenheit können künftige Planungen besser in die großräumige Ufersituation integriert werden. Auch ist es mit einer neuen Vermessung möglich, den Referenzzustand der Ufertopographie auf eine bessere Grundlage zu stellen, da mit neuer Technik der Übergang Land/See kontinuierlich erfasst werden kann. Absehbar ist zudem, dass zunehmend

Rechenmodelle genutzt werden, um bessere Vorhersagen für das Wellenbild sowie Strömungs-, Erosions- und Sedimentationsprozesse eines umgestalteten Ufers zu machen.

- **Dokumentation:** Die Vermessung mit Fächerecholot und LIDAR bietet eine einzigartige Gelegenheit zur präzisen Dokumentation des aktuellen Zustandes der Flachwasserzone, der präzisen Definition der Lage von Uferböschung, Uferlinie, Uferlänge, Haldenkante und der fischereilich bedeutsamen 25 m Linie. Aus der Verknüpfung von hochauflösenden Orthofotos mit den Höhendaten erhält man eine Referenz, um das Ausmaß von (ungehenmigten bzw. notwendigen) Baggerungen in der Flachwasserzone zu dokumentieren; gleichzeitig werden Einbauten (Stege, Ufermauern, Badehäuschen, etc.) sowohl mit ihrer genauen Lage, Höhe und Dimension optisch erfasst. Vor allem die Wasserwirtschaft und andere Fachbehörden sind auf die genaue Kenntnis genehmigter und nicht genehmigter Anlagen angewiesen.
- **Rechenmodelle:** Für eine Reihe von Fragestellungen in der Flachwasserzone und im tiefen Wasser gibt es komplexe Rechenmodelle, deren Ergebnisse wesentlich von der Verfügbarkeit und Qualität der Eingangsdaten abhängen (z.B. Einschichtung von natürlichen und thermisch veränderten Flusswasserkörpern, Einleitungen von Abwässern und Kühlwasser, Gefährdungsabschätzungen im See oder an Trinkwasserentnahmen, etc.). Sämtliche Planungen und Beurteilungen die sich auf Rechenmodelle stützen, erhalten hierdurch eine wesentlich höhere Sicherheit und Qualität. Heutige Rechenmodelle können zwar noch nicht die hohe Auflösung der Geländemodelle verarbeiten, erwartet werden jedoch künftig Aussagen zu Auswirkungen einzelner Anlagen in der Flachwasserzone.
- **Wissenschaft:** Für eine Reihe von angewandten wissenschaftlichen Fragestellungen, etwa die Stabilität von Hängen, die Bedeutung von Entgasungsstrukturen für den Stoffhaushalt im

Gewässer, das Durchpausen tieferer tektonischer Linien an die Seebodenoberfläche und deren Implikationen für die Beurteilung rezenter tektonischer Vorgänge sind hochauflösende Geländemodelle von zentraler Wichtigkeit. Betroffen hiervon sind auch sehr angewandte Fragestellungen z.B. die Gefährdungsabschätzung von Altlasten, Resuspension in Ufernähe oder Auswirkungen von bodennah in den See einströmendem Flusswasser.

Die Kommission folgte den Empfehlungen der Vorbereitungsgruppe, um einen wesentlichen Beitrag für einen fortschrittlichen Gewässerschutz zu leisten: auf Grundlage jüngster technologischen Neuerungen in der Vermessungstechnik sollte mit einer Kombination aus Fächerecholot (MultiBeamEchoSounder, MBES) und Laserbathymetrie (LiDAR) der Bodensees neu vermessen werden. Zur weiteren Intensivierung des zwischenstaatlichen Austausches wurde im Rahmen eines INTERREG-Projektes eine Ko-Finanzierung beantragt. Der offizielle Projektstart war im November 2012, das offizielle Projektende im September 2015.

### 2.3 Die Projektorganisation

Schon mit der Einberufung einer Vorbereitungsgruppe vor dem offiziellen Beschluss der IGKB eine neue Vermessung durchzuführen, wurden Anstrengungen unternommen, möglichst alle wesentlichen Belange einer hochauflösenden Vermessung zu berücksichtigen. Das Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz, Baden-Württemberg übernahm die Federführung bei der Projektbeantragung. Sämtliche Arbeiten wurden koordiniert und das Forschungsschiff Kormoran als Messplattform zur Verfügung gestellt. Projektpartner waren das Bayerische Landesamt für Umwelt LfU (BY), das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (A) und das Bundesamt für Umwelt BAFU (CH). Die Vermessungsverwaltungen der IGKB-Länder konnten als Projektunterstützer gewonnen werden, um von deren Expertise für die Herstellung

eines so großen und komplexen Kartenprojektes zu profitieren (s. Tabelle im Anhang). Die Vermessungsverwaltungen unterstützen das Projekt mit ihrem know how, der Bereitstellung von Daten und der Durchführung von Kontrollmessungen zur Gewährleistung eines qualitativ hochwertigen Produktes und gewährleisteten so eine hohe Qualität des Datensatzes. Die Vermessungsverwaltungen sind:

- Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung, München (LBDV)
- Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung, Karlsruhe (LGL-BW)
- Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern (swisstopo)
- Bundesamt für Eich- u. Vermessungswesen, Wien (BEV)

Zusätzliche Unterstützung gab es durch das Referat Feuchtbodenarchäologie im Regierungspräsidium Stuttgart mit der Außenstelle in Gaienhofen-Hemmenhofen, das in Absprache mit dem ISF rund um den See Messprofile in der Flachwasserzone aufnahm, um auch unter Wasser unabhängige Kontrollmessungen zur Verfügung zu haben. Die eigentliche Vermessung fand in zwei Teilen statt und wurde von einer externen Qualitätssicherung und einer eigenen Öffentlichkeitsarbeit begleitet:

- Die Universität Bern führte als Auftragnehmer die Echolotvermessung der tieferen Bereiche durch. Als landseitige Abgrenzung wurde die 390 m NN Höhenlinie der Vermessung von 1990 verwendet, da der notwendige Zeitaufwand einer Fächerecholotaufnahme in flachem Wasser immens ansteigt. Das Vorgehen der Vermessung wird in Kapitel 3 näher beschrieben.
- Die Fa. AHM führte in Arbeitsgemeinschaft mit der Fa. Steinbacher Consult das bathymetrische Laserscanning durch. Diese Aufnahmen wurden mit hochauflösenden Orthofotos einer Mittelformatkamera ergänzt (Kapitel 4). Als see-seitige Abgrenzung wurde die 390 m NN Höhenlinie der Vermessung von 1990 verwendet, da Voruntersuchungen Eindringtiefen des Lasers

bis in Wassertiefen von 7-8 m erwarten ließ. Die Technische Universität Wien unterstützte diesen Projektteil wesentlich bei der Formulierung der Ausschreibung, da es kaum nutzbare Erfahrungen für solche Arbeiten gab.

- Die Universität Bremen fungierte für das gesamte Projekt als externe Qualitätskontrolle (Kapitel 5). Begleitend zur Messung mit dem Fächerecholot wurde der Seeboden mit einem parametrischen Sedimentecholot (Innomar light) der Universität Jena aufgenommen. Diese Daten wurden zur Qualitätskontrolle verwendet, da das System eine vom Fächerecholot unabhängige Wassertiefe ermittelt. Sie bieten darüber hinaus einen seeweiten, sehr dichten und wertvollen Datensatz für die Beurteilung des gesamten Sedimentkörpers.
- Die Universität Bremen übernahm ebenso das Verschneiden der Datensätze und das Herstellen der Produkte (Kapitel 6) nach den Vorgaben der Projektleitung.
- Die Firma Lorth Gessler Mittelstädt übernahm die Öffentlichkeitsarbeit für das Projekt (Kapitel 7).

Schon während der Aufnahmen zeigte sich die hohe Qualität und der enorme Informationsgewinn durch die neue Vermessung, und noch vor Abschluss der Arbeiten wurden mehrere wissenschaftliche Projekte begonnen, die Phänomene in größeren Wassertiefen (vermutete Grundwasserzutritte) und in der Flachwasserzone (Erosionsmerkmale) untersuchen und die Daten der Vermessung nutzen (Kapitel 8).

Zusätzlich wurde die Gelegenheit genutzt, um weitere flächenhafte Daten zu gewinnen, die nur mittelbar mit der Vermessung des Sees in Verbindung stehen. Diese Daten werden an anderer Stelle ausgewertet und in diesem Bericht nicht weiter thematisiert.

Während der Echolotfahrten mit dem Forschungsschiff Kormoran wurden durch die ETH Zürich Abstandsmessungen zwischen einer GPS-Antenne und dem Wasserspiegel durchgeführt. Diese Daten kommen indirekt der Seevermessung zugute, da mit ihnen Abweichungen zwi-

schen Geoid und Ellipsoid bestimmt werden. Sie ergänzen schiffsgravimetrische Aufnahmen des Schwerefeldes im Bereich Bodensee, die 2012 durch das Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Leipzig (BKG), das GeoForschungsZentrum, Potsdam, und das Institut für Seenforschung, Langenargen durchgeführt wurden (Schäfer et al., 2012).

Messungen mit einer Mehrkanal-Fluoreszenzsonde („BBE-Sonde“) wurden vorgenommen, um daraus die Horizontalverteilung von Phytoplankton abzuleiten. Diese Daten sollen für ein grundlegendes Verständnis der Repräsentativität von zeitlich und räumlich eingeschränkten Probenahmen verwendet werden.

Bei der Befliegung wurden Videos mit einer hochauflösenden Infrarotkamera aufgenommen, um geringfügige Temperatur-Inhomogenitäten im Gewässer und am Ufer zu dokumentieren. Diese Daten sollen vorrangig verwendet werden, um z.B. Quellaustritte ggfls. auch Einleitungen zu er-

kennen, um sie später für die Ableitung flächen- deckender Mischungsvorgänge in der Flachwasserzone zu verwenden.

Die Projektpartner der IGKB wurden auf den Sitzungen der Sachverständigen und auf den Kommissionstagungen von den Projektfortschritten unterrichtet. Zur Steuerung des Projektes gab es sechs Arbeitstreffen, bei denen wesentliche Zwischenergebnisse diskutiert und das weitere Vorgehen festgelegt wurde. Das schon vor Projektstart erkennbar wichtige Thema der Erkennbarkeit von Trinkwasserentnahmen und ggfls. archäologisch relevanten Schiffswracks in den Geländemodellen wurde mit Vertretern von Seepolizeien, dem Denkmalschutz und den Wasserwerken diskutiert. Auf diesen Treffen kam man überein, dass öffentlich zugängliche Daten nur die Geländeoberfläche (also ohne Bauwerke oder Schifffahrtseinrichtungen) zeigen sollen, da das Ziel der Vermessung die Herstellung eines hochauflösenden Geländemodells war.

### 3 Aufnahmen mit dem Fächerecholot in tieferem Wasser

Der größte Teil des Bodensees – die Gebiete mit Wassertiefen von mehr als fünf Metern – wurde mit dem Forschungsschiff Kormoran mit einem Fächerecholot (auch „Fächerlot“ oder englisch „multibeam echosounder“, abgekürzt „MBES“ genannt) vermessen. Die prinzipielle Funktionsweise eines Fächerecholotes, das auf dem Bodensee eingesetzte System und das Prozessieren der Fächerlotdaten werden in diesem Kapitel erläutert.

#### 3.1 Messprinzip Fächerecholot

Fächerecholote arbeiten prinzipiell wie gewöhnliche Echolote, also mit Laufzeitmessungen akustischer Schallpulse („Pings“), aus denen die Wassertiefe bestimmt wird. Sie unterscheiden sich von einfacheren Geräten dadurch, dass sie statt eines einzigen, mehr oder weniger gut fokussierten „Schallstrahls“ einen ganzen Fächer von meist mehreren hundert eng fokussierten Schallstrahlen aufzeichnen, welcher quer zum Schiff orientiert ist (Abb. 3-1). Bei Fahrt wird damit anstatt einer einzelnen Profillinie ein breiter Streifen des Seebodens erfasst. Die Aufnahme

von nebeneinanderliegenden Streifen ermöglicht eine vollständige Abdeckung des Geländes, es wird also jeder Punkt des Seebodens mindestens einmal durch einen „Schallstrahl“ erfasst. Während beispielsweise die Präzision der maximalen Wassertiefe in morphologisch einfachen Gebieten bei Fächerecholoten ähnlich oder etwas besser ist als bei den früher verwendeten Methoden (Einzellotungen, Echolot), ist die räumliche Auflösung um Größenordnungen besser und so die präzise Erfassung morphologisch komplexer Gebiete überhaupt erst möglich. Abhängig von der Wassertiefe können in einem See wie dem Bodensee bis zu mehrere hunderttausend Tiefenpunkte pro Minute erfasst und Seebodenmerkmale mit Dimensionen von Dezimetern bis wenigen Metern erkannt werden. Dies erlaubt die Ableitung von Geländemodellen mit entsprechend hohen Auflösungen.

Bei den meisten Fächerecholoten besteht die Möglichkeit, neben den Tiefeninformationen auch Daten zur Rückstreuung des akustischen Signals vom Seeboden und aus der Wassersäule (Backscatter) zu bestimmen und damit weitere Informationen über die Beschaffenheit des See-

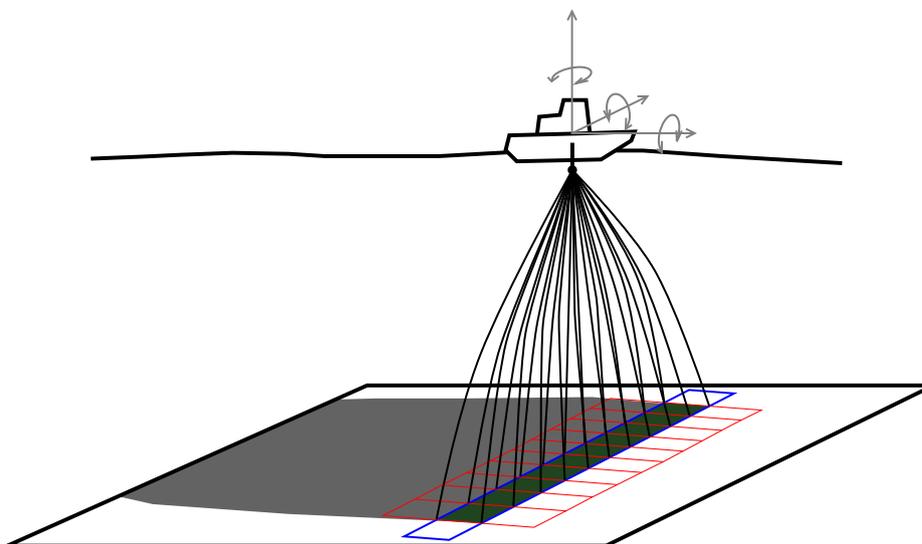


Abb. 3-1: Schema des Messprinzips eines Fächerecholots, welches die Aufnahme eines Messstreifens durch einen quer zur Schiffsachse orientierten Fächer illustriert. Eine vollständige Bedeckung des Seebodens wird durch nebeneinanderliegende bzw. überlappende Streifen erreicht. Zu berücksichtigen sind unter anderem die Position und Orientierung des Messschiffs sowie die durch die gebogenen „Strahlen“ angedeutete Refraktion durch variierende Schallgeschwindigkeit in der Wassersäule.

bodens oder der Wassersäule zu erheben. Daraus lassen sich beispielsweise Informationen über Gasaustritte aus dem Seeboden, Objekte in der Wassersäule und am Seeboden oder auch eine Klassifikation unterschiedlicher Sedimenttypen ableiten.

winkel sowie Azimut, englisch roll, pitch und heading, d.h. Rotationen um Längs-, Quer- bzw. Hochachse) bekannt sein. Diese wird mit einem Inertialnavigationssystem (INS) und einem Kompass erfasst. Ersteres bestimmt zusätzlich den Hub (heave), also die kurzperiodischen vertikalen Auslenkungen des Schiffs von seiner mittleren Position im Wellengang.

### 3.1.1 Komponenten eines Fächerlotsystems

Zusätzlich zu den Schwingern (Sende- und Empfangseinheiten für die akustischen Signale) mit der zugehörigen Elektronik des Fächerecholots, welches im wesentlichen Laufzeiten und Winkel der ausgesendeten und empfangenen Schallpulse bzw. Schallstrahlen misst, benötigt ein komplettes Fächerlotsystem weitere Sensoren, um die einzelnen Tiefenpunkte geographisch zu verorten (Abb. 3-2). Naheliegenderweise ist die genaue Kenntnis der Schiffsposition zentral. Diese wird heutzutage durch präzise Satellitennavigation (GNSS) mit Korrekturdaten für Echtzeitkinematik (RTK) mit einer Genauigkeit von wenigen Zentimetern ermittelt. Zusätzlich muss die Orientierung des Schiffs (Roll- und Stampf-

Da die Messungen üblicherweise in einem näherungsweise horizontal geschichteten Wasserkörper mit variabler Schallgeschwindigkeit (die im Süßwasser hauptsächlich von der Temperatur beeinflusst wird) stattfinden, ist der Verlauf der Schallstrahlen nicht geradlinig, sondern unterliegt – wie beispielsweise die Fortpflanzung von Licht in unterschiedlichen Medien – einer Brechung. Um aus Laufzeiten und Winkeln den tatsächlichen Strahlengang ermitteln zu können, sind genaue Informationen über die Verteilung der Schallgeschwindigkeit in der Wassersäule nötig. Diese wird deshalb üblicherweise in regelmäßigen zeitlichen und räumlichen Abständen mit einer Sonde gemessen, welche zum Seeboden abgelassen wird und vertikale Schallgeschwin-

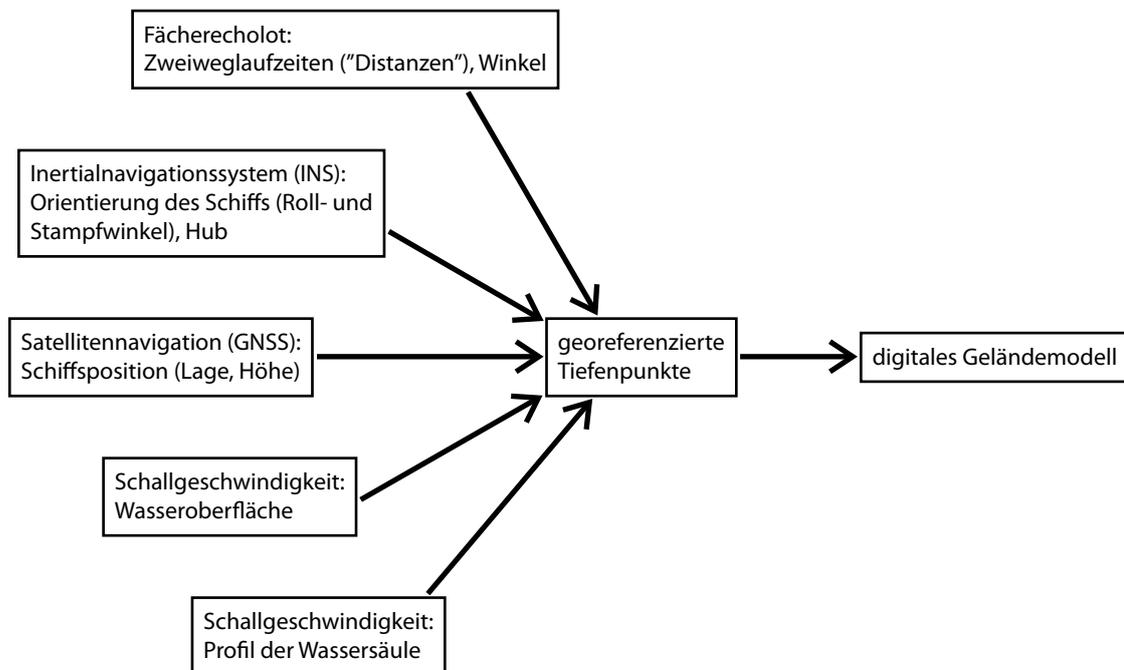


Abb. 3-2: Übliche Sensoren für ein Fächerlot-Vermessungssystem und die benötigten zusätzlichen Informationen. Die Messwerte aller Sensoren erlauben eine direkte Georeferenzierung der Tiefenpunkte, aus denen digitale Geländemodelle erstellt werden können.

digkeitsprofile aufzeichnet. Zusätzlich wird für die Berechnung der einzelnen Schallstrahlen („beamforming“) die Schallgeschwindigkeit an den Schwingern kontinuierlich gemessen.

Mit Hilfe der Informationen dieser Nebensensoren können für die Tiefenpunkte ohne weitere Kenntnisse Koordinaten errechnet werden. Die Georeferenzierung der Tiefendaten erfolgt also direkt und nicht beispielsweise über Passpunkte, was in größerer Wassertiefe ohnehin nicht möglich wäre.

### 3.1.2 Einsatz moderner Fächerlotsysteme

In der Meeresforschung haben sich solche Fächerlotsysteme seit den 1990er-Jahren als Standard etabliert (z.B. Mayer, 2006) und sind mittlerweile sehr weit verbreitet. Trotzdem ist bis heute weltweit nur ein Bruchteil der Meere mit hoher Auflösung vermessen. Einsätze in Binnenseen waren bis vor einigen Jahren weltweit rar (z.B. Gardner et al., 2000), mit der Entwicklung von mobilen und erschwinglichen Systemen hat sich dies aber geändert. In den perialpinen Seen der Schweiz wurden seit 2007 mehrere Seen in einem hauptsächlich durch wissenschaftliches Interesse gesteuerten Programm mit Fächerecholoten oder ähnlichen Technologien vermessen (z.B. Sastre et al., 2010, Hilbe et al., 2011), und auch im Bodensee waren einige Gebiete bereits Ziel von Fächerlotmessungen (Wessels et al., 2010).

Moderne Fächerecholote weisen Mechanismen auf, um die Verteilung der Tiefenpunkte zu vereinheitlichen und damit die Qualität der abgeleiteten Tiefenmodelle zu verbessern. Dazu zählt beispielsweise die Möglichkeit, eine äquidistante Verteilung der Punkte auf dem Seeboden zu erreichen („equidistant“) statt eines definierten Winkels zwischen den einzelnen Strahlen („equiangular“), was zu einer geringeren Punktdichte außen im Fächer führen würde. Die Schallstrahlen sind meist stabilisiert, d.h. Rotationen des Schiffs in den Wellen um die Längsachse oder um mehrere Achsen werden ausgeglichen, so dass die Orientierung der Strahlen konstant bleibt.

Zusätzlich können oft innerhalb gewisser Grenzen die Arbeitsfrequenz und die Eigenschaften der akustischen Pulse verändert und damit Auflösung bzw. die Reichweite der Fächerecholote optimiert werden, oder es ist möglich, mehrere akustische Pulse unterschiedlicher Frequenz in der Wassersäule zu haben, um damit die Punktdichte zu erhöhen.

Nach den Seevermessungen mit Einzellotungen (Punkte) und den Profilmessungen mit (Einstrahl-) Echoloten sind die Vermessungen mit Fächerecholoten – zumal in der hier realisierten Verbindung mit luftgestützter topobathymetrischer Vermessung – die dritte Iteration von Tiefenmessungen, die gegenüber den vorherigen erstmals eine vollständige, flächige Erfassung des Seebodens ermöglicht und um mehr als eine Größenordnung verbesserte Auflösungen liefert.

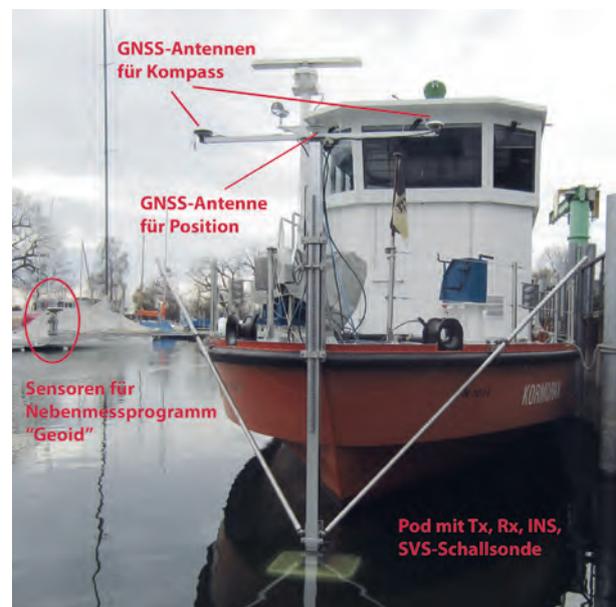


Abb. 3-3: Bughalterung für das EM2040 auf der Kormoran mit eingetauchtem „Pod“ (mit Schwingern, INS und Schallsensor) und GNSS-Antennenträger (mit zentraler Antenne für Position und außen liegenden Antennen für den GNSS-Kompass). Die weitere GNSS-Antenne auf einem Ausleger (links im Bild) diente zusammen mit einem akustischen Entfernungssensor für die Bestimmung eines Geoidmodells im Rahmen eines Nebenmessprogramms der ETH Zürich.

### 3.2 Das auf dem Bodensee eingesetzte System

Für das Projekt „Tiefenschärfe“ wurde ein mobiles Flachwasser-Fächerecholot der aktuellen Generation eingesetzt, welches temporär auf dem Forschungsschiff „Kormoran“ des Instituts für Seenforschung in Langenargen (ISF) installiert wurde. Das Gerät vom Typ Kongsberg EM2040, welches von mehreren Forschungsinstitutionen in der Schweiz eingesetzt wird und an der Universität Bern stationiert ist, eignet sich für Aufnahmen bis in eine Wassertiefe von einigen hundert Metern und kann auf verschiedenen Wasserfahrzeugen installiert werden. Für die Kormoran wurde im Auftrag des ISF durch die Firma Greissing Metallbau (Langenargen) eine passende Bugaufhängung mit einer ca. 4 Meter hohen, vertikalen Stange angefertigt (Abb. 3-3). An dieser wurden zwei vorhandene, vormontierte Teile der Außeninstallation befestigt: Ein im Wasser eingetauchtes „Pod“ mit den beiden Schwingern (Transmitter Tx und Receiver Rx), dem Inertialnavigationssystem

und dem Sensor für die kontinuierliche Messung der Schallgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche (SVS), sowie am oberen Ende ein Träger für die GNSS-Antennen für die Positionierung (in der Mitte) und für den GNSS-Kompass (an beiden Enden; Abb. 3-3). Die wichtigsten Sensoren des Fächerlotsystems (Tab. 3-1) sind somit an dieser Aufhängung als starre Einheit zusammengefasst. Diese Konstruktion hat den Vorteil, dass die relativen Positionen der Sensoren bekannt sind und nicht bei jeder Installation neu bestimmt werden müssen. Bei der Installation auf der Kormoran mussten nur für die Positionen der Antennenbefestigungen auf dem Träger relativ zum Pod bestimmt werden. Dies wurde beim ersten Einbau des Systems mit der neu angefertigten Bugaufhängung durch das Vermessungsbüro Miller & Würth (Friedrichshafen) mit einem Tachymeter durchgeführt. Um die Aufhängung jeweils für geringe Wassertiefen oder für hohen Wellengang zu optimieren, sind mehrere Positionen des Pods mit unterschiedlichen Eintauchtiefen wählbar (Tab. 3-2).

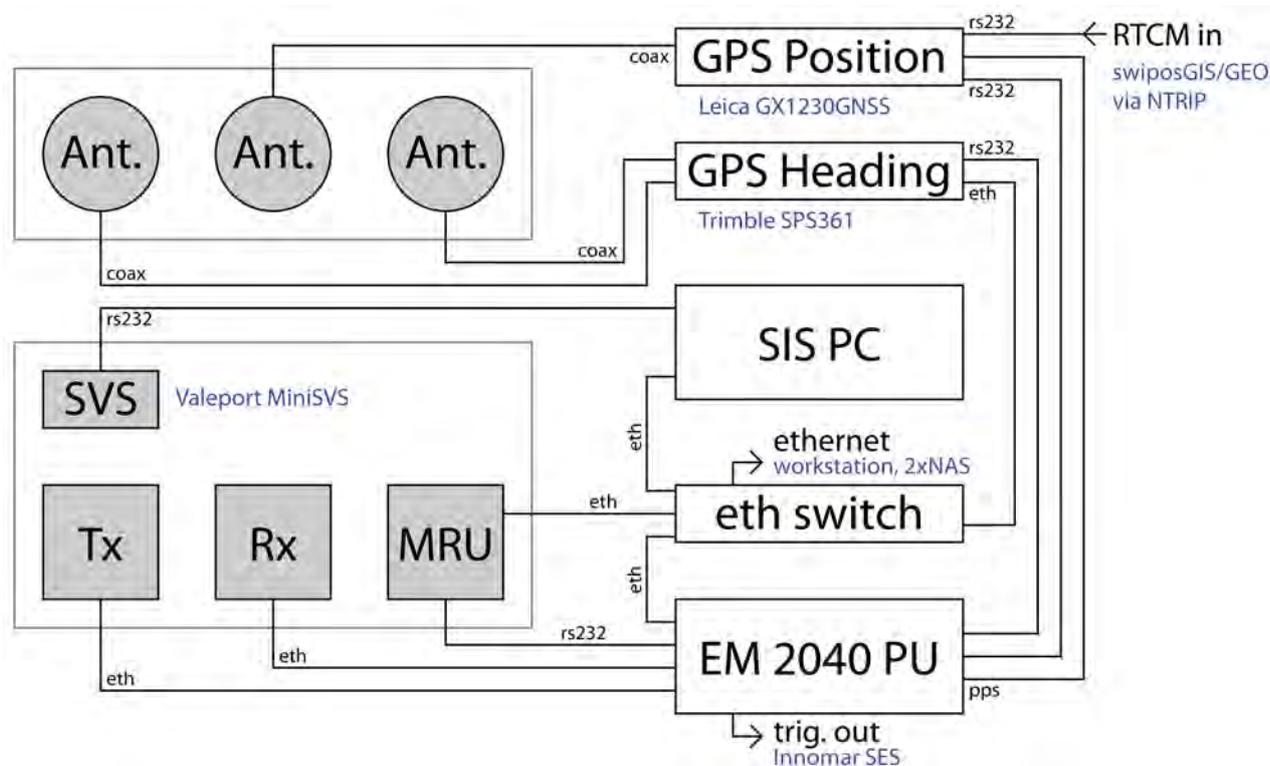


Abb. 3-4: Schema der im Text beschriebenen Komponenten des Fächerlotsystems, mit Datenleitungen (eth – Ethernet; rs232 – serielle Schnittstelle; coax, pps – Signalkabel koaxial). Die grau hinterlegten Symbole kennzeichnen die Sensoren bzw. Antennen ausserhalb der Kabine.

Die übrige Elektronik des Fächerlotsystems wurde im Messraum der Kormoran untergebracht. Sie besteht aus einer oder zwei zentralen Recheneinheiten („PU“, processing unit), welche die Echolotschwinger ansteuern und alle Sensordaten verarbeiten, den Empfängern von GNSS-Positionierung und GNSS-Kompass sowie diversen Stromversorgungen. Die Steuerung der Aufnahme und der Geräteparameter sowie die Speicherung der Daten erfolgt über einen auf der Brücke platzierten Laptop-PC mit der Software SIS (Seafloor Information System) von Kongsberg (Version 3.9.2). Die einzelnen Geräte sind über serielle Schnittstellen (RS232) und ein lokales Ethernet-Netzwerk (LAN) miteinander verbunden. Eine Zeitsynchronisation erfolgt über das PPS-Signal („pulse per second“) des GNSS-Empfängers. In das LAN wurden auch ein weiterer Arbeits-PC für die Datenauswertung auf dem Schiff sowie zwei redundante Netzwerkspeicher (NAS) für die Datenarchivierung eingebunden (Abb. 3-4).

### 3.2.1 Eigenschaften des Kongsberg EM2040 und der Nebensensoren

Die verwendete Ausrüstung erfüllt die im Rahmen des Projekts vorgegebenen technischen Rahmenbedingungen und Mindestgenauigkeiten (vgl. Tab. 3-1 und 3-3). Das Fächerlot Kongsberg EM2040 bietet in der eingesetzten Konfiguration mit einem Rx-Schwinger bei der normalen Arbeitsfrequenz von 300 kHz eine Winkelauflösung der Schallstrahlen („beam angle“, Strahlöffnungswinkel) von  $1^\circ \times 1^\circ$  und einen variablen Fächeröffnungswinkel (maximal  $150^\circ$  im Flachwasser). Die Pingrate ist abhängig von der Wassertiefe und dem gewählten Fächeröffnungswinkel und beträgt für den Bodensee grob geschätzt zwischen mehr als 20 Hz in Flachwasserzonen und etwa 2 Hz in den tiefsten Bereichen. Pro Ping werden 400 äquidistante Tiefenwerte generiert. Die Schallstrahlen sind dynamisch stabilisiert, d.h. Bewegungen des Schiffs um Längs(roll) und Querachse (pitch) werden elektronisch kompensiert, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Tiefenpunkte zu erreichen. Um die geforderte minimale Punktdichte vor allem in mittlerer und größerer Wassertiefe ohne signifikante Reduktion der Schiffsgeschwindigkeit während der Messung aufrechterhalten zu

Sensor	Gerätetyp	Typische Genauigkeit (Herstellerangaben)
Fächerlot	Kongsberg EM2040 $1^\circ \times 1^\circ$ , single Rx, dual swath und single swath	
Positionierung	Leica GX1230+GNSS mit swiposGIS/GEO und swiposPP	Positionsgenauigkeit RTK (horizontal, vertikal) um 3-5 cm (50% CEP)
Inertialnavigation	Kongsberg Seatex MRU5+	Roll, Pitch $0,01^\circ$ (RMS), Heave 5cm oder 5%
Kompass (GNSS)	Trimble SPS361 Heading Receiver	$0,09^\circ$ (RMS) mit 2 m Antennenabstand
Schallgeschwindigkeit Oberfläche	Valeport MiniSVS	0,019 m/s
Schallgeschwindigkeit Profil	Valeport MiniSVP	0,02 m/s

Tab. 3-1: Eingesetzte Sensoren und Geräte des Fächerlotsystems auf dem Bodensee, Genauigkeitsangaben der Hersteller.

können, wurde das System für einen Teil der Messkampagne (siehe unten) mittels einer von der Universität Bremen angemieteten, zweiten Recheneinheit (PU) im „dual swath“-Modus betrieben, welcher durch die Verwendung von zwei leicht unterschiedlichen Arbeitsfrequenzen eine Verdoppelung der Pingrate und damit der erreichbaren Punktdichte ermöglicht.

Der GNSS-Kompass Trimble SPS 361 ermittelt die Richtung (heading) über die relativen Positionen von zwei mit Abstand von 2 m montierten Antennen mit einer Rate von 2 Hz. Roll- und Stampfwinkel sowie Hub werden durch das INS Kongsberg Seatex MRU5+ mit einer Rate von 100 Hz geliefert. Zur Positionierung dient ein Empfänger Leica GX1230+GNSS (Rate 10 Hz), der mit dem Dienst swipos des Schweizerischen Bundesamts für Landestopografie betrieben wurde (analog zu Sapos, Bezugssystem ETRS89 bzw. CHTRS95). Für eine Echtzeit-Positionskorrektur (swipos-GIS/GEO) wurde ein separater PC mit mobiler Internetverbindung und entsprechender Software (NTRIP-Client) verwendet, welcher die Korrekturdaten über eine serielle Verbindung an den GNSS-Empfänger liefert. Da eine ausreichende Stabilität der benötigten Internetverbindung auf dem Bodensee nicht erreicht werden konnte, wurden zusätzlich GNSS-Beobachtungsdaten auf dem Empfänger aufgezeichnet, welche für eine nachträgliche Auswertung der Positionsdaten (swipos-PP) verwendet wurden (siehe unten). Für die Messung der Schallgeschwindigkeiten wurden Sensoren von Valeport verwendet (Tab. 3-1).

Im Rahmen der Qualitätskontrolle war vorgesehen, bei den Messfahrten zusätzlich zum Fächerecholot ein parametrisches Sedimentecholot Innomar SES-2000 Light SBP zu betreiben. Da sich bei Versuchen im Rahmen der Installationsarbeiten gezeigt hatte, dass das Fächerecholot durch die akustischen Signale des Sedimentecholots gestört wird und dass bei einem nicht synchronisierten Betrieb der beiden Systeme die Bodenerkennung des Fächerlots in Mitleidenschaft gezogen wird, mussten die ausgesendeten Schallpulse zeitlich aufeinander abgestimmt

werden. Dafür wurden die Zeitpunkte der Pings des (autonom arbeitenden) Fächerlots mit einem Signalkabel (TTL-Impuls) an das Sedimentecholot weitergeleitet und für dieses mit einer in der SES-Aufnahmesoftware gewählten Verzögerung als externer Trigger verwendet. Die Verzögerung wurde während der Messfahrten laufend so angepasst, dass der störende Effekt für die Bodenerkennung des Fächerlots (während der Aufnahme in den angezeigten Wassersäulendaten sichtbar) möglichst klein war.

### 3.2.2 Aufgezeichnete Daten

Die aufgezeichneten Daten des Fächerlotsystems werden linienweise im Kongsberg-eigenen Dateiformat „.all“ aufgezeichnet. Dieses auf individuellen Datenpaketen mit präzisen Zeitstempeln basierende Format beinhaltet neben den Tiefendaten auch die Backscatterdaten des Seebodens sowie Messdaten der kontinuierlich arbeitenden Nebensensoren (Position, INS, Kompass, SVS). Die Daten zur Rückstreuung aus der Wassersäule wurden aufgrund ihres großen Volumens in separaten Dateien („.wcd“) aufgezeichnet. Die GNSS-Beobachtungsdaten für die Positionierung wurden kontinuierlich über die gesamten Messtage direkt im Empfänger aufgezeichnet und liegen im Format „Leica MDB“ vor. Die regelmäßig gemessenen Schallgeschwindigkeitsprofile liegen als ASCII-Textdateien vor.

### 3.3 Durchführung der Vermessungsarbeiten auf dem See

Ziel der Fächerlotmessungen war die vollständige Aufnahme aller Teile des Bodensees mit einer Wassertiefe von mehr als 5 Metern. Dafür wurden zwei Kampagnen vorgesehen, im Frühling/Sommer 2013 die vollständige Vermessung des Sees sowie im Februar 2014 eine erneute Vermessung entlang der 5 m-Tiefenlinie zur Aufnahme einer möglichst aktuellen Vergleichsfläche für die gleichzeitig stattfindende Lidar-Kampagne.

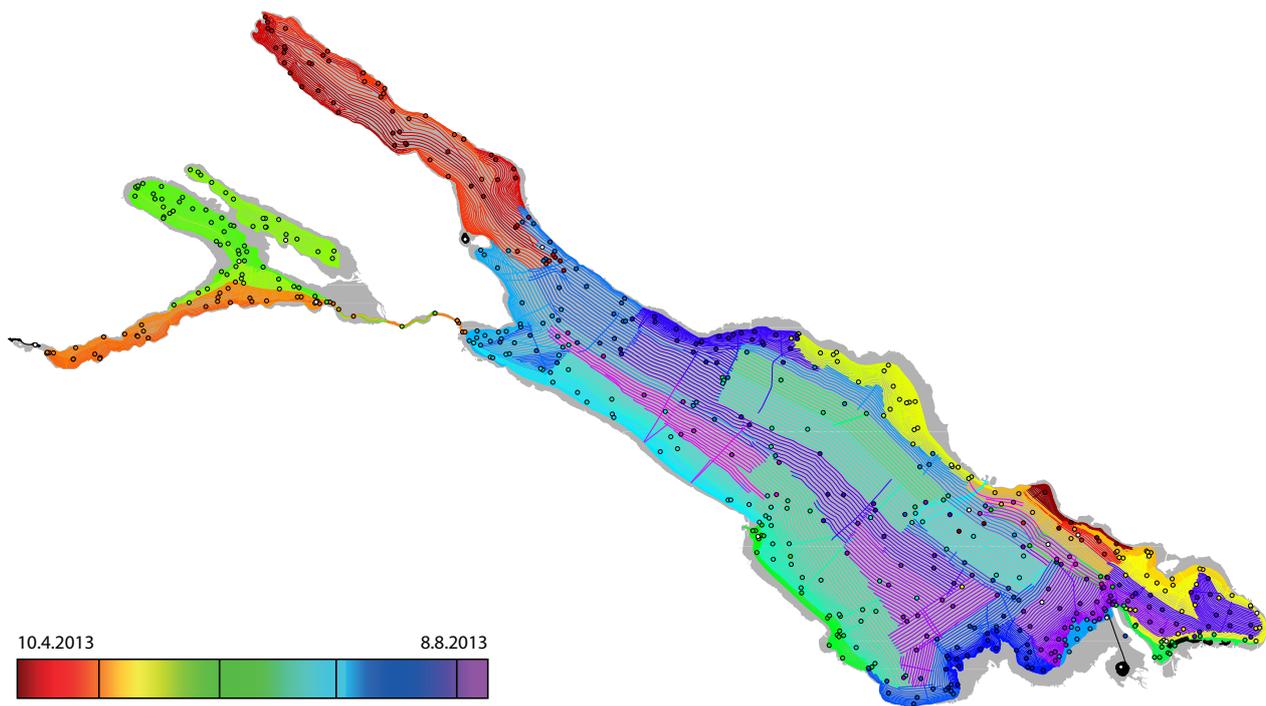


Abb. 3-5: Übersicht der Messlinien für die Kampagne 2013 mit den gemessenen Schallgeschwindigkeitsprofilen (Punkte). Die Farbe der Linien bzw. der Profile entspricht dem Datum der Messung, die Unterteilung der Farbskala (vertikale Linien) zeigt die Monate April bis August. Schwarz markierte Linien wurden während der Kampagne 2014 in den 2013 nicht vermessenen Gebieten aufgenommen.

Im Rahmen der Projektplanung wurden neben den Anforderungen an die Ausrüstung, Punktdichten und Genauigkeiten auch Vorgaben zur Durchführung der Messungen gemacht, um eine optimale Datenqualität sicherzustellen. So wurde für die gesamte vermessene Fläche eine Überdeckung von 110% (Nadir-Überdeckung), d.h. die Erfassung jedes Punktes des Seebodens durch mindestens zwei verschiedene Messstreifen, minimale Punktdichten von  $5 \text{ m}^{-2}$  bis 100 m Tiefe,  $2 \text{ m}^{-2}$  in 100 – 200 m Tiefe und  $1 \text{ m}^{-2}$  in über 200 m Tiefe, sowie ein maximaler Fächeröffnungswinkel von  $125^\circ$  bzw. maximal 400 m Aufnahmebreite vorgesehen. Bei der konkreten Planung der Kampagnen wurde darauf geachtet, dass die Vorgaben den zu technischen Anforderungen an die Ausrüstung, zu Punktdichten oder die Spezifikationen der IHO S-44 (IHO, 2008) eingehalten werden sollten. Für einige der Anforderungen wurden allerdings in Absprache mit der Projektleitung Anpassungen vorgenommen, mit dem Ziel, die Messzeit im vorgegebenen Rahmen von etwa 3,5 Monaten zu halten: Die ursprüngliche Begrenzung der Länge der ein-

zelnen Messstreifen von 4 km wurde auf 12 km vergrößert, um vor allem in mittleren und größeren Wassertiefen die Anzahl zeitaufwändiger Schiffsmanöver zu verringern. Für Wassertiefen von  $< 60 \text{ m}$  wurde aufgrund von Erfahrungen in anderen Seen ein maximaler Fächeröffnungswinkel von mehr als  $125^\circ$  (stufenweise Erhöhung nach Wassertiefe) zugelassen, und für Wassertiefen von  $< 15 \text{ m}$  sowie für steile Hänge wurde auf eine strenge Nadirüberdeckung verzichtet, da in Flachwasserzonen ohnehin sehr große Punktdichten erreicht werden und da an Steilhängen die Schallstrahlen im Nadir im Vergleich zu gegen den Hang gerichteten Strahlen einen ungünstigen Auftreffwinkel aufweisen. Die geforderten Punktdichten sollten gemäß der Surveyplanung im Mittel über die bezeichneten Tiefenklassen eingehalten werden.

### 3.3.1 Messkampagne Frühling/Sommer 2013

Der Hauptteil der Fächerlotmessungen wurde während der ersten Kampagne vom 4. Ap-

ril bis zum 8. August 2013 an insgesamt 67 Messtagen durchgeführt. In der ersten Woche wurden die verschiedenen Geräte (Fächerlot, Sedimentecholot, Nebenmessprogramme) installiert, sowie Funktionstests und vorbereitende Arbeiten durchgeführt, bevor am 11. April mit dem regulären Messbetrieb begonnen wurde. Während den ersten Messtagen wurden einige Stunden für das Ermitteln der optimalen Einstellungen für einen parallelen Betrieb von Fächerlot und Sedimentecholot aufgewendet. Im Rahmen der Vorbereitung wurden Kalibrationslinien gefahren („Patch-Test“), mit denen die Winkelverdrehungen verschiedener Sensoren ermittelt wurden. Die bei der Installation ermittelten Kalibrationswerte wurden später im Rahmen der Prozessierung noch einmal leicht revidiert (Tab. 3-2). An der installierten Bugaufhängung (Abb. 3-3) wurde die Tiefe des Referenzpunkts bzw. die Höhe der Wasserlinie für beide Positionen eingemessen (Tab. 3-2). Es ist zu beachten, dass diese Messung eher informativen Charakter hat und für die Resultate nicht direkt relevant ist, da der Höhenbezug bei der Prozessierung über die GNSS-Messungen erfolgt (allerdings wird die Wasserlinie für die Anwendung der Schallgeschwindigkeitskorrektur verwendet).

Die Aufnahme des gesamten Gebiets erfolgte nach Möglichkeit blockweise mit mehr oder weniger parallelen Messstreifen bzw. -linien, die ebenfalls möglichst parallel zu den Tiefenlinien orientiert sind (Abb. 3-5). Zur Qualitätskontrolle wurde je Block eine die übrigen Linien schneidende Querlinie gefahren. Für jeden Block wurde mindestens ein, meist aber eine wesentlich größere Anzahl (in Extremfällen bis > 10) räumlich verteilter Schallgeschwindigkeitsprofile gemessen. Der Verlauf der einzelnen Messlinien wurde in der Regel nicht im Voraus geplant, da diese etwa durch vorhandenen Schiffsverkehr und vor allem durch die aufgrund wechselnder und nicht genau bekannter Wassertiefe variierende Breite des Aufnahmestreifens ohnehin laufend angepasst werden mussten. Stattdessen orientierten sich die Schiffsführer während den Messfahrten an den laufend aufgenommenen Daten und steuerten das Schiff so, dass die

geforderte Überdeckung gewährleistet wurde (Abb. 3-6).

Die Vermessung erfolgte größtenteils vom Stützpunkt in Langenargen aus, was teilweise zu längeren Anfahrten führte. An etwa 60% der Messtage wurde bei vorhandenem Tageslicht im Zweischichtbetrieb gearbeitet, wobei der Wechsel des Schiffsführers oder des Fächerlots-Operateurs im jeweiligen Messgebiet erfolgte. Der Fortschritt der Messungen wurde in wöchentlichen Berichten festgehalten. In den ersten Wochen der Kampagne fanden die Messfahrten vor allem im Überlingersee statt, danach wurden flachere Zonen am nordöstlichen Ufer des Obersees sowie der Untersee vermessen. Die Messungen im Untersee konnten am 29.5.2013 abgeschlossen werden. Anschließend erfolgte die Installation der zweiten Recheneinheit (PU) der Universität Bremen für den „dual swath“-Betrieb ab dem 5.6.2013, mit welchem der verbleibende, größte Teil des Obersees vermessen wurde. Am Vormittag des 8.8.2013 wurden vor Kressbronn und Lindau die letzten Messungen der Kampagne durchgeführt. Insgesamt wurden ca. 670 Stunden Messzeit (reine Aufnahmezeit 479 Stunden) aufgewendet – bei der ursprünglichen Planung war der Aufwand grob auf 515 Stunden Messzeit geschätzt worden. Anders als in einer frühen Phase der Vorbereitung geplant, wurde die Vermessung nicht in den Winter- und Frühlingsmonaten, sondern später im Jahr durchgeführt. Dadurch waren lange Arbeitstage bei Tageslicht möglich, allerdings führten die nicht ganz optimalen Bedingungen zu Mehraufwand durch die variabelere Schallgeschwindigkeit im Wasser (siehe unten).

Die verwendeten Aufnahmeparameter (Tab. 3-3) orientierten sich einerseits an den technischen Vorgaben und der vorgängigen Planung, andererseits an fortwährenden visuellen Abschätzungen der Datenqualität während der Aufnahme. Während der Messungen wurde vor allem der Fächeröffnungswinkel verändert und an die momentane Tiefe und die Bedingungen angepasst. Die übrigen Parameter mussten nur selten angepasst werden.

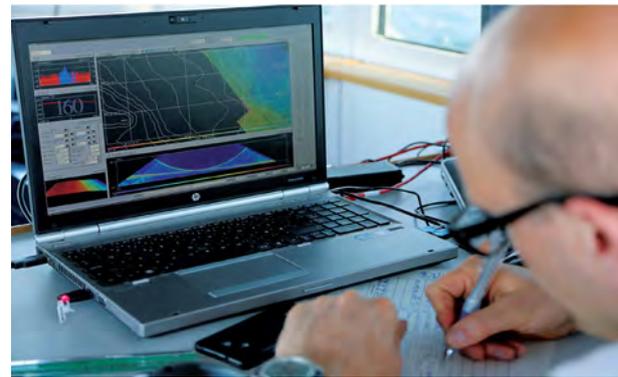


Abb. 3-6: Arbeitsplätze von Schiffsführer (links) und Fächerecholot-Operateur (rechts) auf der Kormoran während der Messungen. Die Steuerung der Aufnahme erfolgt über die Software „Kongsberg SIS“.

Als zwei wesentliche Problembereiche bei der Aufnahme wurden die Echtzeitpositionierung mit RTK sowie das Aufrechterhalten eines akkuraten Schallgeschwindigkeitsmodells des Sees identifiziert. Ursprünglich war vorgesehen, die Vermessung mit RTK-Positionierung in Echtzeit durchzuführen (Dienst „swiposGIS/GEO“). Um damit befriedigende Resultate zu erzielen, ist eine weitgehend unterbrechungsfreie mobile Internetverbindung für den Empfang der Korrekturdaten notwendig. Um dies auf dem Bodensee mit seinen oft großen Distanzen zu den Mobilfunk-Basisstationen und den verschiedenen Mobilfunknetzen dreier Anrainerstaaten zu gewährleisten, wurde spezielle Hardware eingesetzt, die den Datenverkehr theoretisch über bis zu vier redundante Internetverbindungen via unterschiedliche Mobilfunkprovider führen kann. Trotz ausgedehnten Versuchen unter Inanspruchnahme von Herstellersupport und des Einsatzes von zwei Geräten unterschiedlicher Hersteller (TDT, Viprinet) konnte keine stabile Lösung erreicht werden. Daher wurde entschieden, die Positionierung anhand der aufgezeichneten GNSS-Beobachtungsdaten in der Nachbearbeitung zu verbessern und die Vermessung mit einem einfachen Mobilfunkmodem fertigzustellen, welches im Durchschnitt eine ähnliche Verbindungsstabilität bot wie die Spezialgeräte.

Da die Vermessungsarbeiten im Frühling/Sommer bei teilweise sehr hohen Lufttemperaturen stattfanden, musste auch von einer deutlichen Variabilität der Schallgeschwindigkeit im Wasser

ausgegangen werden. Diese wird im Süßwasser hauptsächlich durch die Temperatur beeinflusst, wobei die Schallgeschwindigkeit bei 10 °C um etwa 4 m/s pro Grad zunimmt, bei 20 °C um etwa 3 m/s pro Grad (absolute Werte ~1447 m/s bei 10 °C, ~1482 m/s bei 20 °C; Fofonoff & Millard, 1983). Aufgrund der Refraktion von schräg zur Temperaturschichtung des Wassers verlaufender Schallstrahlen können bereits geringe Unterschiede der Schallgeschwindigkeit von wenigen Metern pro Sekunde zu erheblichen Fehlern der ermittelten Tiefen führen. Üblicherweise wird vor dem Beginn der Messungen innerhalb eines Blocks ein Schallgeschwindigkeitsprofil erhoben, welches bei der Aufnahme für eine Berechnung der Wassertiefen verwendet wird und gegebenenfalls später durch weitere Profile ergänzt oder ersetzt wird. Bereits in den ersten Wochen der Arbeiten und später während der gesamten Kampagne zeigten sich z.T. sehr variable Schallgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche von Unterschieden von bis zu 10 m/s auf relativ kleinem Raum sowie erhebliche Differenzen zwischen räumlich und zeitlich nahe beieinanderliegenden Profilen, beispielsweise in ufernahen Gebieten mit zunehmender Wassertiefe. Diese Unterschiede machen sich bei ungenügender Kompensation mit charakteristischen Effekten in den laufend angezeigten Daten bemerkbar, etwa als Stufen am Übergang von benachbarten Aufnahmestreifen oder als „Flattern“, d.h. als unregelmäßige und kleinräumige Variationen der Tiefe in den äußeren Bereichen entlang eines Aufnahmestreifens, die gegen die zentralen Schallstrahlen hin verschwinden.

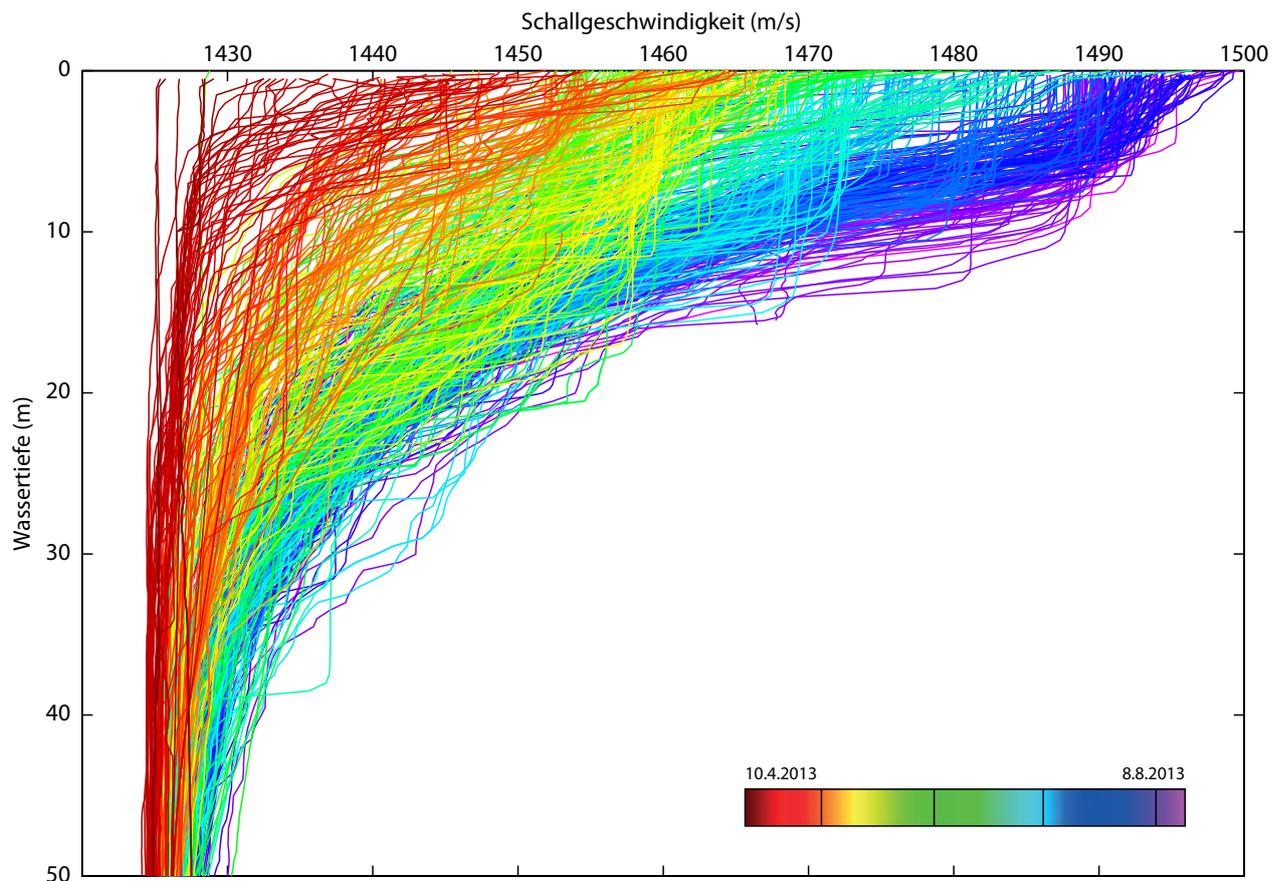


Abb. 3-7: Übersicht der während der Kampagne 2013 aufgenommenen Schallgeschwindigkeitsprofile (nur obere 50 m der Wassersäule) zur Illustration der Variabilität der Schallgeschwindigkeit infolge der Erwärmung des Epilimnions während des Sommers. Die in seichtem Wasser aufgenommenen Profile wurden bei der Datenprozessierung nach unten erweitert und sind hier in dieser Form dargestellt (siehe Text). Die Farbgebung entspricht dem Zeitpunkt der Aufnahme wie in Abb. 3-5.

Daher war die Verwendung eines Schallgeschwindigkeitsprofils pro Linienblock oft bei weitem nicht ausreichend und es wurde versucht, mit einer erheblichen Anzahl von Profilen die Variabilität in der Wassersäule hinreichend zu erfassen. Zudem wurde versucht, die kurzfristigen Schwankungen der Schallgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche durch eine tiefere Position der Fächerlot-Schwinger im Wasser zu reduzieren. Insgesamt wurden während dieser Kampagne 592 Schallgeschwindigkeitsprofile gemessen, welche eine große Variabilität der Schallgeschwindigkeitsverteilung in der Wassersäule illustrieren (Abb. 3-5, 3-7) und deren Anwendung auf die Messdaten eine Herausforderung bei der Datenprozessierung darstellte.

Zusammen mit weiteren Schwierigkeiten wie gelegentlichen Störungen der elektronischen Geräte sowie den gegebenen, relativ großen Unsicherheiten bei der Planung dürften diese Problembereiche für die etwa 30% längere Messzeit gegenüber der groben Schätzung im Vorfeld der Kampagne verantwortlich sein. Die zu vermessende Fläche konnte während der Kampagne 2013 weitgehend komplettiert werden, allerdings mussten einige Teilbereiche ausgelassen werden, und entlang einzelner Uferabschnitte wurde die Minimaltiefe von 5 Metern nicht erreicht. Dies teilweise aus Sicherheitsgründen, da die Kormoran nicht überall genügend nahe am Ufer operieren konnte, etwa in verwinkelten Bereichen und bei vorhandenen Untiefen (z.B. Eschenz-Stiegen, Mehrerau), sowie bei Installationen im See (z.B. Stellnetze im Untersee). Für einige Bereiche wur-

de erst nach der Datenprozessierung festgestellt, dass eine Tiefe von 5 m bezogen auf den mittleren Wasserstand knapp nicht erreicht wurde (z.B. Lindau).

### 3.3.2 Messkampagne Februar 2014

Eine zweite Kampagne vom 6. bis zum 13. Februar 2014 diente wie geplant der Aufnahme einer Vergleichsfläche für die Lidar-Vermessung entlang der 5m-Tiefenlinie. Zusätzlich wurden einige Messlinien für die Qualitätskontrolle aufgezeichnet und drei bei der Kampagne 2013 nicht abgedeckte Bereiche mit Wassertiefen > 5 m vermessen (Ausfluss bei Stein am Rhein, Untere Güll bei der Mainau, Fussacher Bucht). Für die Messungen an den beiden ersten Tagen bei Stein am Rhein und in der unteren Güll wurde zunächst aufgrund der in diesen Gebieten beengten Platzverhältnisse und der vorhandenen Untiefen statt der Kormoran eine mobile Arbeitsplattform („Helvetia“ des Geologischen Instituts der ETH Zürich; Abb. 3-8) verwendet, auf welcher das selbe Fächerlotsystem installiert wurde wie für die Kampagne 2013. Die anschließenden Messfahrten erfolgten wieder mit der Kormoran. Der Aufbau des Systems und die Aufnahmeparameter entsprechen weitestgehend jenen der Kampagne 2013, wobei das Fehlen der Nebenmessprogram-

me sowie des Sedimentecholots zu einigen Vereinfachungen führte, so dass Ein- und Umbau des Systems zügig realisiert wurde.

Aufgrund des niedrigeren Wasserstandes des Bodensees im Vergleich zum Sommer 2013 war zu vermuten, dass bei der Nachvermessung entlang der 5m-Linie gegen die Flachwasserzone keine zusätzliche Fläche abgedeckt werden konnte. Es wurde deshalb entschieden, die Nachvermessung mit einer Frequenz von 400 kHz statt den üblicherweise benutzten 300 kHz durchzuführen. Mit der höheren Frequenz werden üblicherweise sauberere Daten erzielt, der maximale Fächeröffnungswinkel ist aber auf 120° (60° je Seite) begrenzt. Ein Vergleich der Aufnahmen mit 300 kHz bzw. mit 400 kHz dient auch der Qualitätskontrolle. Für einige sehr steile Uferabschnitte (z.B. nordwestlicher Teil des Überlinger Sees) wurde auf eine Nachvermessung verzichtet, da hier nur geringe überlappende Bereiche von Lidar- und Fächerlotdaten und somit höchstens ein minimaler Informationsgewinn erwartet wurden.

### 3.4 Prozessierung der Fächerecholotdaten

Die Prozessierung der Fächerecholotdaten (Tiefendaten) erfolgte zum überwiegenden Teil in

Gerät	Pos X (nach vorne) [m]	Pos Y (Steuerbord) [m]	Pos Z (nach unten) [m]	Roll [°]	Pitch [°]	Heading [°]
Tx Transducer	0,000	0,219	0,000	-0,04	-0,25	359,6
Rx Transducer	0,1035	-0,1025	-0,014	0,04	0,25	179,6
INS (Attitude)	-0,1685	0,000	-0,177	0,00	0,00	–
Heading	0,040	-0,001	-4,203	–	–	0,0
Position	0,0415	0,000	-4,203	–	–	–
Wasserlinie	–	–	-0,69 ("oben") -0,96 ("unten")	–	–	–

Tab. 3-2: Eingemessene relative Sensorpositionen zu Referenzpunkt und Kalibrationsresultate (Winkelverdrehungen; korrigierte, definitive Werte nach der Prozessierung) für die Kormoran. Koordinatensystem nach der Definition von Kongsberg SIS. Der Rx-Transducer ist in umgedrehter Position installiert („reverse head installation“), weshalb die Vorzeichen der Winkelverdrehungen im Vergleich zum Tx-Transducer negative Werte haben.

Frequenz	300 kHz (optional 400 kHz gewählt für wenige Linien in Kampagne 2014)
Fächeröffnungswinkel	Variabel, maximal 2x74° und maximal 400 m Aufnahmebreite, in Tiefen > 60 m max, 2x62° (tatsächlich oft deutlich weniger)
“Beam angle”	1°x1° (0,7°x0,7° bei 400 kHz)
Anzahl “beams” (Tiefenpunkte je Ping)	400 (“high-density equidistant”), doppelte Pingrate mit “dual swath”
Aufnahmeparameter Pulstyp, Pulslänge, Bodenerkennung	Pulstyp nur “CW” (konstante Wellenlänge); Pulslänge “auto”; Bodenerkennung “Normal”, teilweise “Tracking” in geringen Wassertiefen
Dynamische Stabilisierung	roll, pitch (immer aktiv), heading (teilweise aktiv)
EM 2040 Filtereinstellungen	Spike Filter: medium; Range Gate: normal; Phase ramp: normal Slope, Sector Tracking: ein; Special TVG, Aeration, Interference: aus
Zeitkonstante Schallgeschwindigkeit Wasseroberfläche SVS (Glättung)	Anfänglich 15s-20s, nach Evaluation Datenqualität reduziert auf 1,5s oder 2s

Tab. 3-3: Eigenschaften und gewählte Aufnahmeparameter Fächerlot EM2040

der Software „Caris HIPS & SIPS“ (Versionen 8.1 und 9.0). Für einzelne Teilaufgaben wurde andere Software verwendet. Die Prozessierung dient dazu, aus den aufgezeichneten Daten des Fächerlotsystems eine gesäuberte, georeferenzierte Punktwolke von Tiefenpunkten zu erzeugen und anschließend aus dieser ein Tiefenmodell (regulärer Rasterdatensatz) des Seebodens zu erzeugen. Ein Teil der beschriebenen Schritte, z.B. die Schallgeschwindigkeitskorrektur anhand eines vorhandenen Schallgeschwindigkeitsprofils, wird bereits während der Aufnahme automatisiert in Echtzeit durchgeführt und dient dort unter anderem einer ersten Qualitätsüberprüfung. Bei der Prozessierung werden diese Schritte wiederholt und optimiert, und es werden zusätzliche Schritte, wie etwa die Korrektur der Positionsdaten, die Definition eines Höhenbezugs oder die Säuberung der Punktwolke, ausgeführt (Abb. 3-9). Die Prozessierung beinhaltet folgende wesentlichen, nachfolgend kurz erläuterten Arbeiten, welche teilweise iterativ und in abweichender Reihenfolge ausgeführt werden:

- Import der Rohdaten, Definition der Installations- und Aufnahmeparameter
- Säuberung bzw. Ersatz der Positionsdaten, inkl. GNSS-Höhen
- Einführen eines Höhenbezugs („Tide“)
- Schallgeschwindigkeitskorrektur
- Manuelle Säuberung der Punktwolke von fehlerhaften Daten
- Manuelle Klassifizierung Objekten
- Erstellen von Rasterdatensätzen, visuelle Überprüfung der Qualität

In einem ersten Schritt wurden die im Format „.all“ vorliegenden Rohdaten der Messlinien des Fächerlotsystems in das interne Format der Software Caris konvertiert. Zugleich wurden die Geometrie und weitere Eigenschaften des Aufnahmesystems (Sensorpositionen, Kalibration, Genauigkeitsangaben) in einem so genannten „vessel file“ beschrieben. Dies ergibt zusammen ein rudimentäres „Caris-Projekt“, in welchem die weiteren Arbeitsschritte ausgeführt werden.

### 3.4.1 Korrektur der Positionsdaten und Höhenbezug

Aufgrund der beschriebenen Probleme mit der Echtzeit-Positionierung auf dem Schiff wurden zunächst die durch das Fächerlotsystem aufgezeichneten Positionsdaten durch „postprozessierte“ Positionsdaten ersetzt. Dies erfolgte unter Zuhilfenahme der aufgezeichneten Beobachtungsdaten des GNSS-Empfängers. Diese wurden mit dem Programm „teqc“ in das gebräuchliche RINEX-Format konvertiert und anschließend mit der Software „Waypoint GrafNav“ (Version 8.10) kinematisch ausgewertet. Als Referenzstation wurde für den gesamten Datensatz die Station „Kreuzlingen“ (KREU) des Stationsnetzes AGNES des Schweizerischen Bundesamts für Landestopografie gewählt („swipos-PP“). Die durch die Auswertesoftware ausgegebenen Fehlerabschätzungen (Standardabweichungen) liegen meistens unter 5 cm, bei großer Entfernung der Referenzstation vom Messgebiet (Ostteil des Obersees) aber auch über 5 cm, vor allem jene für die Höhe (Abb. 3-10). Bis zum 20.6.2013 stehen die

postprozessierten Positionsdaten mit einer Rate von 1 Hz zur Verfügung, ab dem 24.6.2013 mit 10 Hz, wofür die Daten der Referenzstation (welche standardmäßig mit 1 Hz aufgezeichnet werden) in der Auswertesoftware interpoliert werden mussten. Für den Vormittag des 13.5.2013 sowie für den 21.6.2013 stehen aufgrund technischer Probleme keine postprozessierten Positionsdaten zur Verfügung. Für diese Perioden wurden manuell editierte Echtzeit-Positionen verwendet.

Die ausgewerteten Positionsdaten wurden als (tägliche) Textdateien mit Längen- und Breitenangaben in ETRS89, ellipsoidischen Höhen und Zeitangaben in UTC bereitgestellt, welche mit der Funktion „Generic Data Parser“ als (horizontale) Positionsdaten sowie als GNSS-Höhe in Caris geladen wurden und die ursprüngliche Position bzw. Höhe ersetzen. Die Synchronisation der nachträglich ausgewerteten Positionsdaten und der übrigen Daten des Fächerlotsystems erfolgt dabei sehr einfach über die vorhandenen, präzisen Zeitstempel. Eine gewisse Beachtung erfordert die Tatsache, dass die Echtzeit-Posi-



Abb. 3-8: Das Fächerlot Kongsberg EM2040 wurde für die Vermessung weniger, mit der Kormoran nicht zugänglicher Gebiete (z.B. bei Stein am Rhein) auf der Arbeitsplattform „Helvetia“ der ETH Zürich installiert.

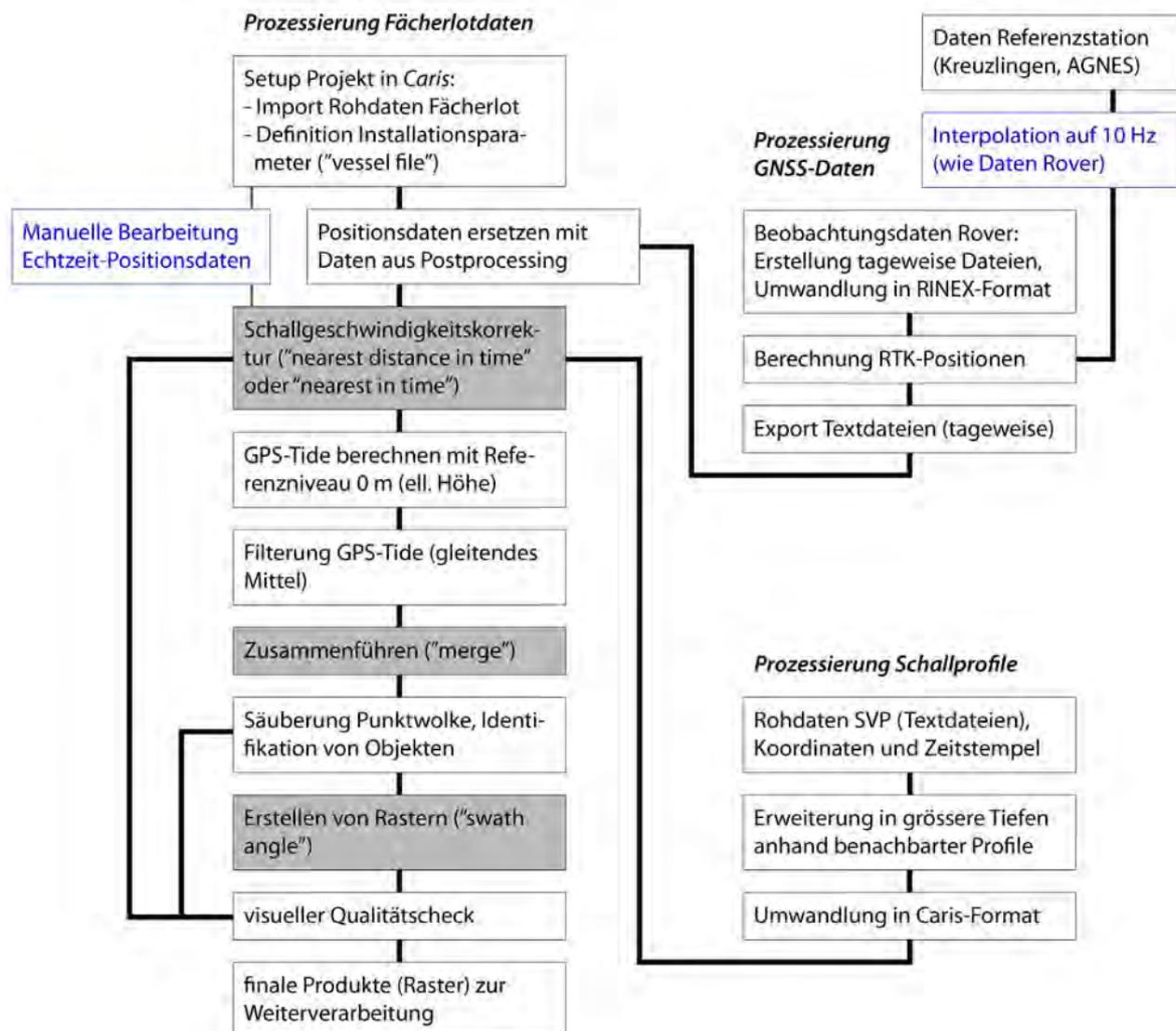


Abb. 3-9: Schematischer Ablauf der Datenprozessierung. Die zentralen Schritte werden im Programmpaket Caris HIPS & SIPS ausgeführt, Positionsdaten und Schallgeschwindigkeitsprofile wurden vorbereitet und in definierten Formaten in Caris zur Verfügung gestellt. Die grau hinterlegten Schritte wurden bereits während der Datenaufnahme zur Kontrolle ein erstes Mal teilweise durchgeführt (siehe Text). Blau dargestellte Schritte wurden als Alternativen für einen Teil der Daten angewendet. Ein Teil der Arbeitsschritte wurde nach einem Qualitätscheck iterativ durchgeführt.

tionsdaten bereits während der Aufnahme auf den Referenzpunkt des Fächerlotsystems reduziert werden, während die postprozessierten Daten die Position der Antenne wiedergeben. Die Echtzeit-Höhendaten sind im Gegensatz zu den rohen Antennenpositionen zudem bereits Hub-kompensiert. Dies erfordert Anpassungen im „vessel file“ und bei nachfolgenden Berechnungsschritten in Caris, da hier Antennenoffset und Hub entweder berücksichtigt werden müssen oder nicht.

Da bereits bei der Planung der Vermessung entschieden wurde, möglichst weitgehend mit ellipsoidischen Höhen zu arbeiten und erst in einem späten Schritt der Bearbeitung über ein Geoidmodell orthometrische Höhen einzuführen, wurde bei den Fächerlotmessungen auf einen klassischen Höhenbezug via Pegelmessungen verzichtet und stattdessen die vom GNSS-Empfänger gemessenen Höhen als Höhenbezug verwendet. Dieser Ansatz vermeidet Fehler, die durch ungenaue Einmessung oder durch Ände-

rungen der Wasserlinie (z.B. bei wechselnder Fahrtgeschwindigkeit oder Beladung) entstehen, da neben den Höhenmessungen und den Fächerlotmessungen lediglich der (genau bekannte und konstante) Abstand der beiden Sensoren entscheidend ist. Um für die Tiefendaten ellipsoidische Höhen zu erhalten, wurde somit in Caris als Referenzniveau („sounding datum“) für die Berechnung der so genannten „GPS-Tide“ eine ellipsoidische Höhe von 0 m verwendet. Höhenbestimmungen mittels GNSS weisen meist eine gewisse kurzperiodische Streuung von einigen Zentimetern auf, welche sich direkt auf die Tiefendaten auswirken kann. Um den durch die Streuung verursachten Fehler zu reduzieren, wurde die GPS-Tide – diese beschreibt die (hubkompensierte) mittlere Seespiegelhöhe am Ort der Messung und sollte somit keine abrupten Änderungen aufweisen – mit einem gleitenden Mittel von 31s geglättet.

### 3.4.2 Schallgeschwindigkeitskorrektur

Wie nach den Erfahrungen der Messkampagne 2013 erwartet, war die korrekte Anwendung der Schallgeschwindigkeitskorrektur ein kritischer und zeitaufwändiger Schritt bei der Prozessierung der Fächerecholotdaten. In einem vorbereitenden Arbeitsgang wurden sämtliche gemessenen Schallprofile (als ASCII-Textdateien) zeitlich und räumlich verortet. Da die Profile in unterschiedlichen Wassertiefen gemessen wurden und ein Profil oft auch für Fächerlotdaten in größerer Tiefe als die maximale Tiefe des Profils verwendet wurde, mussten diese anhand von zeitlich und räumlich benachbarten Profilen in größere Tiefen extrapoliert werden. Dies wurde mittels eines MATLAB-Skripts bewerkstelligt, welches alle Profile mit einer Reihe von benachbarten Profilen bis zur maximalen Wassertiefe des Sees verlängerte. Das Vorgehen wird nachstehend detailliert beschrieben, wobei Punkt 1 manuell und alle weiteren Punkte mit Hilfe des Skriptes durchgeführt wurden:

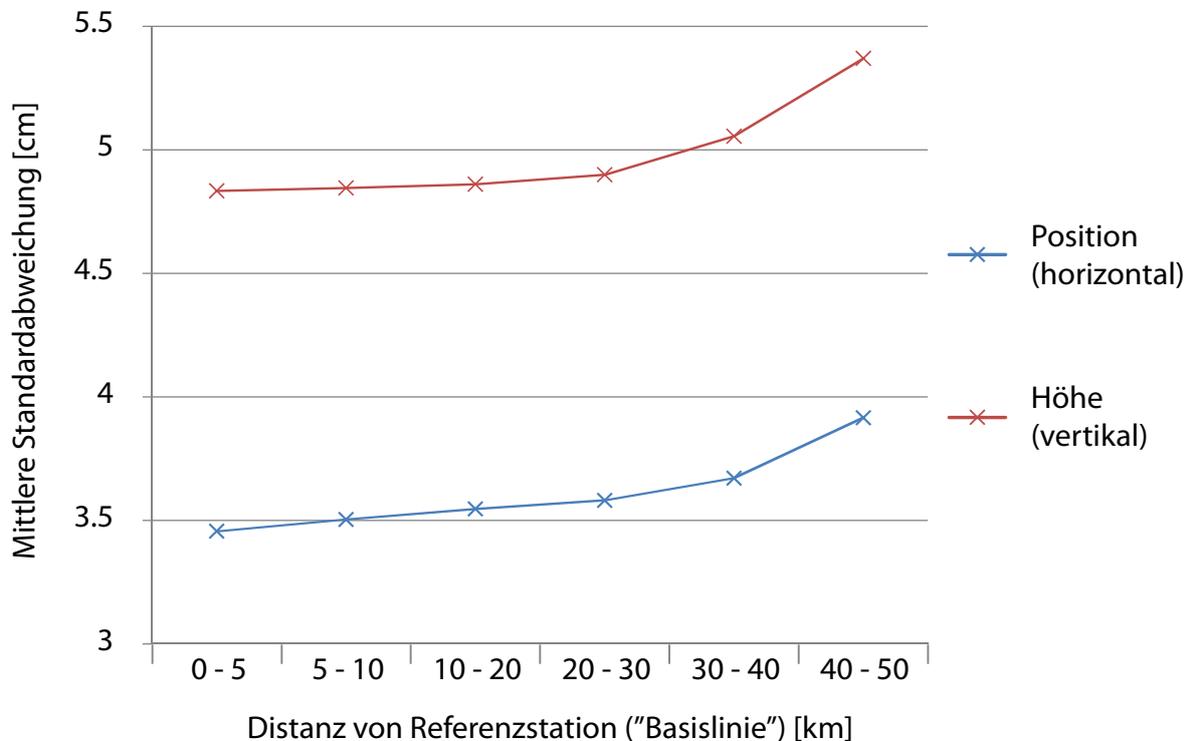


Abb. 3-10: Mittelwerte der geschätzten Standardabweichungen (Unsicherheiten) für die Positions- und Höhendaten in Abhängigkeit von der Entfernung von der Referenzstation Kreuzlingen. Für Entfernungen von mehr als 30 km (also im Ostteil des Obersees) steigt die geschätzte Unsicherheit der Position an und beträgt im Mittel für die Höhe etwas über 5 cm und generell unter 4 cm für die Lage.

1. Die aufgenommenen Profile wurden in einem CARIS-eigenem Textformat \*.svp gespeichert. Das Format ist einfach aufgebaut mit den Spalten Tiefe (m) gegen Wasserschall (m/s) unterhalb des Kopfbereiches. Alle Profile werden dort zeitlich sortiert und als Sektionen untereinander gespeichert. Die Daten wurden auf mögliche Null-Werte im Wasserschall kontrolliert, Wasserschallwerte gleicher Tiefen wurden gemittelt und als ein Wert pro einer Tiefe gespeichert.

2. Exportieren aller Datensätze mit Wasserschallmessungen über 100 m. Aus diesen Profilen wurde ein gemittelttes Profil erzeugt, das zur Verlängerung kürzerer Profile diente, da es ab ca. 40-50m Wassertiefe wesentlich geringere Wasserschall-Veränderungen gibt.

3. Sämtliche Profile wurden in räumliche und zeitliche Blöcke unterteilt. Pro Woche Aufzeichnungszeitraum wurden die Daten in 3\*3 Winkelminuten und zusätzlich in Tageszeiten (0-8, 8-11, 11-15, 15-24 Uhr) unterteilt. Das sollte der raschen täglichen und wöchentlichen Temperatur-Veränderung gerecht werden.

4. Die gemittelten Profile dieser Raum-/Zeit-Blöcke wurden errechnet und für die notwendige Verlängerung der individuellen Profile verwendet. Dabei wurden weitere Ausreißer identifiziert (große Sprünge zwischen Profilmittel und individuellem Profil) und entfernt bzw. angeglichen.

5. Verlängerung der Profile aus 4) mit dem gemittelten Profil aus 2), um sämtliche Profile bis zur maximalen Tiefe des Sees verwenden zu können.

6. Wiedererstellen eines neuen, zeitlich sortierten \*.svp Files mit den verlängerten Profilen.

Nach der Umwandlung der Schallprofile in ein von Caris lesbares Format wurden diese auf die einzelnen Linien angewendet. Es ist zu beachten, dass Caris für jeden Ping nur ein bestimmtes Schallprofil verwendet, um die Tiefenpunkte zu berechnen, d.h. es wird keine Interpolation zwischen mehreren Profilen durchgeführt. Die Zuweisung der Profile zu den Messlinien bzw. Pings erfolgte meist über die Regel „nearest in distance within time“, wobei die gewählten Zeitintervalle, in denen das nächste Profil gesucht wird, zwischen 3 und 72 Stunden variieren. Der tatsächlich gewählte Wert ist oft ein Resultat eines iterativen Ansatzes und abhängig von der Profildichte im jeweiligen Gebiet. Die Regel „nearest in time“ wurde in einigen Fällen angewendet, falls das oben angeführte Vorgehen zu keiner Verbesserung der Datenqualität führte.

Im Anschluss an die Bearbeitung der Positionsdaten, die Einführung eines Höhenbezugs und die Schallgeschwindigkeitskorrektur erfolgt in Caris der Arbeitsschritt „merge“. In diesem werden die bis dahin in einem lokalen, schiffsbezogenen Koordinatensystem vorliegenden Tiefenpunkte mit den Positionsdaten und den weiteren

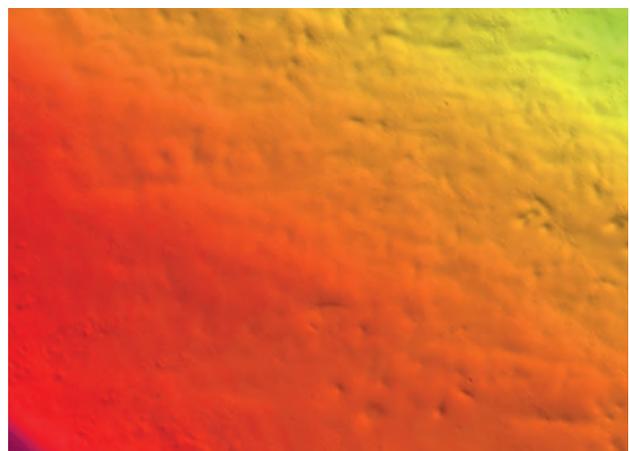
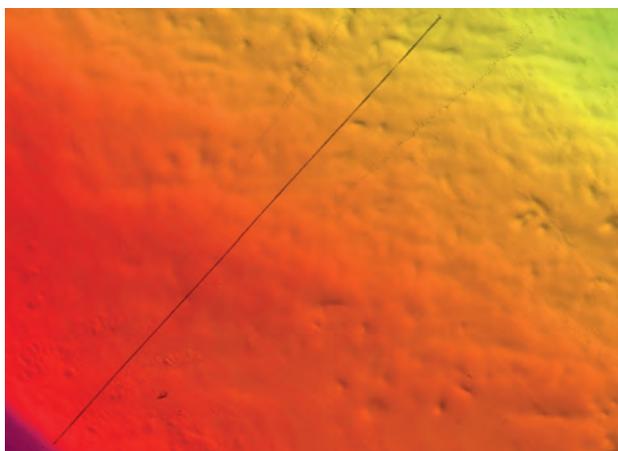


Abb. 3-11: In den Originaldaten (links) sind Objekte (z.B. Rohre zur Wasserentnahme) gut sichtbar. Diese Punkte wurden aus dem Datensatz entfernt und die entstandenen Lücken interpoliert.

Daten (Höhe, INS, Kompass) zusammengefügt, um eine georeferenzierte Punktwolke zu erhalten.

### 3.4.3 Bereinigen der Punktwolke, Umgang mit Objekten

Die in den vorherigen Arbeitsschritten erhaltene Punktwolke wurde anschließend von Fehl- daten gesäubert. Diese können beispielsweise durch Echos aus der Wassersäule oder allgemein fehlerhafte Bodenerkennung des Fächerlots entstehen. Zusätzlich wurden viele Punkte entfernt, die zwar korrekte Bodenerkennungen darstellen, aber aufgrund ihrer ungenügenden Qualität (beispielsweise wegen starken lokalen Schwankungen der Schallgeschwindigkeit oder durch Streuung bei großem Fächeröffnungswinkel) das Endergebnis negativ beeinflussen und zu Datenartefakten führen. Aufgrund der gewählten doppelten Überdeckung stellt dies meist kein Problem dar, da an der gleichen Stelle qualitativ bessere Daten vorhanden sind und somit keine Datenlücken entstehen. Fehl- daten werden in Caris als „rejected“ klassifiziert.

Ebenfalls wurden Punkte besonders klassifiziert, welche spezifische Objekte auf dem Seegrund, z.B. Rohrleitungen, Bauwerke oder archäologische Objekte wie Schiffswracks, beschreiben (Abb. 3-11). Hintergrund dafür ist der Wunsch, ein Modell der tatsächlichen Geländeoberfläche zu erstellen. Zudem sollen auf den öffentlich zugänglichen Datensätzen sensible Objekte, wie beispielsweise Trinkwasserentnahmen, nicht dargestellt werden. Aufgrund der beschränkten Funktionen von Caris in Bezug auf Punktklassifikationen stehen nur die (eigentlich anderen Zwecken dienenden) Kategorien „outstanding“ und „examined“ zur Verfügung, um verschiedenartige Objekte zu bezeichnen. Als „outstanding“ wurden dabei Punkte klassifiziert, die vorwiegend in der Wassersäule liegen und beispielsweise als Gasblasen, Fische oder Makrophyten von hohem Wuchs interpretiert werden können. Bauten und Objekte auf dem Seegrund, wie etwa Wracks, wurden als „examined“ klassifiziert. Die überwiegende Mehrheit der gültigen

Bodenerkennungen bleibt unklassifiziert („accepted“).

Die zeitaufwändige Identifikation und Markierung der Fehl- daten und der zu maskierenden Objekte in der Punktwolke erfolgte in Caris manuell im Modul „subset editor“ in ad hoc definierten, rechteckigen Teilgebieten von typischerweise einigen zehn bis einigen Hundert Metern Kantlänge. Die Identifikation der Punkte beruht unter anderem auf der Erfahrung des Bearbeiters, der beispielsweise die Geometrie von vermeintlichen Objekten auf ihre Plausibilität prüft oder ihr Vorhandensein auf mehreren, das gleiche Gebiet abdeckenden Messstreifen. Als Grundlage für die Säuberung bzw. Identifikation stehen Kartendarstellungen von Reliefschattierung und Hangneigung zur Verfügung. Zusätzlich wurden die aufgezeichneten Backscatterdaten hinzugezogen, um Objekte sowie Fehl- daten zu identifizieren. Im Hinblick auf einige bekannte, zu maskierende Objekte stehen außerdem Listen mit den entsprechenden Positionen zur Verfügung, mit denen diese gezielt markiert werden können.

Aus der ursprünglichen Punktwolke werden bereits während der Bearbeitung wiederholt Rasterdatensätze zur visuellen Beurteilung erstellt. Aus den gesäuberten Punktdaten werden schließlich auf die gleiche Weise Rasterdaten zur Weiterverarbeitung bzw. zur Kombination mit den Lidardaten generiert. Dafür wurde ein Algorithmus gewählt, welcher aus den Tiefenpunkten in einer Rasterzelle mit einem vom Winkel des Schallstrahls innerhalb des Fächers abhängigen Gewichtungsfaktor einen Tiefenwert berechnet (Bezeichnung „swath angle surface“ in Caris). Der Gewichtungsfaktor eines Punktes ist umso höher, je näher er sich am Nadir befindet und je geringer deshalb seine geschätzte Lage- bzw. Tiefenunsicherheit ist. Bei der Generierung des Rasters wird auch der Öffnungswinkel der einzelnen Schallstrahlen bzw. die tatsächliche Auflösung berücksichtigt, weshalb ein Tiefenpunkt in mehrere benachbarte Rasterzellen einfließen kann. Aus den Daten wurden zur Weiterverwendung und für die nachfolgende Zusammenführung verschiedene Raster mit Zellengrößen zwischen 0,5

und 10 m sowie Raster mit und ohne Einbezug der als zu maskierend klassifizierten Objekte generiert. Diese Raster liegen im Koordinatensystem ETRS89 / UTM Zone 32N vor und geben die ellipsoidische Höhe des Seegrunds an.

Neben den vollständig prozessierten Tiefendaten liegen die Backscatterdaten des Seegrunds sowie der Wassersäule als Rohdaten vor. Diese wurden teilweise zur Prozessierung der Tiefendaten hinzugezogen, aber nicht systematisch ausgewertet.

### 3.5 Fakten zum Datensatz

Für den entstandenen Datensatz wurden während den beiden Messkampagnen, welche sich über einen Zeitraum von 21 Wochen erstreckten, an insgesamt 70 Tagen und in einer Netto-Messzeit von 487 Stunden Fächerlotdaten aufgezeichnet. Zusätzlich wurden an weiteren Tagen Linien

aufgenommen, die beispielsweise der Qualitätskontrolle dienen. Das gesamte aufgezeichnete Datenvolumen beträgt 3,28 Terabyte, wovon 2,83 Terabyte auf die Wassersäulendaten entfallen.

Der gesamte Fächerecholot-Datensatz umfasst dabei:

- eine vermessene Fläche von 460,6 km<sup>2</sup>,
- 3008 Messlinien mit einer Gesamtlänge von 5.608 km, bei einer durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit von 11,5 km/h (3,2 m/s) während der Messungen,
- 7.210.007.325 erfasste Tiefenpunkte, wovon 162.211.606 während der Prozessierung als Fehlzeiten verworfen wurden,
- 602 Schallgeschwindigkeitsprofile,
- eine durchschnittliche Überdeckung von 112 % unterhalb 5 m Wassertiefe.

## 4 Topobathymetrisches Laserscanning der Flachwasserzone

Mit traditionellen Methoden der Gewässer- vermessung 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 topobathymetrische 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. 4-1).

### 4.1 Die Technologie des Topobathymetrischen Laserscanning

Die neue Messtechnik 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 wie im Bodensee kann die Gewässer-

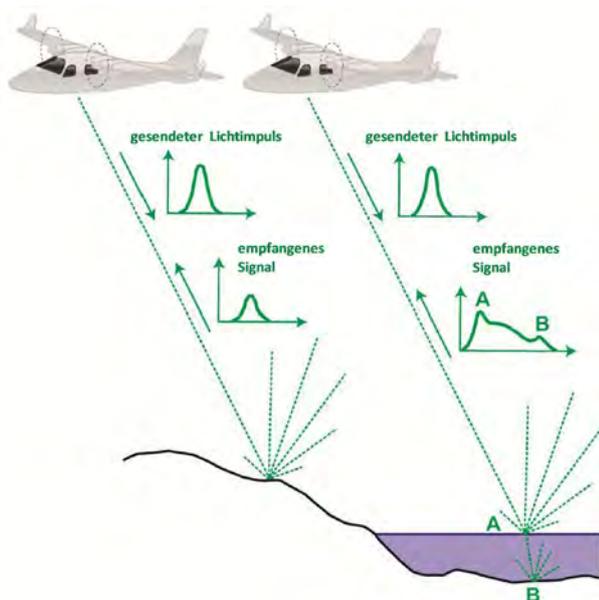


Abb. 4-1: Das Prinzip der topographischen (links) und bathymetrischen (rechts) Geländevermessung mit der Laserscanningmethode (A - Wasserspiegel; B - Flussbett bzw. Seeboden).

sohle bis in eine Tiefe von max. ca. 10-11 m, in der Regel aber 5-7 m erfasst werden.

Im Vergleich mit topographischen Laserdaten ist die Signalform der Daten für den Gewässerbereich komplexer (Abb. 4-1), 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 topobathymetrischen Gewässerbereich nicht, so dass hier neue Algorithmen entwickelt bzw. bestehende Algorithmen erweitert wurden.

### 4.2 Projektdurchführung

#### 4.2.1 Anforderungen der Ausschreibung und notwendige Abweichungen

Die Befliegung des Projektgebietes am Bodensee mit dem topobathymetrischen Laserscanner und einer digitalen Mittelformatkamera sollte im Winter 2013-2014 bei niedrigem Wasserstand erfolgen, da der Bodensee im Februar-März statistisch seinen niedrigsten Wasserstand erreicht. Die erfassten Laserdaten sollten gemäß den Anforderungen georeferenziert, klassifiziert und modelliert, und aus der klassifizierten Laserpunktewolke ein digitales Geländemodell (DGM) des Seebodens und des anschließenden Uferbereiches abgeleitet werden. Die zeitgleich erfassten Luftbilder sollen direkt georeferenziert und auf Basis des aus den Laserdaten abgeleiteten digitalen Oberflächenmodells (DOM) ein Orthofotomosaik für das Bodenseeufer berechnet werden, wobei festzuhalten ist, dass bei einer simultanen Erfassung der LiDAR-Daten Abstriche bei der Qualität der Luftbilder gemacht werden müssen.

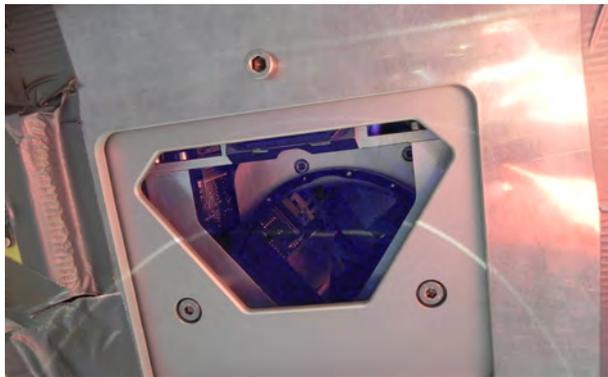


Abb. 4-2: Das Vermessungsflugzeug Tecnam P2006T des Auftragnehmers AHM GmbH mit dem hydrographischen Laserscanner VQ820-G (Riegl LMS) (linke Seite). Detailansicht der geöffneten Bodenplatte im Flugzeug mit dem montierten Laserkopf (oben rechts). Luftbilder wurden mit einer RGB-Luftbildkamera DigiCAM-H/39 (Hasselblad) aufgenommen, für Infrarotaufnahmen war eine Thermalbildkamera VarioCAM HD (InfraTec) im Flugzeug installiert. Die Anordnung der Messinstrumente im Flugzeug zeigt das Bild unten rechts.

Wegen technischer Schwierigkeiten konnte mit der Datenerhebung entlang der Uferlinie des Bodensees erst verzögert begonnen werden: Ein Hardwaredefekt der Laserquelle konnte erst im Februar 2014 behoben werden, anschließend traten bei Flugtests elektrische Probleme bei der Spannungsversorgung auf. Nach Auswertung von ersten Testdaten musste die Sensitivität der Messoptik empfindlicher eingestellt werden, um die notwendigen Messtiefen zu erreichen. Das führte zu wesentlich mehr Streupunkten und Zwischenechos in den Daten (s. Kap. 4.3.2). Nach diesen notwendigen Anpassungen wurde mit der Datenaufnahme begonnen.

#### 4.2.2 Verwendete Flug- und Messinstrumente

Als Flugplattform diente ein zweimotoriges Flugzeug verwendet (Tecnam P2006T, Abb.

4-2). Im hinteren Teil des Flugzeuges ist der Laserscanner VQ-820G (Riegl Laser Measurement Systems) integriert. Das Gerät verwendet einen grünen Laser mit einer Wellenlänge von 532 nm. An allen Messtagen wurde mit einer Messfrequenz von 256 kHz gearbeitet. Im vorderen 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 mm) 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 ControllIle) mit einer Datenrate von 256 Hz aufgezeichnet.

Die Hebelarme zwischen Scanner- und IMU-Zentrum wurden durch die Firma Riegl LMS

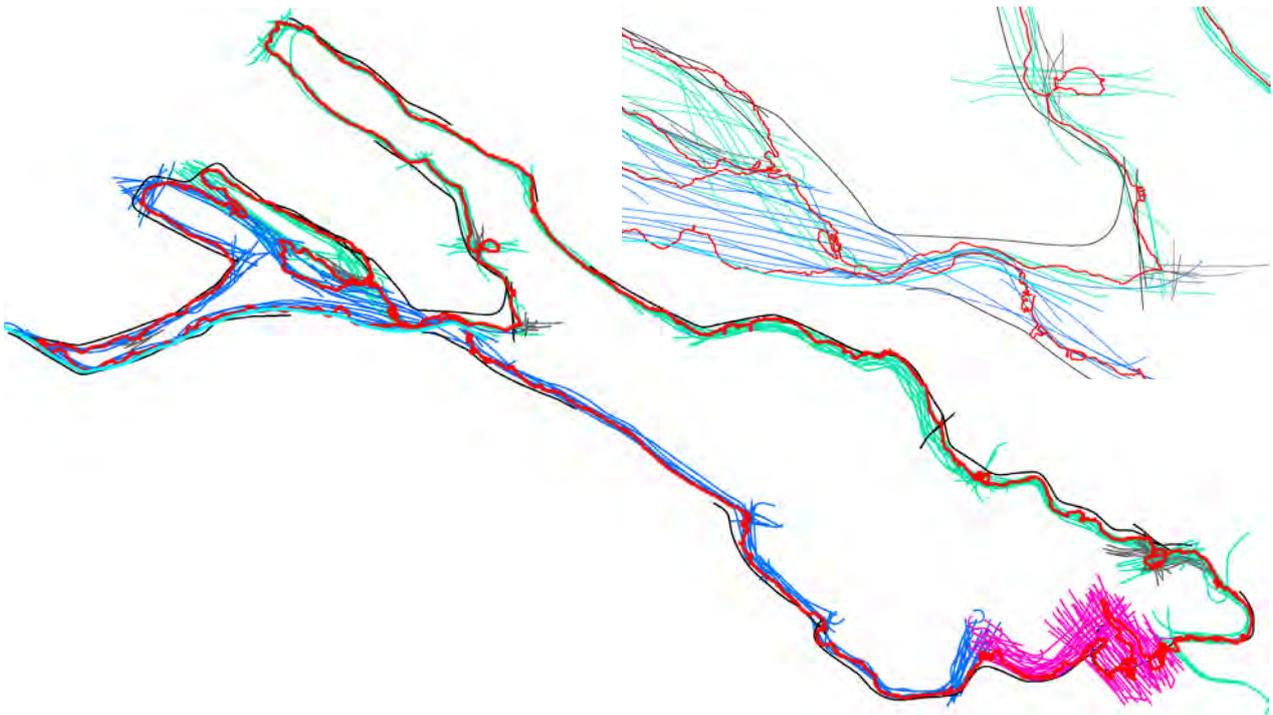


Abb. 4-3: Übersicht der Trajektorien entlang des Nordufers (29. März 2014, grüne Linien), des Südufers (30. März 2014, blaue Linien), am 31. Mai 2014 (schwarz), am Rheindelta (11. Juni 2014 (magenta)), und am 02. Mai 2015 (grau) zur Erfassung von einzelnen Lücken. Die Uferlinie des Bodensees ist rot gezeichnet. Das Detailbild aus der Gegend um Konstanz gibt einen Eindruck von der Vielzahl der geflogenen Linien.

GmbH ermittelt und in einer technischen Zeichnung an die AHM GmbH übergeben. Die Hebelarme zwischen GPS-Antenne, IMU und Luft- und Thermobildkameras wurden tachymetrisch durch Steinbacher-Consult ermittelt und als technische Zeichnung dokumentiert. Eine Actionkamera zeichnete während der Vermessung Videodaten auf.

#### 4.2.3 Die Befliegung mit dem Laserscanner

Die Befliegung eines Großteils des Bodenseeufer fand am 29. und 30. März 2014 statt, wobei am 29. März 2014 die nördliche und am 30. März 2014 die südliche Uferlinie vermessen wurde (Abb. 4-3). Nach einer ersten Datenevaluierung wurde am 31. Mai 2014 landseitig rund um den See ein ergänzender Flugstreifen zur Nachverdichtung aufgenommen. Dabei wurde besonders auf einige kritische Stellen entlang des Ufers geachtet, für welche die davor erzielte Informationsdichte nicht zufriedenstellend war. Am 11. Juni 2014 erfolgte die Datenaufnahme für

den Bereich Altenrhein für den wegen des Naturschutzgebietes Rheindelta eine Sondergenehmigung notwendig war. In Tabelle 4-1 sind wichtige Parameter zur Datenaufnahme zusammengefasst.

An allen Flugtagen herrschte ruhiges Flugwetter. Am 29./30. März 2014 war es sonnig bei ca. 10-19°C und schwachem Wind aus südlicher Richtungen (0-10 km/h). Am 31. Mai 2014 herrschte heiter bis sonniges Wetter bei ca. 10-22°C und schwachem Wind aus wechselnden Richtungen (0-15 km/h). Am 11. Juni 2014 war es ebenfalls sonnig bei 20-30°C und schwachem Wind aus wechselnden Richtungen (0-10 km/h). Die Pegelwerte zum Zeitpunkt der Befliegung für Friedrichshafen, Konstanz und Bregenz sind in Tabelle 4-2 aufgeführt.

Nachdem im März 2015 eine Analyse der zusammengeführten Datensätze aus Fächerecholot und klassifizierten Sohl- und Geländepunkten der Laserdaten durchgeführt wurde, erfolgte am 02. Mai 2015 eine ergänzende Datenaufnahme mit dem hydrographischen Laserscanner VQ880-G. Diese Daten wurden mit dem besonderen Au-

Durchschnittliche Fluggeschwindigkeit	ca. 80 Knoten
Durchschnittliche Flughöhe bei Einhaltung der Augensicherheit	ca, 370 m
Größe des Laserfootprints am Boden	~ 0,5 m
Laserimpulsfrequenz	256 kHz
Öffnungswinkel des Laserscanners	69-111° (gesamt 42°)
Inklinationswinkel des Laserscanner	20°
Durchschnittliche Scanstreifenbreite	ca. 300 m
Uferlänge des Bodensees	273 km
Fläche des Bearbeitungsgebietes	~ 300 km <sup>2</sup>
Eindringtiefe Laser	0-11 m
Anzahl der Flugtage 2014 / 2015	4 / 1

Tab. 4-1: Wesentliche Aufnahmebedingungen während der Befliegung.

genmerk erhoben, vorhandene Lücken zwischen Echolotung und dem topobathymetrischen Laser-scan aus 2014 zu schließen.

#### 4.3 Prozessierung der Laserscanning-Daten

Topobathymetrische Laserdaten werden in mehreren Schritten verarbeitet, um eine in sich

konsistente und klassifizierte Punktwolke zu erhalten (Abb. 4-4). Um die Rohdaten korrekt zu prozessieren, werden zunächst die jeweiligen Flugtrajektorien berechnet und die aus den Kalibrationsflügen ermittelten „Boresightparameter“ (Erläuterung Abschnitt 4.3.1) übernommen. Im Anschluss wird ein Streifenabgleich durchgeführt, um einen Versatz zwischen den einzelnen Scanstreifen zu korrigieren. Nach der Definition

Flugtag	Friedrichshafen	Konstanz	Bregenz
29. März 2014	295	296	297
30. März 2014	295	297	298
31. Mai 2014	362	363	365
11. Juni 2014	364	364	367
02. Mai 2015	358	359	360

Tab. 4-2: Pegelhöhen in Friedrichshafen, Konstanz und Bregenz zum Zeitpunkte der Datenaufnahme am Bodensee (Tagesmittel in cm über dem jeweiligen Pegelnullpunkt, Daten LUBW, Dr. M. Wessels, 2015).

Größe der Rohdatensätze (Laser und Luftbild)	9 Terabyte
Datenvolumen pro km <sup>2</sup>	30 Gigabyte/km <sup>2</sup>
Anzahl der Laserpunkte	ca. 12 Mrd.
Punktdichte Sohle 4-5 m Tiefe	10-20 Punkte/m <sup>2</sup>
Punktdichte Sohle Flachwasser in Ufernähe	20-30 Punkte/m <sup>2</sup>
Anzahl der Luftbilder	22.000
Auflösung am Boden (Luftbild)	ca. 6 cm

Tab. 4-3: Datengröße und Informationsdichte der topobathymetrischen Datensätze.

von Passpunkten mit Hilfe der Laserdaten werden diese vor Ort terrestrisch eingemessen. Aus den Passpunkten werden dann Flächen abgeleitet, auf deren Grundlage die Georeferenzierung der Laserdaten erfolgt. Schließlich werden die Laserdaten klassifiziert und von Fehlechos bereinigt. Nach der Überprüfung der Klassifizierungsergebnisse wird für Punkte der Gewässersohle und des Wasserkörpers die Refraktion durchgeführt. Sowohl die unklassifizierte als auch die klassifizierte Laserpunktwolke wird in das Datenformat „las 1.2“ exportiert, da die in der Ausschreibung geforderte Version „las 1.4“ noch nicht hinreichend definiert war. Aus den als Gelände (an Land) und Sohle (im Wasser) klassifizierten Laserpunkten wird schließlich ein digitales Geländemodell abgeleitet.

Die Datenspeicherung und -sicherung erfolgte in mehreren Schritten, wobei die Rohdaten (Laserdaten sowie Luftbilder) direkt vom Messrechner auf mehreren Festplatten abgespeichert wurden und als Sicherungskopie (Backup) auf einer separaten Festplatte vorlagen. Die fertig prozessierten Luftbilder wurden separat gespeichert. Auch die prozessierten Laserdaten (Punktwolke) sowie deren Backup wurden jeweils auf eigenen Festplatten gesichert. Zur Übersicht sind in Tabelle 4-3 einige Kennzahlen zur Datengröße und Informationsdichte aufgeführt.

#### 4.3.1 Trajektorien, Kalibrierung, Streifenabgleich und Georeferenzierung

Als Grundlage für die Prozessierung der Laserdaten und Luftbildaufnahmen wurden die Flugbahnen (= Trajektorien) berechnet. Die einzelnen Trajektorien wurden mit den Softwarepaketen AeroOffice und GrafNav berechnet und sind in Abbildung 4-3 als Übersicht dargestellt. Zunächst wurden die während des Fluges gespeicherten GPS-Daten im Postprocessing mit GPS-Basisstationsdaten korrigiert. Während des Fluges wurden zudem mit einer Inertial Measurement Unit (IMU) die Verdrehungen des Flugzeuges um die drei Rotationsachsen aufgezeichnet. Im Anschluss wurden GPS- und IMU-Daten zur endgültigen Trajektorie zusammengefasst. Die Genauigkeit der Trajektorie liegt im Bereich von ca. 5-10 cm. Da zwischen einzelnen Scanstreifen oftmals steile Wendekurven geflogen wurden, führte dies zur teilweisen Abschattung der GPS-Antenne am Flugzeug und einer verminderten Qualität der Trajektorie. Diese Wenden sind in den Daten gut sichtbar und als Ausreißer markiert (Abb. 4-5).

Im Anschluss wurden auf Grundlage von Kalibrationsflügen und den dabei erfassten Laserdaten die jeweils aktuellen Boresightparameter (= Rollwinkel zwischen Laserscanner und IMU) bestimmt. Solche Kalibrationsflüge müssen

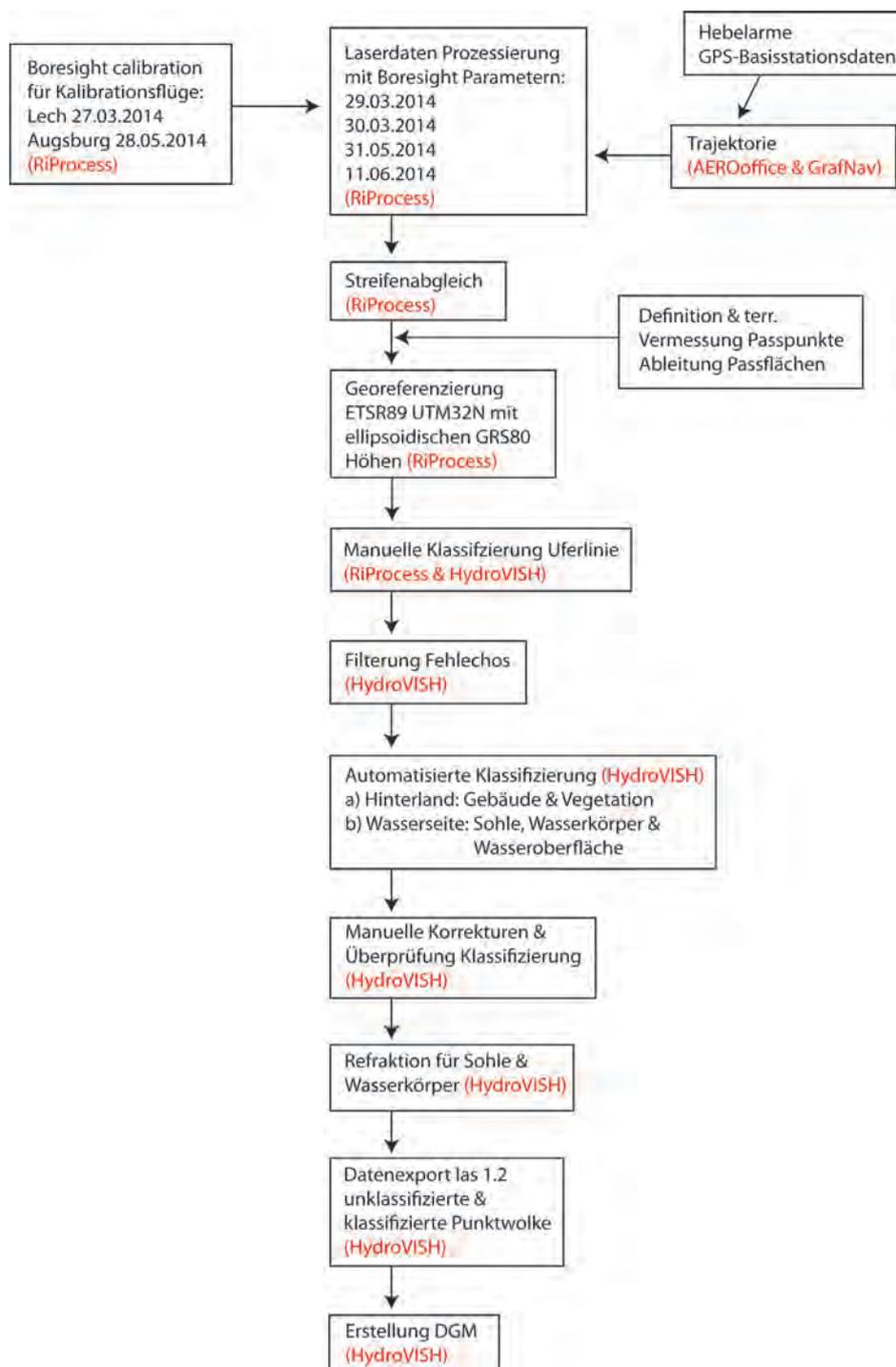


Abb. 4-4: Arbeitsschritte zur Prozessierung der topobathymetrischen Laserdaten.

durchgeführt werden, da sich die Rollwinkel zwischen Laserscanner und IMU nach einer Reintegration des Messsystems in das Flugzeug merklich verändern. Bis zum erneuten Ausbau des Systems können die Rollwinkel dann als konstant angesehen werden. Ohne Ermittlung der Boresightparameter können beim Streifenabgleich und der

späteren Georeferenzierung keine verwertbaren Ergebnisse gewonnen werden. Da das Messsystem zwischen den Befliegungen am 29./30. März 2014 und 31. Mai/11. Juni 2014 aus dem Flugzeug aus- und wieder eingebaut wurde, wurden zwei Kalibrationsflüge durchgeführt (Tabelle 4-4).

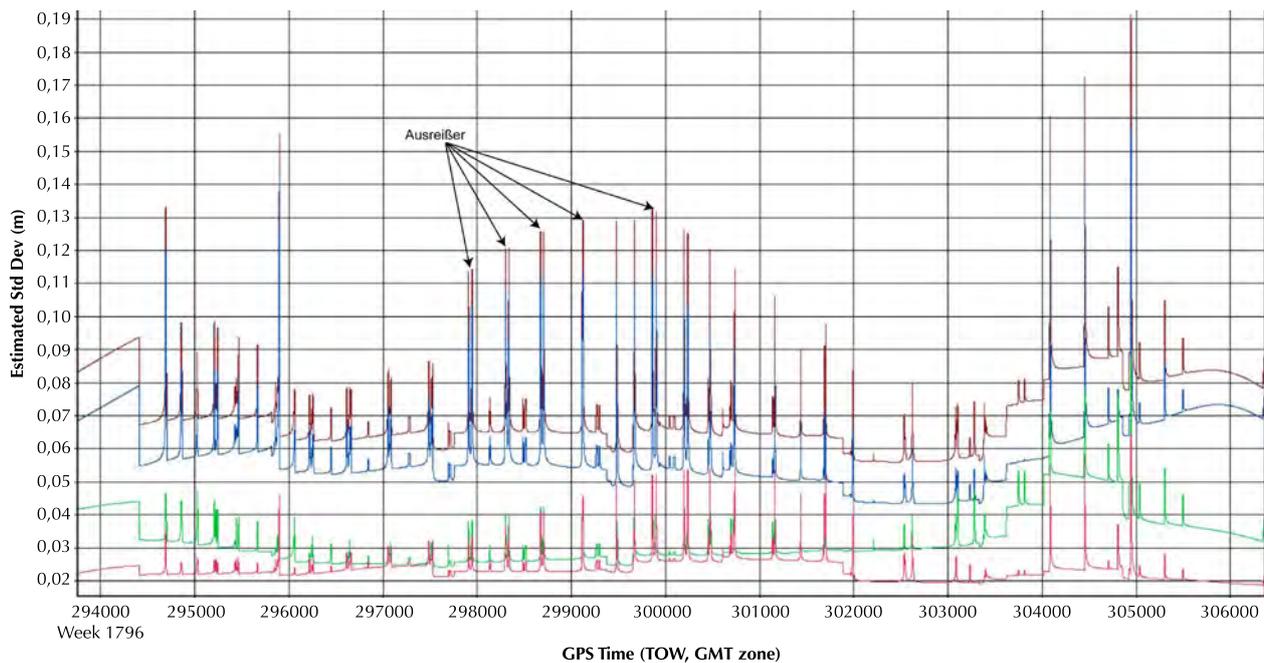


Abb. 4-5: Genauigkeit der Trajektorie vom 11. Juni 2014 bezüglich aller Komponenten (braun) und Einzelkomponenten (Ost = magenta, Nord = grün, Höhe = blau). Ausreißer erklären sich durch die Abschattung der GPS-Antenne am Flugzeug während steiler Wendekurven, die zwischen einzelnen Scanstreifen geflogen werden.

Zur Erstprozessierung der Laserscandaten unter Verwendung der letztgültig berechneten Trajektorien und der aktuellen Boresightparameter wurde die Software RiProcess (Riegl LMS) verwendet. Sie diente zum Streifenabgleich (Korrektur der Lage der einzelnen Scanstreifen zueinander) und zur späteren Georeferenzierung der Vermessungsdaten. Beim Streifenabgleich wird ein Referenzstreifen ausgewählt, an dessen Lage im Raum die übrigen Scanstreifen ausgerichtet werden und so eine einheitliche Punktwolke erstellt wird. Die verbleibende Restabweichung (Standardabweichung) der einzelnen Datenpunkte zueinander liegt dabei bei ca. 0,07-0,11 m. Die Protokollierung der einzelnen Ergebnisse des Streifenabgleichs ist am ISF dokumentiert.

Die Georeferenzierung diente der absoluten Kalibrierung der Laserdaten, wobei die absolute Lage der Punktwolke im Raum mit bekannten Punkten (bzw. Passflächen) ermittelt wurde. Die Passpunkte wurden im festgelegten Projektkoordinatensystem vermessen (ETRS89 – UTM32N mit ellipsoidischen GRS80-Höhen), dafür wurden 18 Stellen rund um den Bodensee ausgewählt (Abb. 4-6). Die Passpunkte (Dachecken und Fahrmarkierungen) wurden vor Ort terrestrisch vermessen und dienten als Grundlage zur Definition von 18 Passflächen. Die Lage der gesamten Punktwolke wurde anschließend auf diese Passflächen angepasst. Die Standardabweichung liegt hierfür bei ca. 0,08-0,09 m. Die Protokollierung der einzelnen Ergebnisse zur Georeferenzierung der Laserpunktwolke ist ebenfalls am ISF hinterlegt.

Winkel	VQ820G 27. März 2014	VQ820G 28. Mai 2014	VQ880G 20. März 2015
Roll	-0,25366	-0,27015	0,00089
Pitch	0,28896	0,30959	0,03648
Yaw	0,35138	0,39125	0,83623

Tab. 4-4: Boresightparameter 2014 (VQ820-G) und 2015 (VQ880-G).



Abb. 4-6: Darstellung der topobathymetrischen Laserdaten des Bodensees in RiProcess und Lage der Passflächen (schwarze Kästchen mit gelbem Rahmen).

### 4.3.2 Klassifizierung der Punktwolke

Die Klassifizierung der Laserpunktwolke erfolgte in mehreren Schritten gemäß den in Tabelle 4-5 aufgeführten Klassen. Im Folgenden werden die Einzelschritte von der georeferenzierten

und unklassifizierten Rohpunktwolke zur klassifizierten Punktwolke beschrieben. Die Definition einer Klasse ist dabei von grundlegender Bedeutung und hat nicht nur Auswirkungen auf das Vorgehen bei der Klassifizierung der Punktwolke, sondern auch auf die spätere Modellierung

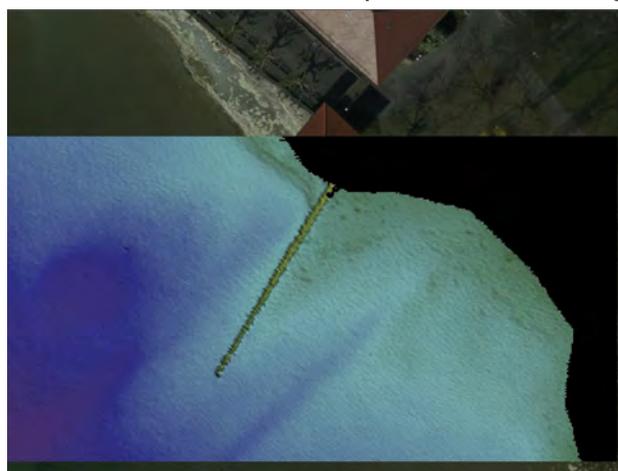
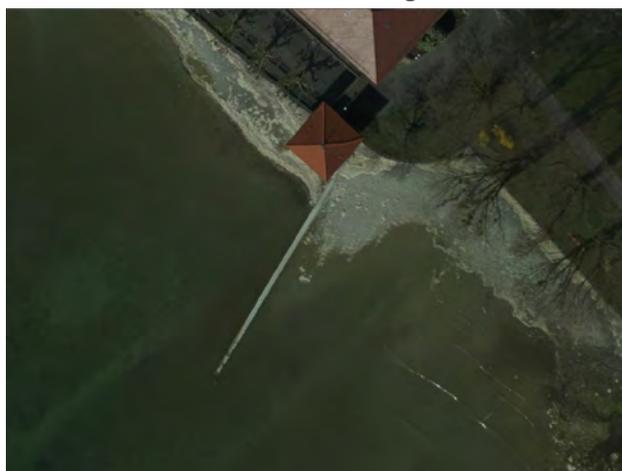


Abb. 4-7: Eine Buhne aus Beton am nördlichen Bodenseeufer im Bereich Manzell als Ausschnitt aus dem Orthofotomosaik (a) und im Geländemodell, das mit dem Orthofoto hinterlegt wurde (b). Das Betonbauwerk ist im Geländemodell abgebildet, da die Punkte als Boden/Gewässerboden und nicht als gewässerbauliche Struktur klassifiziert wurden.

Klasse ID	Bedeutung
1	Unklassifiziert
2	(fester) Boden
3	Niedrige Vegetation (Bewuchshöhe: 0-1 m)
4	Mittlere Vegetation (Bewuchshöhe: 1-5 m)
5	Hohe Vegetation (Bewuchshöhe: 5-10 m)
6	Gebäude
7	Baustrukturen Gewässer (Stege, Dalben, Seezeichen)
9	Wasseroberfläche
28	Fehlecho
29	Gewässerboden
30	Punkt in der Wassersäule (Volumenstreuer, See-Vegetation, Fische)

Tab. 4-5: Klassifizierungsschlüssel der Punktwolke.

der Punktwolke – z.B. bei der Erstellung eines digitalen Geländemodells auf Grundlage der als Boden und Gewässerboden klassifizierten Punkte und einer anschließenden hydraulischen Modellierung. Zum besseren Verständnis wird dies zunächst an einem einfachen Beispiel erläutert:

In Abbildung 4-7 ist ein schmales Betonbauwerk zu erkennen, das zum See hin abfällt. Dieses Bauwerk kann als gewässerbauliche Struktur (Klasse 7), Boden (Klasse 2) oder Gewässerboden (Klasse 29) klassifiziert werden. Im ersten Fall würden die Punkte, die die Betonrampe abbilden, bei der Geländemodellierung nicht berücksichtig

tigt, im zweiten Fall hingegen schon, wie in Abbildung 4-7 gezeigt. Da die Betonrampe ein starres, strömungsrelevantes Gebilde definiert, werden die Punkte hier entsprechend als Boden bzw. Gewässerboden klassifiziert. Gleiches gilt für Hafenanlagen, die in den See hineinragen. Würden Hafenanlagen als gewässerbauliche Struktur klassifiziert, hätte das extrahierte Geländemodell des Seebodens keinen „Rand“.

Für die Klassifizierung der Punktwolke wurde deshalb entschieden, Punkte die Hafenanlagen, Betonrampen und Ähnliches abbilden, als Boden (Klasse 2) bzw. Gewässerboden (Klasse 29) zu

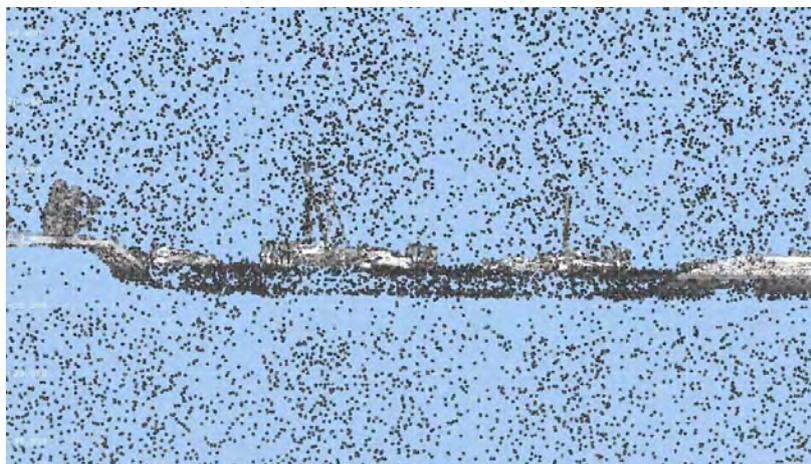


Abb. 4-8: Querschnitt durch die Punktwolke im Bereich einer Hafenanlage: Visuell können Fehlechos und echte Daten klar voneinander getrennt werden.

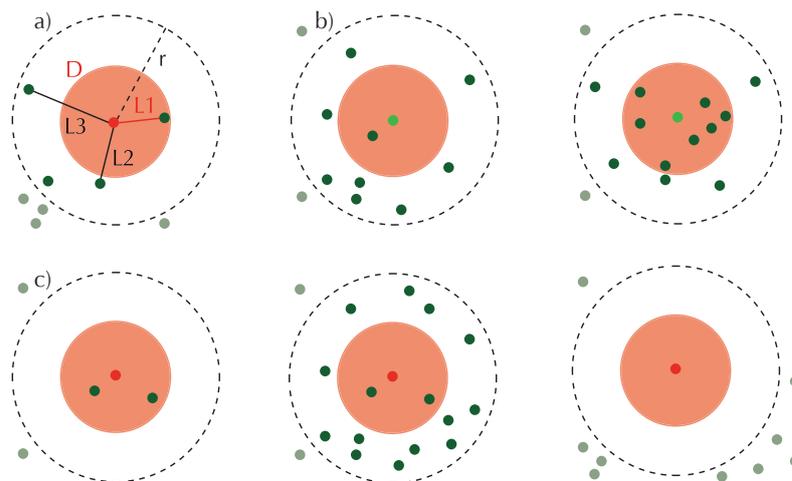


Abb. 4-9: Nachbarschaftsanalyse in HydroVISH zur Klassifizierung von Fehlechos. Der Suchradius  $r$  beschreibt den Radius der Nachbarschaftsanalyse (a). Das Abstandskriterium  $D$  ist die Distanz, innerhalb der sich der nächstgelegene Punkt befinden muss. Ein Dichtekriterium (nicht gezeigt) definiert 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.

klassifizieren, um ein realitätsnäheres digitales Geländemodell herzustellen. Die Klasse „gewässerbauliche Struktur“ ist deshalb nicht vollständig.

### Filterung von Fehlechos

Für eine sinnvolle Klassifizierung der Punktwolke müssen Fehlechos (bzw. das „Rauschen“) von den Messdaten abgetrennt werden (Abb. 4-8). Die Messoptik des Laserscanners war während der Messkampagne am Bodensee 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 Fehlmessungen erfasst wurden. 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 mehr als 50 m über der realen Geländehöhen und mehr als 50 m unterhalb des Seegrunds waren, 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. 4-9). 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.

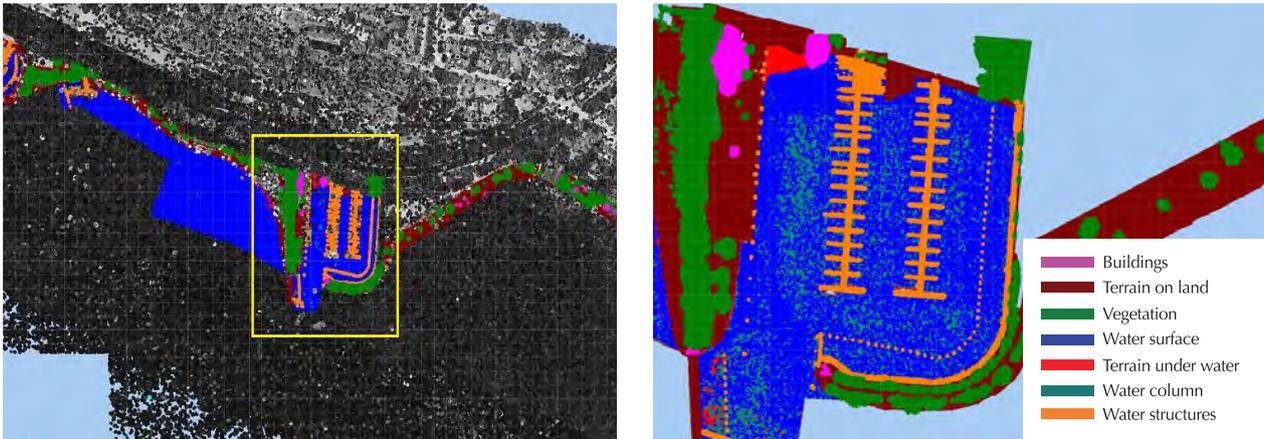


Abb. 4-10: Ausschnitt der Uferlinie des Bodensees (Hafen Unteruhldingen) mit dem Ergebnis der manuellen Klassifizierung innerhalb eines landseitig ca. 50 m breiten Uferstreifens in RiProcess (oben links). Das gelbe Rechteck markiert den Bereich der vergrößerten Ansichten des Hafenbeckens.

### Manuelle und automatisierte Klassifizierung

Mit der Software RiProcess und später mit HydroVISH wurde eine detaillierte manuelle Klassifikation innerhalb eines ca. 50 m breiten Uferstreifens durchgeführt (Abb. 4-10). Dieser zeitaufwändige Schritt war notwendig, um eine korrekte Refraktion (Korrektur der Laufzeit des Laserstrahls im Wasser) zu gewährleisten. Dafür musste die Lage der Wasseranschlaglinie, also der Übergang von Gewässerboden (Klasse 29) zu Boden an Land (Klasse 2), genau bekannt sein. Die Wasseranschlaglinie definiert den Umriss der für die Refraktion noch zu berechnenden Wasseroberfläche. Die so bestimmte Wasseranschlaglinie wurde zudem mit dem Orthofotomosaik (Abschnitt 4.4) überprüft, und wenn nötig, korrigiert. Baustrukturen im Gewässer (z.B. Steganlagen etc., Klasse 7, Tabelle 4-5) wurden auf Grund ihrer feingliedrigen Struktur manuell klassifiziert.

Anschließend wurde der Großteil der Klassifizierung automatisiert mit der Software HydroVISH durchgeführt. Die landseitige Klassifizierung mit der Unterscheidung nach festem Boden (Klasse 2), Vegetation (Klassen 3 bis 5) und Gebäude (Klasse 6) erfolgte bis ca. 300 m hinter die Uferlinie des Bodensees. Auf der Wasserseite wurde die Punktwolke nach Wasserspiegel (Klasse 9), Wasserkörper (Klasse 30) und Gewässerboden (Klasse 29) klassifiziert.

Zunächst wurde die Punktwolke auf ein  $1 \times 1$  m Raster abgebildet und eine automatisierte Klassifizierung auf diesem Raster durchgeführt. Dabei wurde der tiefste Punkt der Punktwolke in den Rasterzellen abgebildet. Als Ergebnis der Klassifizierung wurden die Rasterpunkte als Gelände (fester Boden, Gewässerboden und Brücken) und „Rest“ (Vegetation/Gebäude und Wasserkörper/Wasseroberfläche) unterschieden. Die folgende Unterscheidung zwischen Gelände und Rest erfolgte über ein Höhen- bzw. Steigungskriterium im Vergleich mit den benachbarten Rasterpunkten. Dann wurden die Ergebnisse der automatisierten Rasterklassifizierung überprüft und Fehlklassifizierungen im Raster manuell korrigiert. So mussten beispielsweise Brücken auf dem  $1 \times 1$  m Raster manuell nachklassifiziert werden, da sie fälschlicherweise automatisch als Gelände klassifiziert wurden.

Schließlich wurde der gesamte Wasserkörper (d.h. inkl. Wasseroberfläche, Bestandteil Klasse Rest) auf dem Raster automatisch klassifiziert. Alle als „Rest“ klassifizierten Rasterpunkte, die innerhalb der Wasseranschlaglinie liegen, wurden nun als Wasserkörper umklassifiziert. Alle als „Gelände“ klassifizierten Rasterpunkte, die seeseitig der Wasseranschlaglinie liegen, wurden als Gewässerboden klassifiziert. Damit war die Klassifizierung auf dem  $1 \times 1$  m Raster abgeschlossen, die Ergebnisse der Rasterklassifizierung wurden auf die gesamte Punktwolke des Projektgebietes

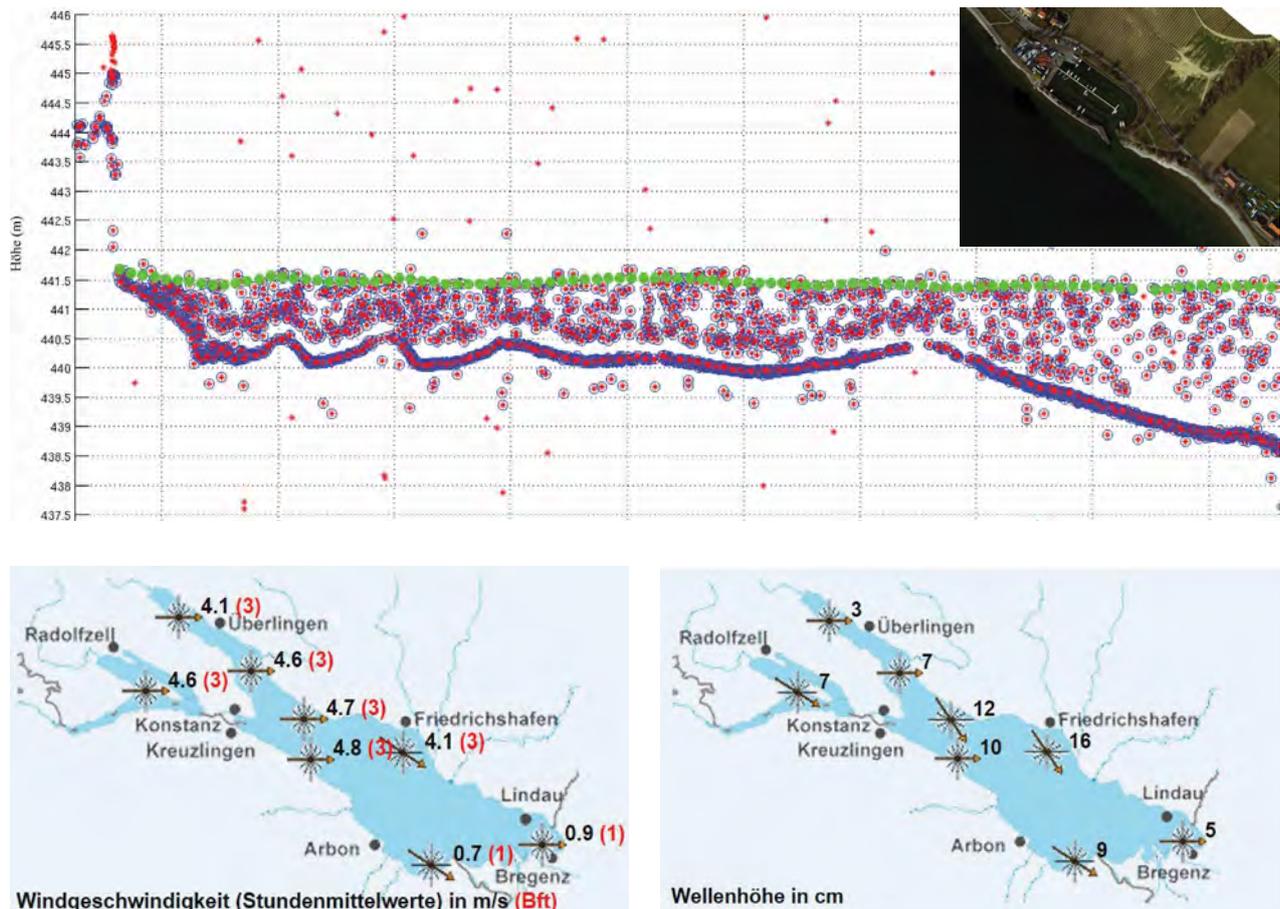


Abb. 4-11: Querprofil durch die unklassifizierte Punktwolke des Bodensees (nur Wasserseite (oben)); Messpunkte sind rot/blau umrandet und Fehlechos sind rot dargestellt). Die grünen Punkte zeigen die Lage des 99 %-Quantiles, das auf einem  $2 \times 2$  m Raster aller als Wasserkörper klassifizierten Punkte berechnet wurde. Auf dem Ausschnitt des Orthofotos (rechts oben) ist die sehr ruhige Wasseroberfläche zum Zeitpunkt der Messung deutlich erkennbar (keine brechenden Wellen am Ufer). Die modellierte Windgeschwindigkeit (in m/s und Beaufort, rot; unten links) und modellierte Wellenhöhen (in cm, unten rechts) für den Bodensee am 14. Juli 2015 um 12 Uhr. Quelle: <http://www.bodenseeonline.de>.

übertragen und das Ergebnis im Anschluss visuell überprüft. Dann wurde auf Grundlage aller als Wasserkörper klassifizierten Punkte die Wasseroberfläche klassifiziert. Die Punkte des Wasserkörpers wurden auf ein  $2 \times 2$  m Raster abgebildet und das 99 % Quantil berechnet (Abb. 4-11), das der gemittelten Höhe der obersten Punkte des Wasserkörpers entspricht. Für die Klasse Wasseroberfläche werden die Messpunkte 5 cm oberhalb und 20 cm unterhalb des 99 %-Quantiles ermittelt und klassifiziert.

Im Anschluss wurden die auf der Landseite als „Rest“ (d.h. Vegetation/Gebäude) klassifizierten Messpunkte nach Vegetation und Gebäude

unterschieden (Abb. 4-12). Die Unterscheidung beruhte dabei hauptsächlich auf der Orientierung der Normalvektoren die auf Dachflächen zumeist in eine einheitliche Richtung weisen. Bei diesem Ansatz werden Messpunkte, die beispielsweise Autos, Straßenlaternen, Strommasten und -leitungen abbilden, automatisch als Vegetation klassifiziert, die mit einer aufwändigen manuellen Nachbearbeitung korrigiert wurden. Die als Vegetation klassifizierten Punkte wurden im letzten Schritt der Klassifizierung entsprechend ihrer Wuchshöhe weiter differenziert (Tabelle 4-4). Die Ergebnisse der automatischen und manuellen Punktwolkenklassifizierung wurden abschließend überprüft und wenn nötig manuell korrigiert.

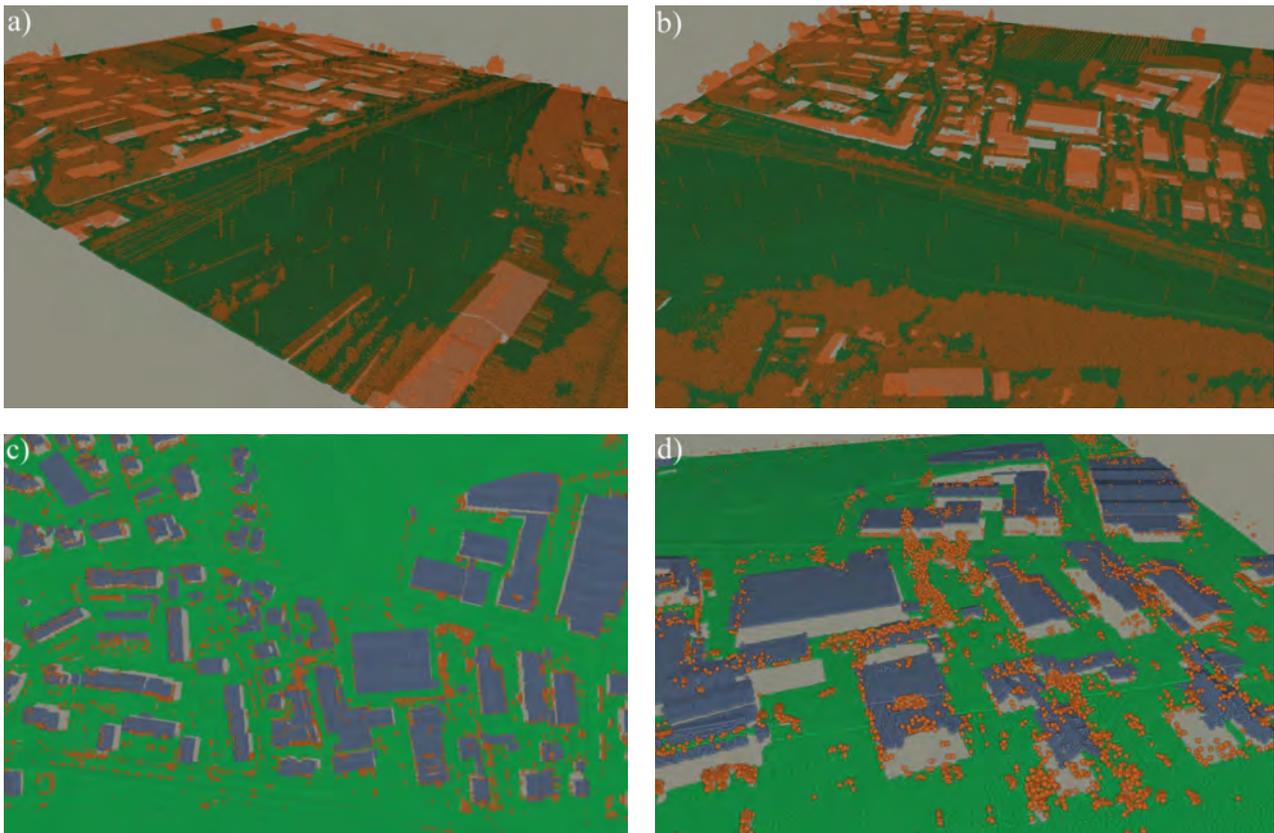


Abb. 4-12: Beispiele für die automatisierte Klassifizierung des Hinterlandes mit HydroVISH: Unterscheidung zwischen festem Boden (grün) und dem Rest (= Gebäude und Vegetation, orange, (a, b)). Unten ist die Unterscheidung zwischen festem Boden (grün), Vegetation (orange) und Gebäuden (grau) gezeigt (c, d).

#### 4.3.3 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 die Lage des Wasserspiegels zum Zeitpunkt der Vermessung definieren (Tabelle 4-5). Diese Punkte dienen als Grundlage zur Modellierung der Wasserober-

fläche 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. 4-13).

Zum Zeitpunkt der Messungen herrschte geringer Wind (0-15 km/h = 0-4 m/s; siehe Abschnitt 4.2.3) mit niedrigen Wellen von etwa 10–15 cm Höhe. Das Vorhersagemodell Bodensee-online errechnet für den 15. Juli 2015 bei einer gemessenen Windgeschwindigkeit von 0,7-4,9 m/s aus westlichen Richtungen eine Wellenhöhe von 3-16 cm (Abb. 4-11). Ähnliche maximale Wellenhöhen lassen sich für die sehr ruhigen Windbedingungen zum Zeitpunkt der Befliegung ableiten und sind, auch aufgrund der im Orthofoto erkennbaren ruhigen Wasseroberfläche, plau-

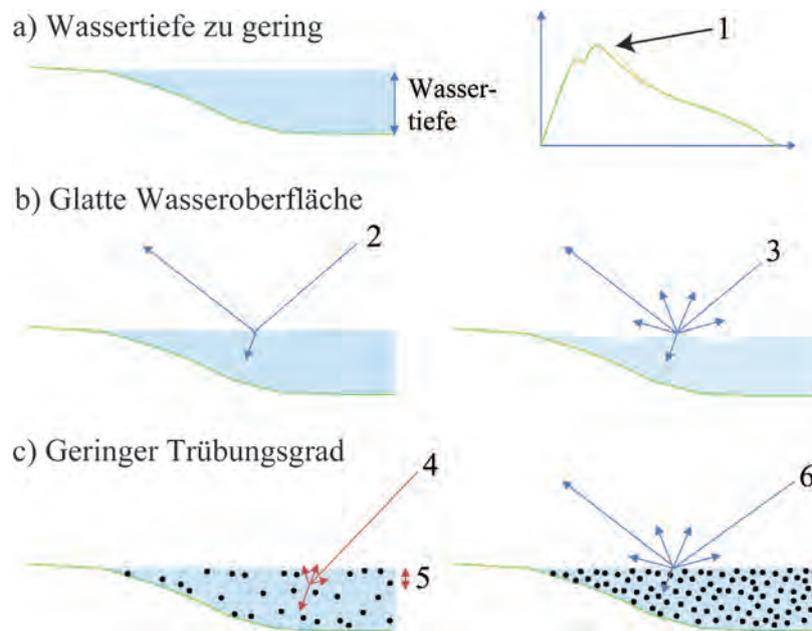


Abb. 4-13: Die Streuung der Wasserspiegelpunkte ist abhängig von der Wassertiefe (a), von der Lage der Wasseroberfläche zum Messzeitpunkt (b) und der Trübung innerhalb der Wassersäule (c). Der Laserscanner ist zugleich Sender und Empfänger des ausgesendeten und empfangenen Laserpulses; bei 1) ist der Zeitunterschied zu klein, so dass keine Unterscheidung zwischen Wasseroberflächen- und Sohlecho möglich ist (Tiefe ca. 15 cm); 2) eine 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.

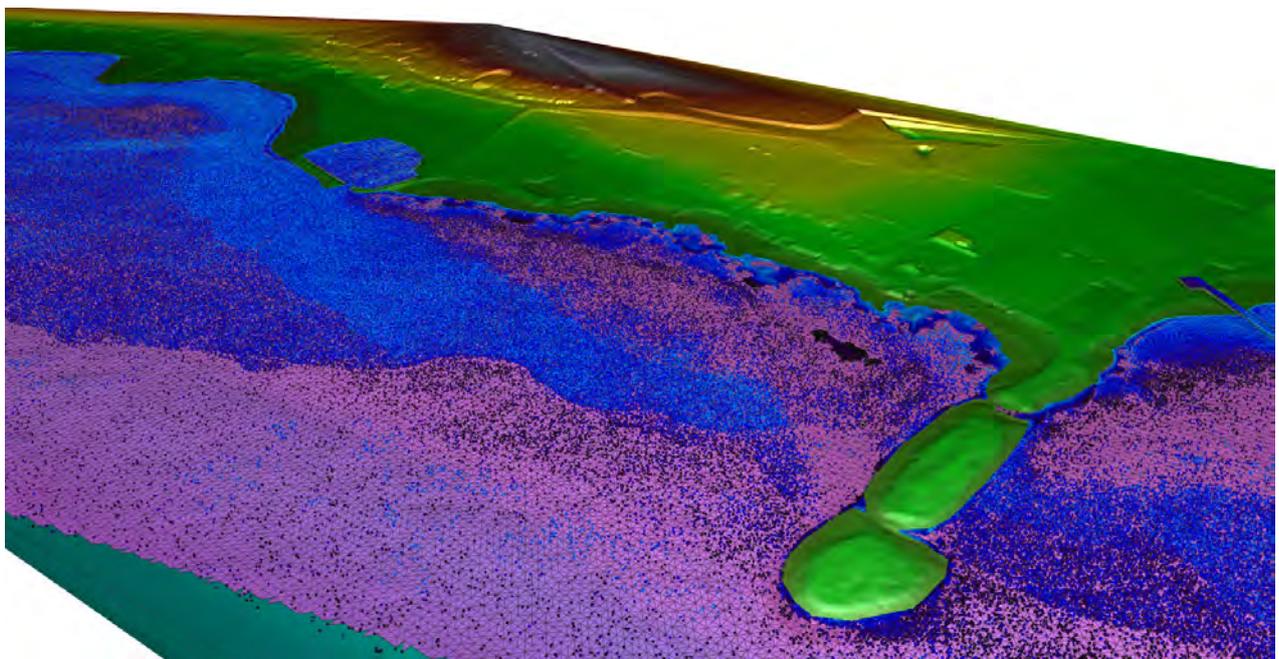


Abb. 4-14: Trianguliertes Wasseroberflächenmodell (magenta), klassifizierte Wasserspiegelpunkte (blau) und digitales Geländemodell (nach der Höhe eingefärbt) des Bodensees (die Dorniermole bei Friedrichshafen).



Abb. 4-15: Schematische Darstellung zur Berechnung der Refraktion.

sibel (Abb. 4-10). Bei einer Laserfootprintgröße von 0,5 m (Tabelle 4-1) wird so 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 wurden (s. Abb. 4-11).

Das Wasseroberflächenmodell wurde für die Refraktionsberechnung in Elementgrößen von 1,5 m bis 5 m Kantenlänge aufgelöst (Abb. 4-14). Nur die obersten Punkte der klassifizierten Wasseroberflächenpunkte (99 %-Quantile) wurden 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 wurden die so ermittelten Höhen der Rasterpunkte miteinander trianguliert, um damit die Refraktion zu berechnen. Zusätzlich war eine Extrapolation der Wasseroberfläche notwendig, da in sehr seichten Gewässerabschnitten mit einer Wassertiefe unter 15 cm die Wasserspiegelhöhe mit der verwendeten Lasertechnologie nicht erfasst werden kann (Abb. 4-13). Das Wasseroberflächenmodell wurde bis zur Uferlinie des Bodensees ausgedehnt und dort mit dem Geländemodell zur Ermittlung der Wasseranschlaglinie verschnitten.

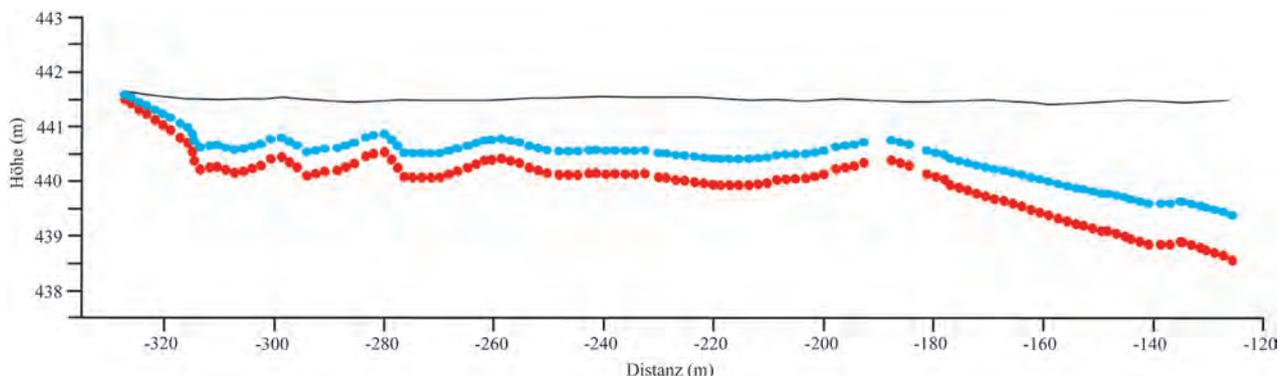


Abb. 4-16: Querschnitt für klassifizierte Sohlpunkte am Bodensee vor (rot) und nach Berechnung der Refraktion (blau). Modellierter Wasseroberfläche in schwarz.

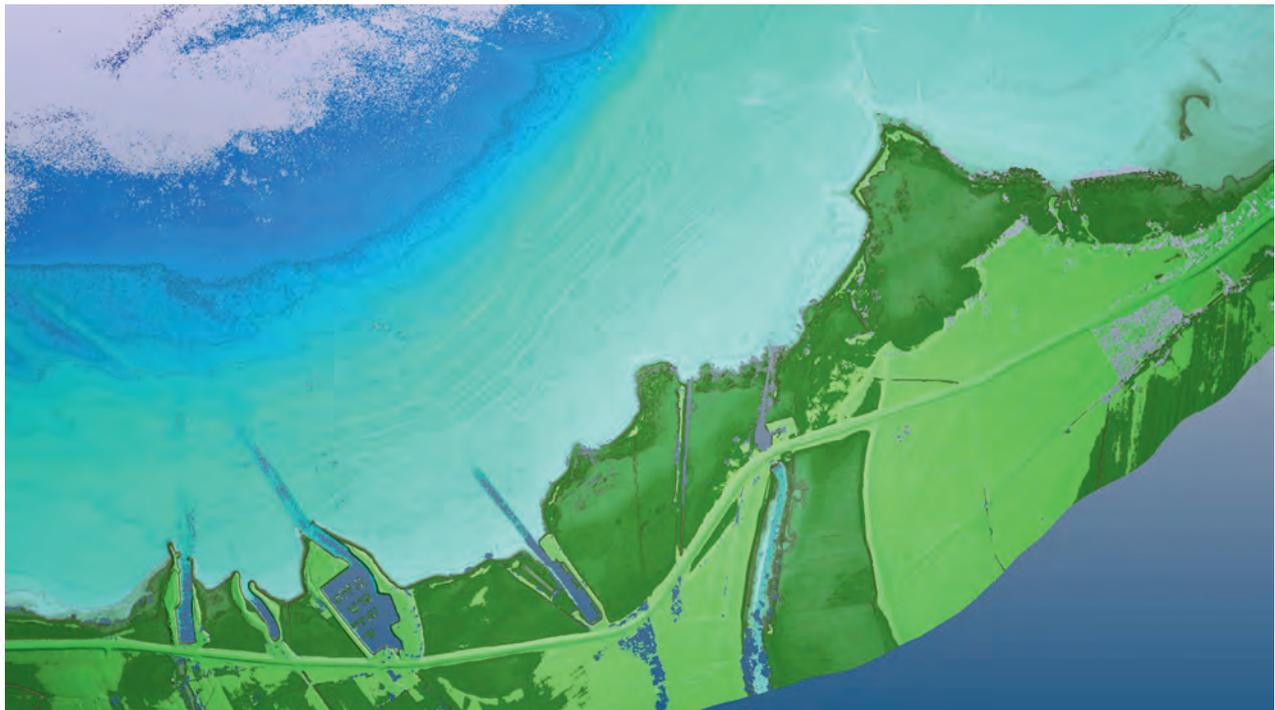


Abb. 4-17: Boden- und Sohlpunkte der Flachwasserzone am Rohrspitz westlich der Rheinmündung. Die komplexe Morphologie des Seebodens wird gut sichtbar (visualisiert mit HydroVISH).

### Berechnung der Refraktion

Bei der Refraktion wird für alle Messpunkte unterhalb der Wasseroberfläche die korrekte Tiefenlage und Position berechnet. Als Ausgangsdatenätze wurden die Punktwolke mit dem Zeitstempel für jeden Messpunkt, das triangulierte Wasseroberflächenmodell und die Flugtrajektorie mit dem Zeitstempel für jeden Punkt der Trajektorie benötigt. Prinzipiell wurde zunächst ein Punktepaar mit gleichem Zeitstempel (Punkt P aus der Trajektorie und Punkt Q aus der Punktwolke) sowie deren Verbindungsvektor betrachtet (Abb. 4-15). Daraus wurde der Punkt ermittelt, wo der Strahl P-Q die Wasseroberfläche S schneidet. Damit wurde der Winkel bestimmt, um den Strahl hinsichtlich seines Refraktionswinkels zu korrigieren. Zudem wurde die Weglänge des Strahls S-Q unter Wasser ermittelt, um die Laufzeitkorrektur bezüglich des Refraktionsindex vorzunehmen.

Mit dem Refraktionsindex von 1,33 für Wasser und 1,000292 für Luft wurde die Längenkorrektur wie folgt berechnet:

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

Die Winkelkorrektur wird mit dem Brechungsgesetz nach Snellius berechnet:

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

Bei einer Temperatur von 20°C und einer Wellenlänge von 532 nm hat Schweres Wasser einen Refraktionsindex von 1,3301 (Kedenburg et al. 2012). Der Refraktionsindex erhöht sich bei fallender Wassertemperatur (Tilton & Taylor, 1938; Daimon & Masumara, 2007). So erhöht sich der Refraktionsindex von destilliertem Wasser um ca. 0,001 von 1,3350164 bei 20°C auf 1,3359939 bei 0°C (Tilton & Taylor, 1938). Selbst bei einer Erhöhung des Refraktionsindex von 1,33 auf 1,34 beträgt der Einfluss der Refraktion bei einer Wassertiefe von 2,5 m lediglich 1,25 cm, bei 5 m Wassertiefe 2,5 cm und 3,75 cm bei einer Tiefe von 7,5 m. Da Änderungen des Refraktionsindex auf Grund der in-

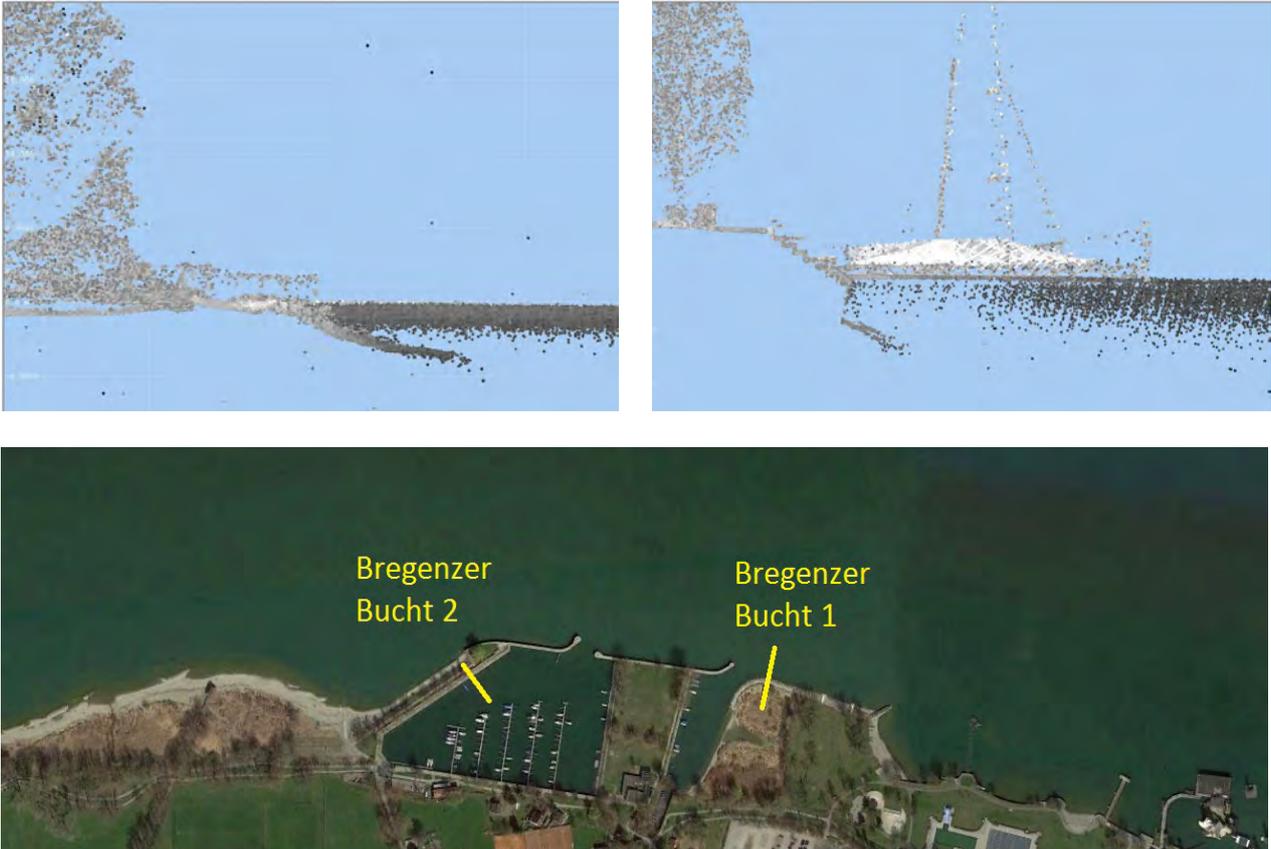


Abb. 4-18: Reduzierte Eindringung des Laserstrahls in einem Hafenbecken und in der Flachwasserzone.

homogenen Temperaturverteilung im Bodensee nur minimale Änderungen bezüglich der refraktierten Wassertiefe in der Größenordnung von wenigen mm ergeben, wurde ein Refraktionsindex von 1,33 für Wasser verwendet (vgl. Hecht & Zajac, 2003).

In Abbildung 4-15 ist zur Veranschaulichung die Situation vor und nach Durchführung der Refraktion für einen beispielhaften Querschnitt entlang der klassifizierten Sohlpunkte am Bodensee dargestellt. Die korrigierten Sohlpunkte (in blau) liegen nach der Refraktion deutlich oberhalb ihrer ursprünglichen Position (in rot). Geländepunkte oberhalb des Wasserspiegels bleiben von der Refraktion unberührt (Abb. 4-16).

#### 4.3.4 Digitale Geländemodelle und Datenlücken

Die klassifizierten Bodenpunkte und Sohlpunkte unter der Wasseroberfläche dienten als

Grundlage für die Ableitung digitaler Geländemodelle (Abb. 4-17). Dazu werden die in einer höheren Messdichte vorliegenden Punkte auf unterschiedliche Gittergrößen abgebildet. Da die öffentlich zugänglichen Echolotdaten in einer Rasterweite von 3 m vorliegen, wurden die Daten des topobathymetrischen Scans auf diese Auflösung abgebildet. Hierzu wurde der Mittelwert über alle in der Messzelle befindlichen Messpunkte gebildet und dieser Höhenwert in der Zellmitte repräsentiert.

Trotz der sehr sensitiv eingestellten Laserempfangseinheit und den Flügen zur Nachverdichtung der LiDAR-Daten (Befliegung vom 02. Mai 2015) konnte nicht überall die Eindringtiefe von ca. 5 m Wassertiefe für einen lückenfreien Anschluss an die Fächerecholotdaten erreicht werden. Hierfür gibt es mehrere Gründe: Vor allem im Bereich der Bregenzer Ache gab es einen deutlichen Eintrag von Trübung durch den Fluss. Teilweise lag auch (durch einen eher dunklen Seeboden, z.B. in Ha-

fenbecken) die maximale Eindringtiefe bei 3-4 m (Abb. 4-18). In der Fussacher Bucht lagen die Eindringtiefen durch den außerordentlich dichten Bewuchs sogar noch niedriger. Hier machte sich die zeitliche Verschiebung der späteren Datenaufnahme im Juni 2014 bedingt durch technische und administrative Gründe (defekte Laserquelle bzw. langwieriges Genehmigungsverfahren für die Befliegung im Naturschutzgebiet) bei einem höheren Wasserstand und voll entwickeltem Bewuchs sehr negativ bemerkbar.

#### 4.4 Luftbilder: Vom Einzelbild zum Orthofotomosaik

Die während der Laserscanning-Befliegung aufgenommenen Mittelformat-Luftbilder wurden in mehreren Schritten zu einem Gesamtbild mosaikiert (Abb. 4-19). Dazu wurden die einzelnen Luftbilder zunächst mit der Software APS (Automatic Photogrammetric Processing Station, Menci Software) absolut im Landeskoordinatensystem und relativ zueinander orientiert (Aerot-

rianulation). Zur Verbesserung der Lagegenauigkeit und als Bestandteil der Qualitätssicherung wurden ca. 300 über das Projektgebiet verteilte Passpunkte erfasst (Abb. 4-20). Die Koordinaten für ca. 80 Passpunkte wurden aus den zuvor georeferenzierten Laserscandaten abgeleitet und die verbleibenden ca. 220 Passpunkte wurden auf Grundlage verfügbarer online-Dienste bestimmt (WMS Baden-Württemberg, ESRI Basemap, WMS Ortho-Fotos des Landes Vorarlberg, DOP-Viewer der Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie). Die Entzerrung der Luftbilder zu Orthofotos wurde mit den amtlichen digitalen Geländemodellen der beteiligten Vermessungsverwaltungen durchgeführt. Die Mosaikierung erfolgte anschließend mit der Software OrthoVista (Trimble), dabei wurden ca. 22.000 (gegenüber der originalen Aufnahme stark komprimierte) Bilder mit einem Datenvolumen von ca. 120 GB verarbeitet. In der vollständigen Prozesskette wurde ein Datenvolumen von ca. 7 TB verarbeitet. Am Ende wurden die Einzelbilder im jpg-Format und das Orthofotomosaik im tif-Format als 1 x 1 km große Kacheln übergeben.

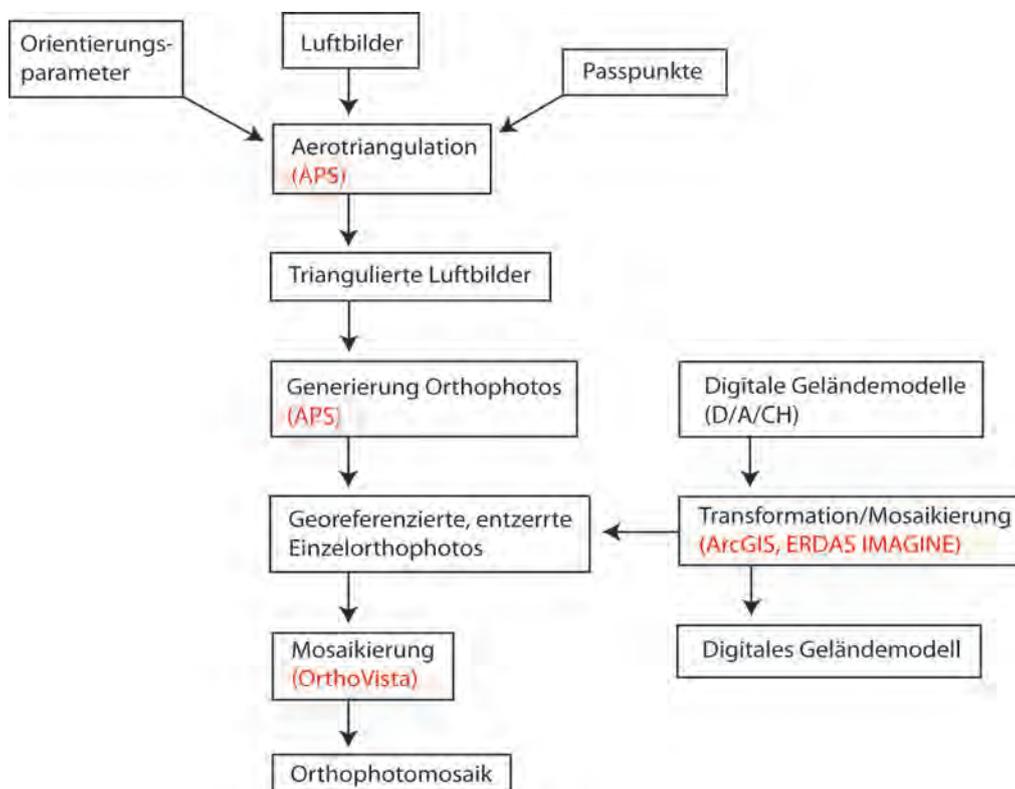


Abb. 4-19: Arbeitsschritte zur Erstellung des Orthofotomosaiks für die Uferlinie des Bodensees.

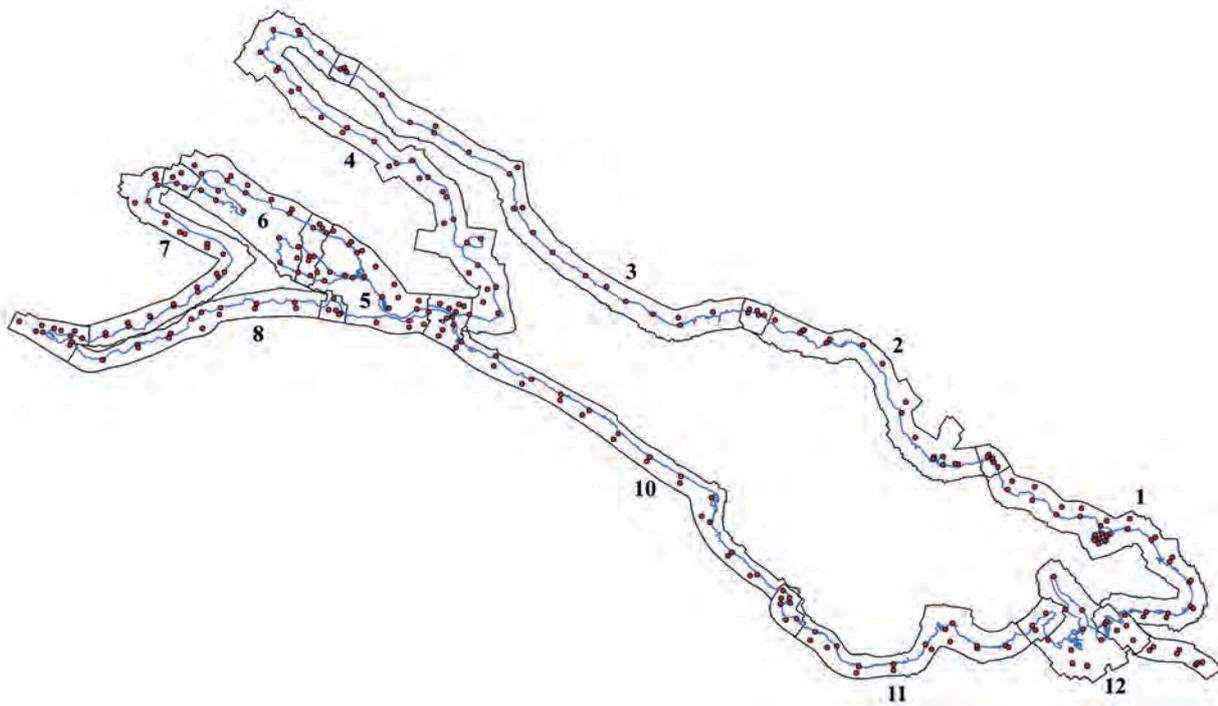


Abb. 4-20: Übersicht der 11 Bildblöcke (schwarze Umrisslinien) und der für die Triangulation verwendeten Passpunkte (rot).

#### 4.4.1 Aerotriangulation

Bei der Aerotriangulation wird die relative Lage der einzelnen Luftbilder zueinander bestimmt. Markante Punkte wie Hausdächer bzw. Dachecken wurden bei der Befliegung aus verschiedenen Richtungen erfasst und können für die Aerotriangulation genutzt werden, da die einzelnen Luftbilder sich in großen Teilen überlappen und sich so die relative Lage dieser markanten Punkte bestimmen lässt. Die Aerotriangulation erfolgte mit der Software APS (Version 6.9.5, Menci Software, Italien), die auf die Prozessierung von Luftbildern im Mittelformat spezialisiert ist. Mehrere Algorithmen ermöglichen für unterschiedlichste Gegebenheiten die bestmögliche Triangulation.

Da im Rahmen des Projektes Tiefenschärfe eine sehr hohe Bildanzahl von ca. 22.000 Bildern aufgenommen wurde, wurden diese für die Triangulation in 11 Blöcke mit je etwa 2.000 Bildern zusammengefasst (Abb. 4-20). Um sicherzustellen, dass die einzelnen Blöcke zueinander lage-richtig sind, wurden die Bildblöcke überlappend definiert. Für die korrekte Lage wurden 303 Passpunkte erfasst und in die Triangulation der Bil-

der aufgenommen (Abb. 4-20). In den Überlappungsbereichen der 11 Bildblöcke wurden die Passpunkte außerdem in einer höheren Dichte erfasst.

#### 4.4.2 Herstellen von Orthofotos

Die Entzerrung der triangulierten Luftbilder erfolgte ebenfalls mit der Software APS und den amtlichen digitalen Geländemodellen. Diese wurden als Rasterdatensatz übernommen (Tabelle 4-6) und, falls notwendig, vor der Entzerrung der Luftbilder mit ArcGIS von ihrem ursprünglichen Koordinatensystem in das Zielkoordinatensystem UTM 32N transformiert. Das digitale Geländemodell Österreichs, welches nur mit einer Auflösung von 10 m verfügbar war, wurde durch Interpolation auf 1 m verdichtet. Des Weiteren wurden die orthometrischen Höhen mit Hilfe der amtlichen Daten zur Geoidundulation in ellipsoidische Höhen umgerechnet. Die nun in einem einheitlichen Koordinatensystem vorliegenden digitalen Geländemodelle wurden mit ERDAS IMAGINE mosaikiert, zu einem einheitlichen Datensatz zusammengefasst und für die Entzerrung der Luftbilder zu Orthofotos genutzt.

Anrainer	Auflösung	Koordinatensystem	Höhe
Baden-Württemberg	1 m	UTM32N	ellipsoidisch
Bayern	1 m	UTM32N	ellipsoidisch
Österreich	10 m	MGI GK West	orthometrisch
Schweiz	1 m	UTM32N	ellipsoidisch

Tab. 4-6: Angaben zu den amtlichen DGM-Daten der Bodensee-Anrainer.

#### 4.4.3 Mosaikierung

Die Mosaikierung der einzelnen Orthofotos erfolgte in OrthoVista (Version 6.0.1, Trimble). Die Software ist Branchenstandard und wird bei fotogrammetrischen Bildflügen zur hochautomatisierten Mosaikierung von Einzelorthofotos genutzt. Zusätzlich zum radiometrischen Ausgleich der einzelnen Orthofotos zueinander wurden Schnittlinien zwischen den Orthofotos manuell angepasst, um beispielsweise Schnitte durch Gebäude zu vermeiden. Da die Anzahl der Orthofotos und die Datenmenge außergewöhnlich groß waren, wurde auch die Mosaikierung separat für die 11 Blöcke durchgeführt (Abb. 4-20). Ein einziges zusammenhängendes Mosaik in der Zielauflösung von 7 cm konnte wegen der großen Datenmenge nicht erzeugt werden.



#### 4.4.4 Interne Qualitätssicherung

Einschränkungen für die Erstellung eines konsistenten Orthofotomosaiks waren zu Beginn der Vermessung bekannt, da eine topobathymetrische Laserscanvermessung nicht mit optimalen Flugbedingungen für die Herstellung von Orthofotos vereinbar ist. Das Entlangfliegen am Ufer und die niedrige Flughöhe führen zum Teil zu sehr kleinen Bilderausschnitten mit teilweise wenig Textur und mitunter sehr großen Rotationswinkeln. Auch sehr unterschiedliche Flughöhen führen dazu, dass die Verknüpfung der Bilder nicht einwandfrei funktioniert. Einen gewissen Anteil hat sicherlich auch das zur Verfügung stehende digitale Geländemodell, welches für Österreich – im Gegensatz zu den anderen Ländern – nur 10 m Auflösung hatte. Seamlines zwischen den Bildern wurden soweit wie möglich manuell korrigiert, in manchen Bereichen kann es aber durchaus



Abb. 4-21: Eine verbleibende Bildlücke nach der Triangulation (links) wurde durch das nachträgliche manuelle Einfügen fehlender Einzelbilder ergänzt (rot markiert, rechts).



Abb. 4-22: Orthofotomosaik mit (links) und ohne (rechts) Einbindung der Luftbilder aus der Sommerbefliegung (Mai-Juni 2014). Im linken Bild ist ein deutlicher Versatz der Bildinhalte zu erkennen.

vorkommen, dass die Schnittlinien trotzdem durch Häuser verlaufen. Insgesamt übertrifft die Bildqualität die erwarteten Ergebnisse der Luftbildauswertung.

Die Lagegenauigkeit, Vollständigkeit und Radiometrie wurden mit den Passpunkten jeweils nach der Erstellung der einzelnen Orthofotos und der Mosaik geprüft. Fehler bzw. unerwünschte Verläufe von Schnittlinien wurden geprüft und ggf. korrigiert. Auf die Ergebnisse wird in den nächsten Abschnitten eingegangen.

### Vollständigkeit

Für das Projekt Tiefenschärfe mussten zwei, zeitlich relativ weit auseinander liegende Befliegungskampagnen (29./30. März 2014 und 31. Mai/11. Juni 2014) zu einem Gesamtmosaik zusammengefasst werden. Eine getrennte Mosaikierung beider Befliegungskampagnen war nicht sinnvoll, da sich aus der Sommerbefliegung (31. Mai/11. Juni 2014) kein vollständiges Mosaik ableiten lässt, da im Sommer nur Teilabschnitte des Projektgebietes (z.B. im Rheindelta) aufgenommen wurden. Dabei wurde teilweise nur ein Streifen bzw. ein sehr enger Flugkorridor befliegen, weshalb mit den Bildern keine sinnvolle Verknüpfung zu dem großen Mosaik möglich war und für eine sinnvolle Verknüpfung mindestens zwei nicht zu stark überlappende Streifen notwendig sind. Wird nur ein Streifen oder bei mehreren Streifen mit einer fast vollständigen

Überlappung geflogen, ist keine Verknüpfung der Bilder möglich bzw. der verknüpfte Bildverband ist in diesen Bereichen sehr instabil.

Die Luftbilder der beiden Flugkampagnen zeigen deutlich unterschiedliche Vegetationsphasen und haben zudem sehr unterschiedliche Belichtungseinflüsse. Weiterhin sind auf den Mittelformat-Bildern mitunter ausschließlich homogene Bildinhalte zu sehen. Von den 22.258 aufgenommenen Luftbildern konnten am Ende 14.637 erfolgreich trianguliert werden. Am ISF sind hierzu zwei Tabellen hinterlegt, die Informationen über die Verwendung der ca. 14.600 triangulierten Bilder für die 11 Bildblöcke enthalten, und Informationen zu den ca. 7.600 nicht triangulierten Bildern.

Nicht oder nicht hinreichend trianguliert werden konnten Bilder mit hohem Anteil homogener Flächen (z.B. Wasser, Wald, Wiese, Feld) und Bilder aus unterschiedlichen Befliegungskampagnen (29./30. März 2014 bzw. 31. Mai/11. Juni 2014), da für das Triangulieren eindeutige und identische Bildpunkte in den unterschiedlichen Bildern auffindbar sein müssen. Dies war bei sehr homogenen Flächen oder weit auseinanderliegenden Aufnahmezeitpunkten (Frühjahr/Sommer), nicht oder nicht ausreichend möglich. In anderen Fällen konnten Bilder auf Grund der Flugkonstellation nicht trianguliert werden, weil beispielsweise die Rollwinkel zu groß waren. Stellenweise mussten fehlende Bildinhalte nach

der Triangulation durch das manuelle Einfügen von Einzelbildern nachträglich ergänzt werden (Abb. 4-21).

### Geometrische Qualität

Die Lagegenauigkeit der Bilddaten zu den Passpunkten (Abb. 4-20) und zwischen den einzelnen Bildern liegt zwischen wenigen Zentimetern und maximal mehreren Metern. Das unzureichende Auffinden von eindeutigen identischen Bildpunkten führte nicht nur dazu, dass Bilder vollständig aus der Triangulation herausfallen konnten, sondern auch zu einer unzureichenden Lagegenauigkeit triangulierter Bilder. Weiterhin haben große Rotationswinkel und nicht parallele Streifen bei der Befliegung einen negativen Einfluss auf die Lagegenauigkeit, weshalb vor allem Bildstreifen der Sommerbefliegung (31. Mai/11. Juni 2014) teilweise aus der Mosaikierung entnommen werden mussten. Zudem war der Lageunterschied zur Frühjahrsbefliegung mitunter sehr deutlich, weshalb diese Sommerbilder für das finale Mosaik nicht genutzt werden konnten (Abb. 4-22).

Einige Brücken im Projektgebiet konnten zunächst nicht fehlerfrei in das Gesamtmosaik abgebildet werden und erschienen mit einem deut-



lichen Versatz im Mosaik (Abb. 4-23). Dieser Versatz kann unterschiedliche Ursachen haben: Der Versatz hängt z.B. von der Höhe der Brücke über dem Gelände und dem Abstand der Brücke zum Projektionszentrum ab. Zudem spielt das Format der Luftbilder (Mittelformat), eine entscheidende Rolle da insbesondere längere Brücken mit diesem Bildformat nicht vollständig in einem Bild erfasst werden, sondern über mehrere Bilder verteilt werden wodurch ein Versatz an den Bildrändern entstehen kann. Das sollte durch die Definition von Seamlines reduziert werden, es gab bei der Mosaikierung aber unerwünschte Verkippen. Daher wurden die betreffenden Luftbilder planar entzerrt, in das Gesamtmosaik eingefügt und der Versatz auf ein Minimum beschränkt (Abb. 4-23).

### Radiometrische Qualität

Der radiometrische Ausgleich zwischen den Orthofotos wurde mit der Software OrthoVista vollautomatisch durchgeführt. Zwischen den Bildern einer Befliegungskampagne (29./30. März 2014 bzw. 31. Mai/11. Juni 2014) konnte der Ausgleich gut durchgeführt werden. Bei den Bildern der beiden Befliegungskampagnen im Frühjahr bzw. Sommer war dies nicht vollständig möglich, da die Unterschiede hinsichtlich Hellig-

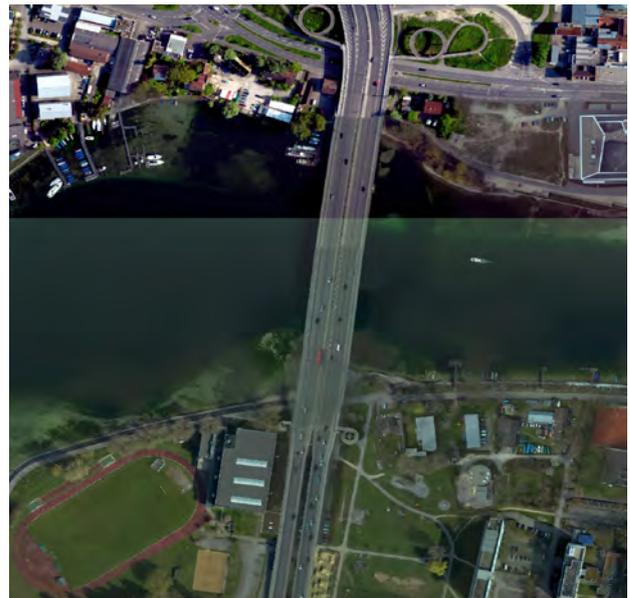


Abb. 4-23: Der Versatz an Brücken im Orthofotomosaik (links) konnte durch eine planare Entzerrung der Luftbilder auf ein Minimum reduziert werden (rechts).



Abb. 4-24: Radiometrischer Unterschied der Luftbilder aus der Messkampagne im Sommer links (31. Mai/11. Juni 2014) und im Frühjahr rechts (29./30. März 2014). Die rot angedeutete Seamline zwischen den Bildern wurde von Hand angepasst, um einen Farbübergang in Gebäuden zu vermeiden.

keit, Kontrast und vor allem in der Bedeckung der Vegetation zu groß waren (Abb. 4-24). Zudem war bei einem Teil der Bilder die Belichtungszeit nicht korrekt, weswegen diese sehr dunkel geworden sind. Andere Bilder (vor allem von der

Sommerbefliegung) sind sehr hell und kräftig. Als Folge gibt es im Orthofoto lokale Unterschiede bezüglich Helligkeit und Kontrast.

## 5 Qualitätssicherung der Vermessung

Die Qualitätssicherung, im Weiteren kurz QS genannt, bestand aus der fachlichen Projektbegleitung über die gesamte Laufzeit und der Qualitätskontrolle der Daten durch Prüfung und Sichtung der jeweiligen Produkte. Gegenstand und Grundlage der Qualitätssicherung ist die in der Ausschreibung vom Februar 2013 dokumentierte Leistungsbeschreibung.

### 5.1 Rahmenbedingungen für die Qualitätssicherung

Der im Anhang gezeigte Auszug aus der Leistungsbeschreibung zur Qualitätskontrolle um-

fasst die in den folgenden Kapiteln erläuterten Arbeiten. Hauptteil der Arbeit war die Kontrolle der Tiefenmessungen mit dem Fächerecholot: Als vom Fächerecholot unabhängige Tiefeninformationen wurde ein Sedimentecholot verwendet (Kap. 5.2), es wurden an Land Kontrollmessungen von den Vermessungsverwaltungen und in der Flachwasserzone von der Unterwasserarchäologie durchgeführt (Kap. 5.3). In der anschließenden Bewertung der Qualitätsanforderungen an die Fächerecholotvermessung (Kap. 5.4) wurden die technischen Parameter und das Auswerten der Daten überprüft und verbessert. Die Fächerecholotdaten wurden in Überschneidungsbereichen mit den Laserscan-Daten vergli-

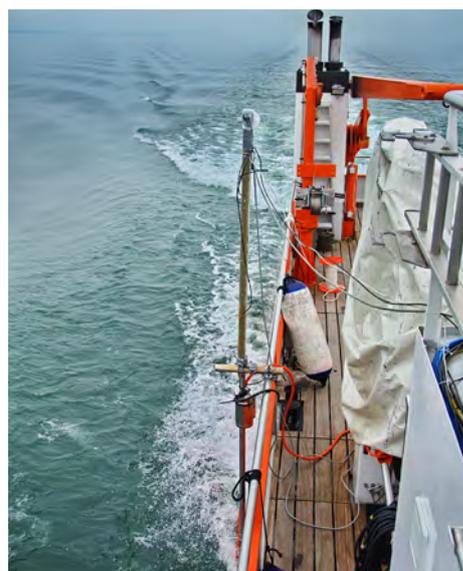
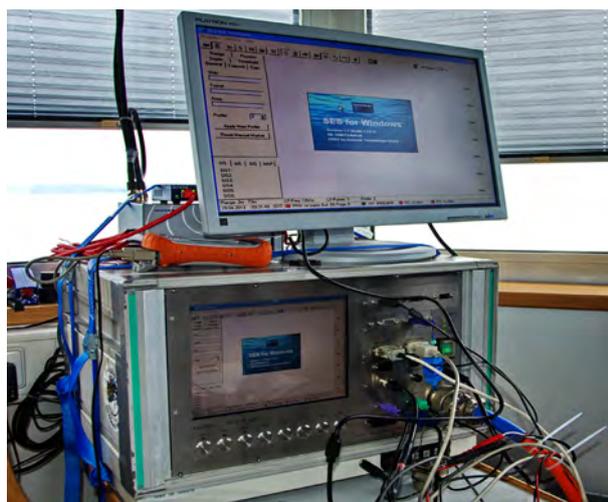
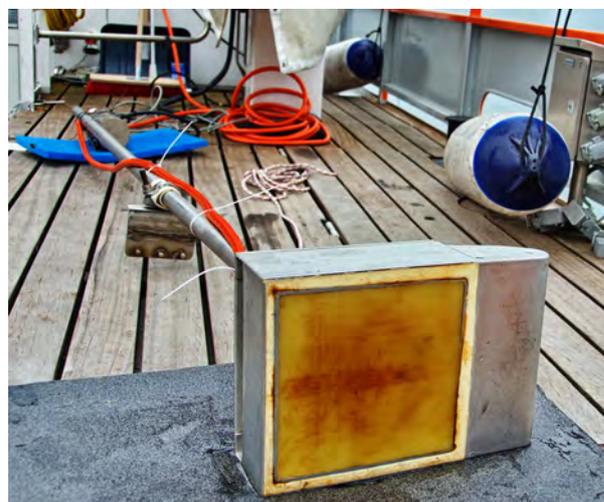


Abb. 5-1: Installation des SES-2000 auf dem Forschungsschiff Kormoran. Der sogenannte „Spargel“, ein stabiles Metallrohr wurde auf der Steuerbordseite montiert und diente als Halterung für den Schwinger, die Motion Reference Unit und das GPS (Fotos: Paul Wintersteller).

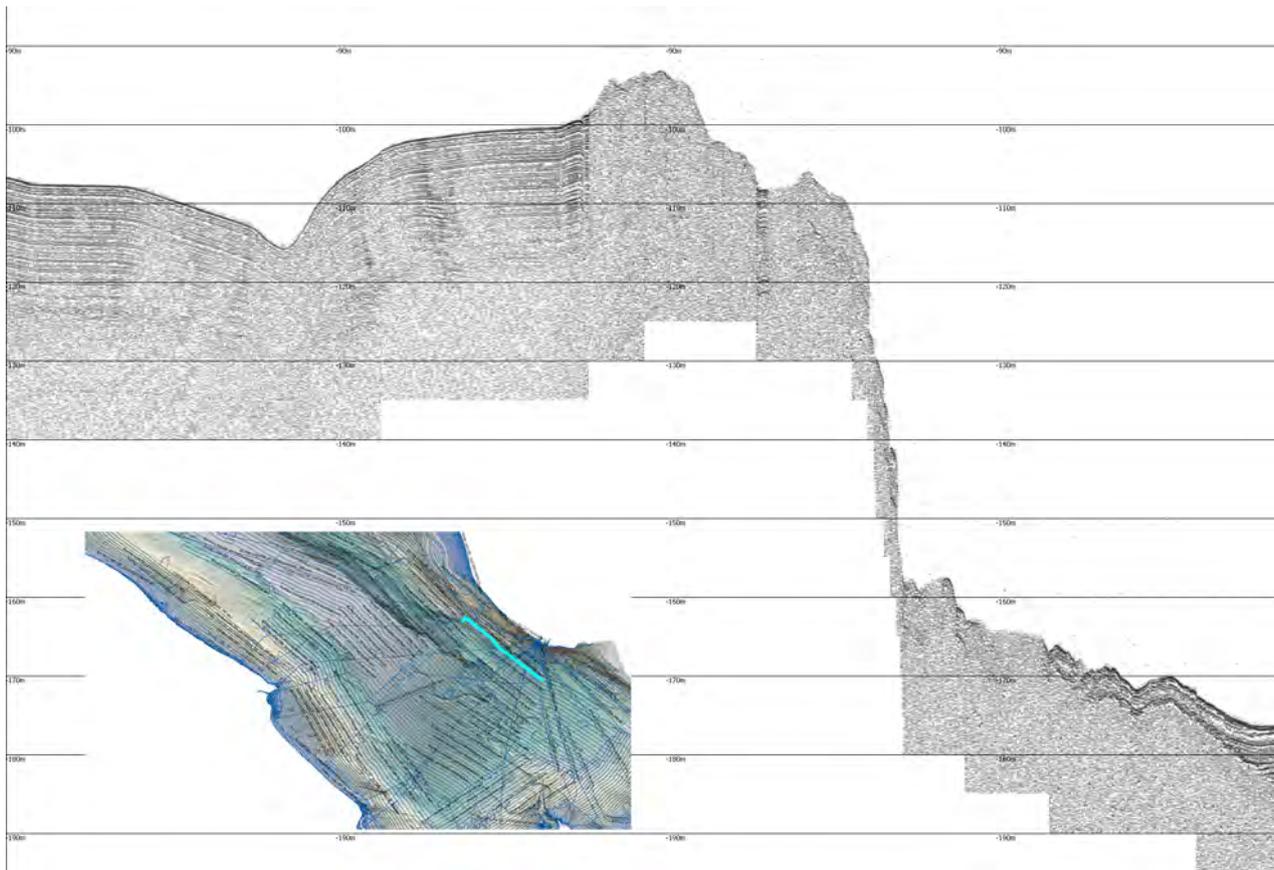


Abb. 5-2: SES-Profil vor Langenargen über einer Geländestufe. Das Signal dringt im relativ ebenen Gelände bis zu 20 m in den Untergrund ein. Steile Hänge zeigen in der Regel eine akustische Transparenz, da das zurückgestreute Signal oft im Rauschen untergeht. Auf dem Teilbild unten wird die Lage des Profils gezeigt (hellblaue Linie).

chen und mit der IGKB-Vermessung von 1990 verglichen. Die Qualität der Daten der Befliegung mit dem Laserscanner wurde begutachtet (Kap. 5.5), und die Qualität der zusammengeführten Datensätze bewertet. Die Güte der bei der Befliegung hergestellten Orthofotos wurde in Kapitel 5.6 betrachtet. Auf den Projektzeitplan und die Verzögerungen wird in Kapitel 5.7 eingegangen.

Die zentrale Aufgabe der Qualitätssicherung war eine intensive Begleitung der gesamten Vermessung. Zu dieser Begleitung gehörten das Begleiten der Vermessung mit dem Schiff an mehreren Tagen (29.04.2013, 24./25.06.2013) und das Bewerten von Protokollen und Prüfroutinen. Schon im Vorfeld der Ausschreibung und Vergabe der Fächerlotvermessung konnte die Qualitätssicherung wertvolle Unterstützung geben. Die QS unterstützte die Vorbereitungen

zur Ausschreibung der LiDAR-Befliegung und hat die Ausschreibung intensiv begleitet. Die Ausschreibung, das Angebotsverfahren und die Durchführung der LiDAR-Messungen waren Gegenstand einer Projektarbeit an der Universität Bremen (Gaide 2014).

## 5.2 Kontrolle der Tiefendaten mit dem Sedimentecholot

Das von der Firma INNOMAR hergestellte, mobile Sedimentecholot SES-2000 light wurde im Rahmen des Projektes als zusätzliche, vom Fächerlot unabhängige Tiefendatenquelle zur Validierung der Fächerlotdaten verwendet. Daneben ist es eine zusätzliche Informationsquelle für die Sedimentmächtigkeit, um in Verbindung mit den Fächerlotdaten wertvolle Informationen für weitergehende Auswertungen und eine Be-

urteilung der Fächerecholotdaten bereitzustellen (z.B. Hangrutschungen, s. Kap. 8, Masterarbeit Brückner (2016)). Das Gerät wurde fast über den gesamten Zeitraum der Vermessung im Jahr 2013, von Mitte April bis Mitte August, von der Universität Jena entliehen. Die Anlage wurde mit Unterstützung von Herrn Dr. Gerhard Daut von der Uni Jena installiert und eingemessen (Abb. 5-1). Die Abkürzung SES steht für Sediment-Echo-Sounder, synonym wird auch SBP (Sub-Bottom-Profiler) verwendet. Ähnlich wie beim Fächerlot besteht das Gerät aus einem akustischen Schwinger mit einem Empfangsteil, einer Processing-Einheit inklusive Aufzeichnungs-Rechner, einem Bewegungssensor (Motion Reference Unit, MRU) sowie einem GPS-Gerät, welches zusätzlich die Richtung (Heading) ausgibt. Das Gerät arbeitet wie ein sog. Single-Beam-Echolot mit primären Frequenzen um 100 kHz, es bedient sich jedoch darüber hinaus der Physik der Nichtlinearen Akustik und kann ein parametrisches Signal mit sekundären Frequenzen von 3-12 kHz erzeugen. Dadurch erreicht es eine Eindringung von bis zu 40 Metern in das Sediment. Wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben, wurde das Sedimentecholot mit dem Fächerlot synchronisiert, um Interferenzen zwischen den Geräten zu vermeiden.

Bis auf den Überlingersee, der bereits in den ersten Wochen vermessen wurde, gibt es flächendeckend Aufzeichnungen vom SES-2000 light. Die fehlenden Daten im Überlingersee sind anfänglichen technischen Problemen mit dem Aufzeichnungs-Rechner und dem für den Betrieb nötigen Bewegungssensor geschuldet. Dieser musste nach etlichen Korrekturversuchen neu kalibriert werden. Der Akquise-PC stürzte anfangs häufig ab, das Problem konnte in der 3. April-Woche identifiziert und behoben werden. Eine kontinuierliche Datenaufzeichnung erfolgte dann ab dem 29.04.2013. An diesem Begleit-Tag der QS wurden auch die Frequenz-Einstellungen bestimmt, die während der Messkampagne gefahren werden sollten. Eine relativ hohe Sekundärfrequenz von 10-12 kHz schien für den gleichzeitigen, synchronisierten Betrieb mit der Fächerlotaufnahme mit der KORMORAN gut geeignet zu sein. Sie bietet eine gute Eindringtiefe,

eine hohe Auflösung der oberen Sedimentschichten und vor allem eine gute Detektion der Wassertiefe (Abb. 5-2). Als Speicherformat konnte in diesem Modell des SES-2000 light lediglich das proprietäre und binäre SES-Format gewählt werden. Während der Messkampagne 2013 wurden insgesamt 2605 Profile (davon 66 mit fehlerhafter Navigation) aufgenommen. Das entspricht einer Gesamtlänge von etwa 5.239 km.

### 5.2.1 Auswertung der Sedimentecholotdaten und Vergleich mit dem Fächerecholot

Die Bearbeitung der SES-Daten erfolgte mit der INNOMAR Software ISE (v2.95). Sämtliche Profile wurden einer Koordinatentransformation, einer Interpolation auf diskrete Abstände sowie einer Wassertiefenberechnung (ohne Wasserschallkorrektur) unterzogen. Damit stehen sie für die weitere Bearbeitung bzw. den Export in offene Formate wie dem offenen Seismik-Format SEG Y zur Verfügung. Für die Vergleichsmessung zur Tiefenkontrolle, sowie für weitere, zu wissenschaftlichen Zwecken verwendete Profile, wurden diese weiter gefiltert und einer Wasserschall-Korrektur unterzogen. Ein Vergleich der Tiefenwerte ist in Abb. 5-3 unten zu sehen. Für den Vergleich mussten die ellipsoidischen DGM-Höhen (GRS80, positive Werte) mit Hilfe des Quasigeoids des BKG (vorläufiger Stand 2015) in observierte Tiefen (negative Werte) rückgerechnet werden. Bei Verwendung des 30-jährigen Mittels am (395,31 m, 1980-2010) Bezugspegel Konstanz gilt dann die Gleichung:

$$\text{Obs. Tiefen negativ} = (([HGRS80] - 395,31)^{-1} + [HQuasigeoid])^{-1}$$

Die Abbildung 5-3 zeigt insgesamt 6 SES-Querprofile mit denen Vergleichsmessungen gemacht wurden. Das gelb markierte Profil im Untersee ist gegen das MBES-Profil aufgetragen (Abb. 5-3).

Die Tiefen der Vergleichsprofile stimmen nach Korrekturen und Umrechnung zu mehr als 95 % mit einer Abweichung von deutlich <10 cm überein. Größere Abweichungen entstehen in

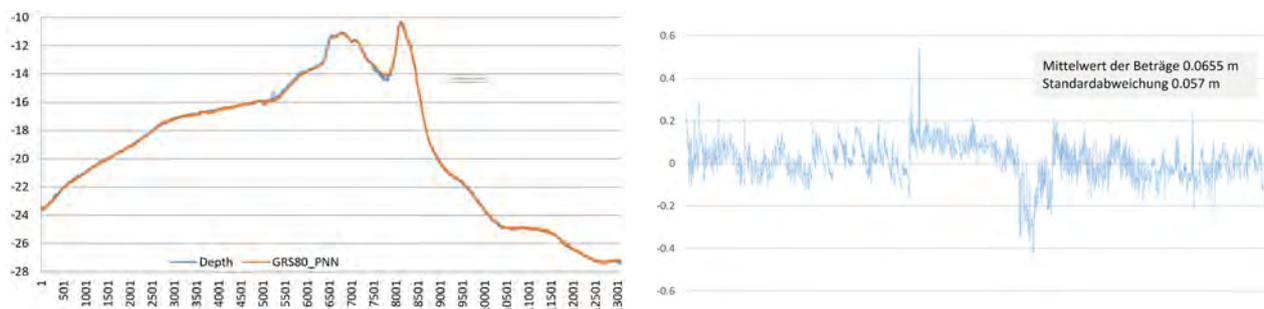
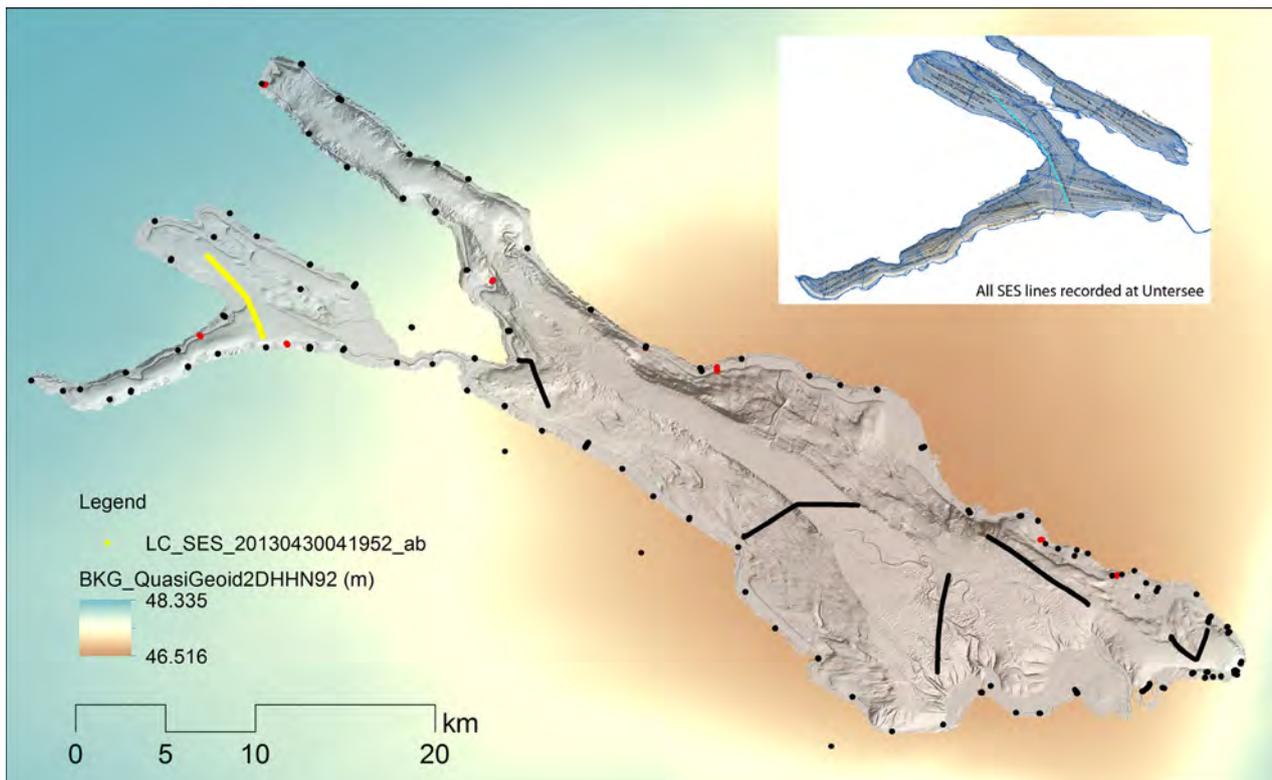


Abb. 5-3: Oben: SES-Querprofile (Linien) und Kontrollmesspunkte an Land (schwarz) und entlang von Stegen (rot). Die Darstellung ist mit einer Höheninformation des Quasigeoids in Metern unterlegt. Das Quasigeoid ist der Unterschied zwischen dem Bezugssystem über NHN und dem Referenzellipsoid GRS80. Mitte: Der Vergleich der SES-Profil-Tiefen (rote Linie (Depth)) mit den MBES Tiefen (GRS80\_PNN) aus einem 0,5 m Raster (oben). Die Daten stimmen bis auf wenige cm sehr gut überein, lediglich in Senken liegt der SBP häufig etwas tiefer. Die horizontale Achse zeigt einzelne Schusspunkte des SES. In dem unteren Bild sind die Differenzen der beiden Messungen in Metern (m) dargestellt. Die Standardabweichung der Beträge ist 0,057 m.

der Regel durch eine unzureichend genaue Bestimmung der Sediment-Wasser-Grenze. Im gezeigten Vergleich (Abb. 5-3)) ist das vor allem bei ca. 14 m Wassertiefe, in einem kleinen Becken zu sehen. Da eine Frequenz von 12 kHz bei wassergesättigten Sedimenten eine gewisse Eindringtiefe hat, kann sich dadurch die Sediment-Wassergrenze nach unten verschieben und ungenaue Tiefen erzeugen.

### 5.3 Kontrollmessungen durch Archäologie und Vermessungsverwaltungen

Von den Vermessungsverwaltungen wurden über 3400 Messwerte erhoben, die als Kontroll- bzw. Passpunkte zum Abgleich der LiDAR- und MBES-Vermessung dienen. Zudem wurde vom Referat Feuchtbodenarchäologie des Regierungspräsidiums Stuttgart (siehe Kap. 2.3) eine Vermessung entlang von Stegen in insgesamt 11 Ortschaften vorgenommen, um Kontrollmessungen

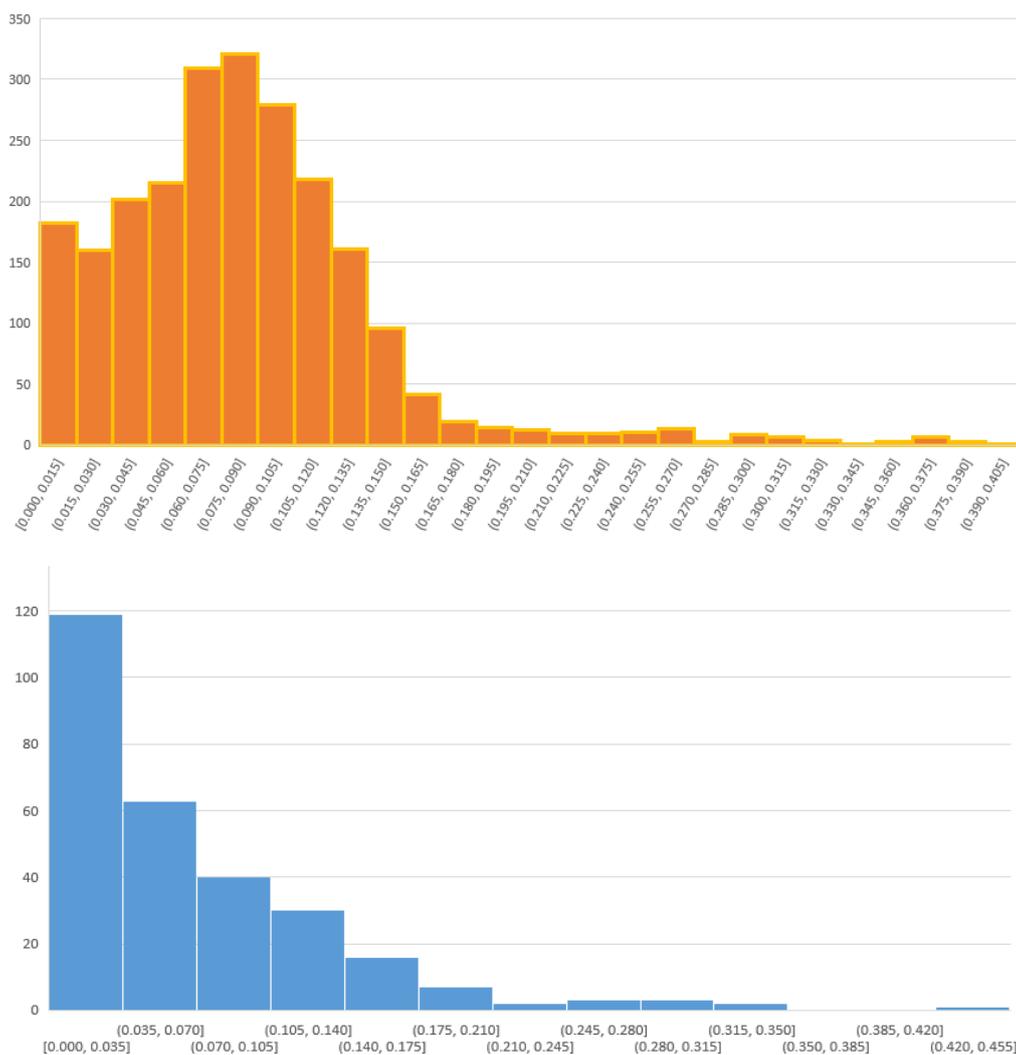


Abb. 5-4: Messfehler zwischen Passpunkten und Kontrollflächen an Land und den Werten aus dem 0,5 m DGM (oben) und zwischen Passpunkten im flachen Wasser entlang von Stegen und dem 0,5 m DGM (unten).

im Flachwasserbereich zu erhalten. Die Daten wurden kombiniert, in das einheitliche Koordinatensystem UTM32N/ETRS89 gebracht, auf ellipsoidische GRS80-Höhen gerechnet und als ESRI Shape-File respektive in einer ESRI Feature-Klasse abgespeichert.

Eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Vermessungsämter zur Einmessung der Kontrollpunkte wurde getrennt von diesem Bericht übergeben. Die Abbildung 5-3 zeigt die Verteilung der Kontrollpunkte (in schwarz). Mithilfe einer Extraktionsfunktion im Geographischen Informationssystem ESRI ArcGIS™ wurden an diesen Orten aus dem o.g. Shape-File Tiefen aus dem hochauflösten DGM (0.5 m Rasterweite) der

kombinierten Daten herausgefiltert. Diese Tiefenwerte konnten dann direkt mit den Kontrollmessungen verglichen werden (Abb. 5-4). Das Ergebnis zeigt eine gute Übereinstimmung der Vermessung mit den Kontrollpunkt-Koordinaten. Der Mittelwert (der Beträge) der Differenz von Passpunkten an Land und dem DGM liegt bei 0,084 m bei einer Standardabweichung (der Beträge) von 0,056 m. Von den insgesamt 3403 Messwerten an Land konnten hier 2304 als Differenzpaare herangezogen werden. 11,3% (385 Kontrollpunkte) fallen weg, da sie außerhalb des Vermessungsgebietes liegen. Sie dienen den Vermessungsämtern zum Einhängen in lokale Koordinatenpunkte. 20,95 % (713 Kontrollpunkte) konnten nicht verglichen werden, da es sich

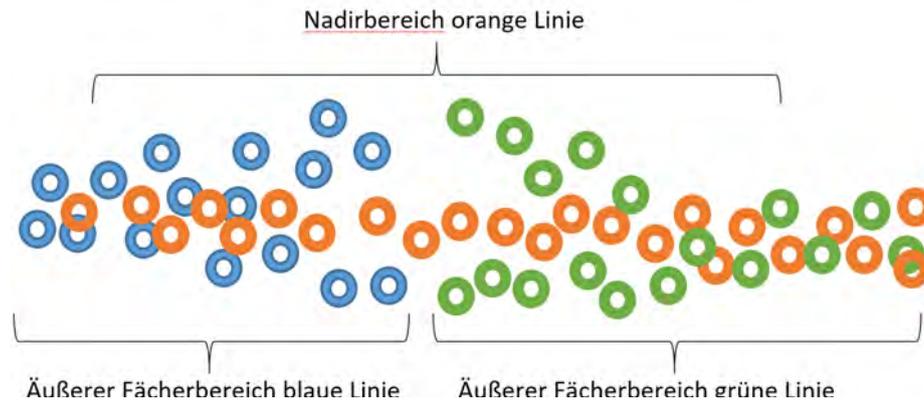


Abb. 5-5: Die äußeren Lotungen (Beams) eines Fächercholotes zeigen eine relativ große Streuung (grüne und blaue Kreise) gegenüber den zentralen Lotungen (orange-farbene Kreise), hier gezeigt anhand der Daten von drei verschiedenen Aufzeichnungslinien.

um Messpunkte an Objekten (Hausdächer etc.) handelt und zum Zeitpunkt der Berichterstellung lediglich die LiDAR-Klassen Boden (Land) und Sohle (Seeboden) vorlagen.

Bei den Passpunkten entlang der Stege konnten von 300 Werten insgesamt 286 Werte zum Vergleich herangezogen werden. Daraus errechnete sich eine mittlere Abweichung von 0,068 m.

### 5.4 Erfüllung der Qualitätsanforderungen an die Fächerlotmessungen

Der Auszug der Leistungsbeschreibung im Anhang (Kap. 10.1) zeigt zusammengefasst die

hohen Forderungen mit Hinblick auf Zeitplan, Datenqualität, Datendichte und Projektion. Um die Anforderungen zu gewährleisten, wurde nach der Auftragsvergabe in Abstimmung mit der Universität Bern eine Detailplanung sowie notwendige Protokollierungen ausgearbeitet. Die Auswertung der Fächerlotdaten erfolgte aufgrund der in Kapitel 3 beschriebenen Herausforderungen sowie aufgrund der personellen Situation (siehe Kap. 5.7) in engem Austausch mit der QS, so dass ein Teil der Bearbeitungsschritte der Datenprozessierung in diesem Kapitel genauer erläutert wird.

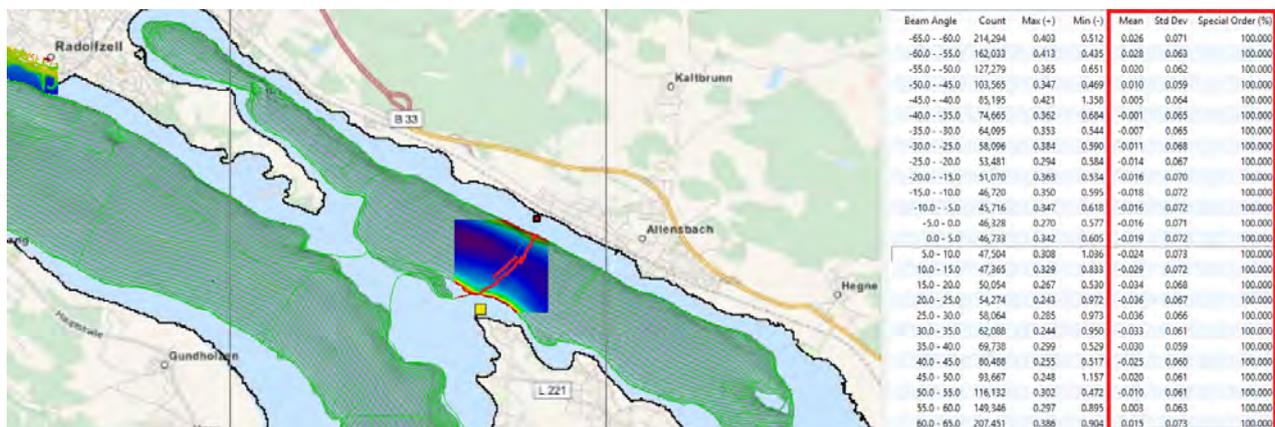
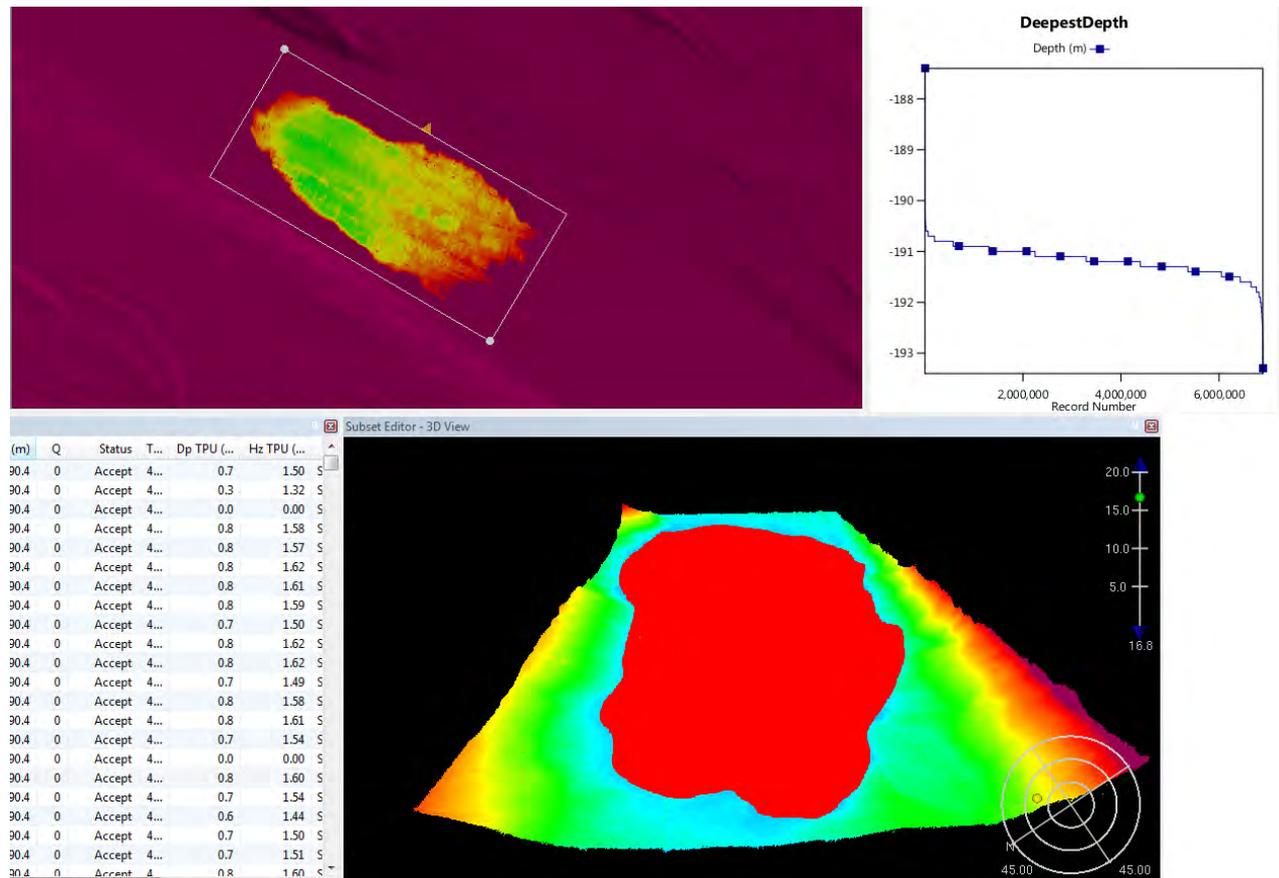


Abb. 5-6: IHO Qualitätskontrolle anhand von Querprofilen (rote Linien) im Bereich Reichenau-Allensbach (Gnadensee). Die Querprofile 0010... und 0011... werden gegen das aus den Längsprofilen erstellte DGM gerechnet.

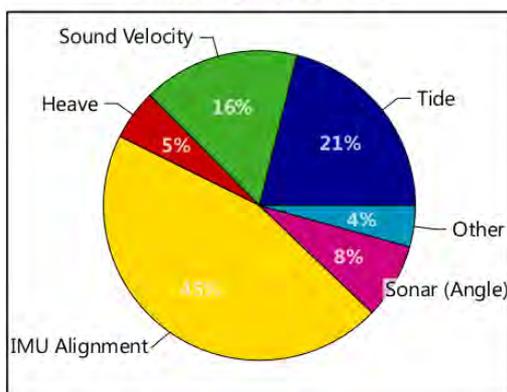
### 5.4.1 Einmessung und Kalibration des Fächerecholotes

Die Installation und Einmessung des KONGSBERG EM2040 Fächerecholotes fand, wie in Kapitel 3 beschrieben, in der Zeit vom 4. bis 13. April

2013 statt. Danach erfolgten eine Testfahrt und die Kalibration des Lotes mit den gegebenen Installationsparametern (siehe Kap. 3, Tab. 3-2). Am 5. Juni wurde das Gerät mit einer weiteren Processing-Unit der Uni Bremen/MARUM ausgestattet, um den sog. „Dual Swath“ Modus fahren zu können.



**Vertical TPU: Average of 6412960 soundings (0.501 m)**



**Horizontal TPU: Average of 6412960 soundings (1.4 m)**

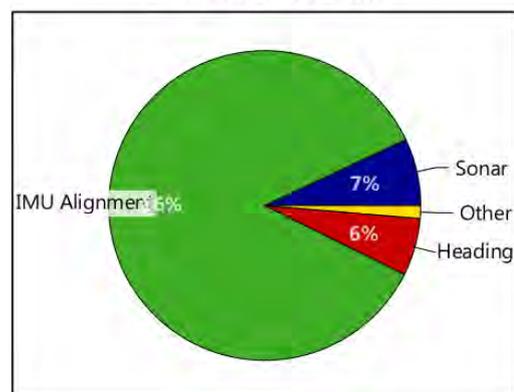


Abb. 5-7: Screenshot der Prozessierungssoftware. Der tiefste Bereich des Sees. Über 6 Millionen Datenpunkte (rote Fläche im 3D-Bild) wurden verwendet, um die statistisch tiefste Stelle zu errechnen (oben). Für die sechs Millionen Datenpunkte im tiefsten Bereich des Bodensees lassen sich prozentuale Fehlerursachen für die horizontale und vertikale „Total Propagated Uncertainty (TPU)“ angeben (unten).

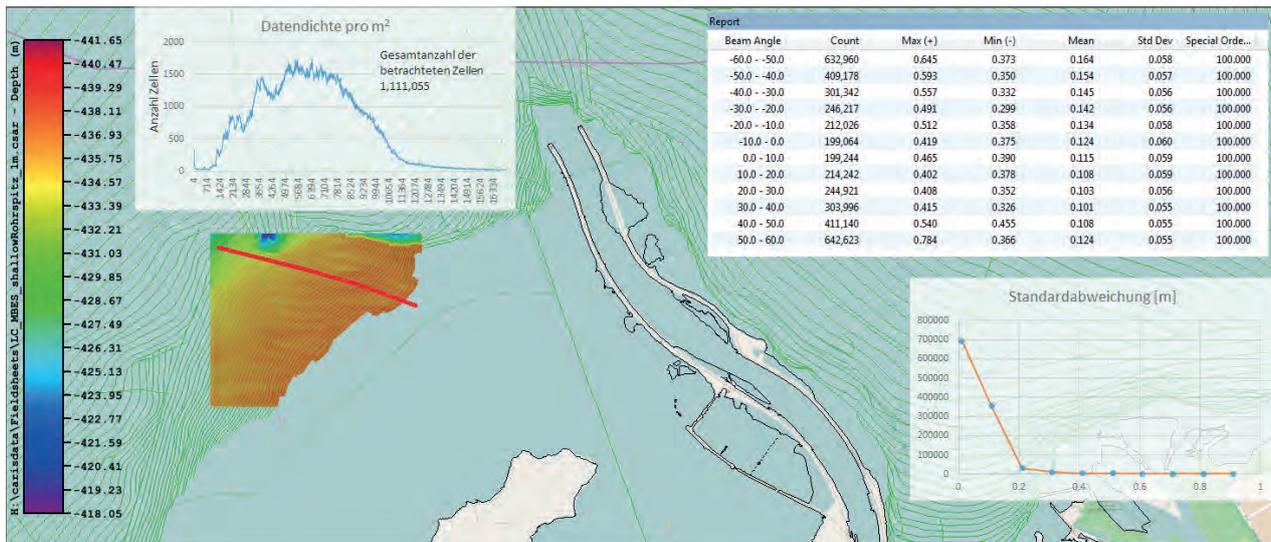


Abb. 5-8: Kontrolle einer der flachsten mit MBES vermessenen Stellen in der Nähe des Rohrspitz. Die IHO „special order“ wird zu 100 % erfüllt, die Datendichte liegt weit über die Vorgaben.

Damit wird bei gleicher Vermessungs-Geschwindigkeit die doppelte Datendichte erreicht, entsprechend lässt sich die Survey-Geschwindigkeit erhöhen. Im Zuge des Um-/Einbaues wurde die Firma KONGSBERG konsultiert, ein Techniker leistete Unterstützung und bei dieser Gelegenheit wurde eine weitere Kontrollvermessung durchgeführt, um die neuen und vorherigen Einstellungen zu prüfen und festzulegen. Im Rahmen der Kontrolle der ersten Produkte der 2013er Vermessung wurde seitens der Qualitätssicherung eine nachträgliche Rollkorrektur von  $+0,03^\circ$  vorgeschlagen und in der Nachbearbeitung angewandt (siehe Tab. 3-2).

Die 2014er Messkampagne wurde, um im sehr flachen Wasser zu fahren, mit zwei verschiedenen Wasserlinienkorrekturen (Stellung des Schwingers, siehe Kap. 3, Tab. 3-2) gefahren. Zwischen beiden Messkampagnen konnte an etlichen Tagen ein Höhenversatz von ca. 5-30 cm ausgemacht werden. Der größere Versatz konnte als falsche Wasserlinienkorrektur identifiziert und behoben werden, der Unterschied bis zu 10 cm ist einem dynamischen Tiefgang, vermutlich wegen unterschiedlicher Geschwindigkeiten bei der Aufnahme, zuzuordnen. Der Fehler liegt im Bereich der Anforderungen, ist aber in einem hochauflösenden DGM als unschön zu erkennen.

#### 5.4.2 GPS-RTK und Tidenkorrektur

Wie in Kapitel 3.2 erklärt, war während der Vermessung keine ausreichend stabile Internetverbindung gegeben, um das Korrektursignal für die GPS-Positionen kontinuierlich in Echtzeit zu verarbeiten. Daraufhin wurden, wie im Kapitel 3.4 detailliert beschrieben, die Positionsdaten im Postprocessing korrigiert. Für die Qualitätssicherung war wichtig, dass hier möglichst kleine Standardabweichungen eingehalten werden (Abb. 3-10), um die vertraglich festgelegten Voraussetzungen nach der International Hydrographic Organisation, IHO S-44 Special Order (Tab. 10-2 im Anhang) zu erfüllen.

#### 5.4.3 Korrektur der Schallgeschwindigkeit

Wie in Kap. 3.4.2 erwähnt, war die Wasser-schallkorrektur in der Nachbearbeitung eine Herausforderung. Hintergrund sind die extrem stark variierenden Wasserschallwerte, hauptsächlich bedingt durch hohe Temperaturschwankungen in dem sich erwärmenden Bodensee. Bis in eine Tiefe von ca. 50 m (siehe Abb. 3-7) ist diese Variabilität besonders groß. Viele ufernahe Profilmessungen gingen, bedingt durch die geringe Wassertiefe, oft

nur 10-15 m tief. Sie mussten trotzdem für 1-2 oder mehr Stunden Aufzeichnung genutzt werden - auch in Gebieten, in denen der See bereits deutlich tiefer ist. Damit werden tieferliegende, temperaturbedingte Sprungschichten nicht entsprechend berücksichtigt. Um dieser großen zeitlichen und räumlichen Variabilität möglichst gerecht zu werden, wurde seitens der QS der Vorschlag gemacht, die Korrektur mit einer derart großen Menge von Wasserschall-Profilen wie unten beschrieben vorzunehmen. Der Workflow wurde mit Hilfe der Programmierumgebung MATLAB® umgesetzt. Das Vorgehen ist in Kapitel 3.4.2 beschrieben.

Diese sehr aufwändige Korrektur hat deutliche Verbesserungen gebracht. An einigen Stellen (z.B. in der Bregenzer Bucht) musste zudem der Oberflächen-Wasserschall, der durch einen eigenen Sensor in der Nähe der Schwinger ermittelt wurde, durch einen Wert aus dem passenden Wasserschallprofil ersetzt werden. Trotz des Verfahrens gibt es Gebiete, in denen nach dieser aufwändigen Wasserschallkorrektur sichtbare Artefakte verbleiben, z.B. im Untersee um

die Insel Reichenau oder zwischen Lindau und Kressbronn im Obersee. Hier lassen sich extrem kleinräumige Schwankungen der Temperatur bzw. der Schallgeschwindigkeit des Oberflächenwasserkörpers durch Zuflüsse (Lindau / Kressbronn) oder auch sehr kleinräumige Wasserkörper (Untersee) vermuten. Die verbliebenen Fehler sind im Bereich von wenigen cm bis ca. 20 cm in tieferem Wasser und damit innerhalb der geforderten Fehlertoleranz. In Abhängigkeit von der Wassertiefe sind sie in sehr hoch aufgelösten DGMs als Artefakte zu erkennen.

#### 5.4.4 Manuelles Editieren und Klassifizieren der Punktwolken

Anders als erwartet, gestaltete sich diese Aufgabe als extrem zeitaufwändig. Die Ursachen dafür waren zum einen ein zuvor nicht bekannter Software-Fehler in CARIS HIPS&SIPS™, zum anderen entstand durch einen Personalausfall eine Verzögerung von über einem halben Jahr (siehe Kap. 5.7). Der Software-Fehler in HIPS&SIPS ist offensichtlich bedingt durch ein unzureichend

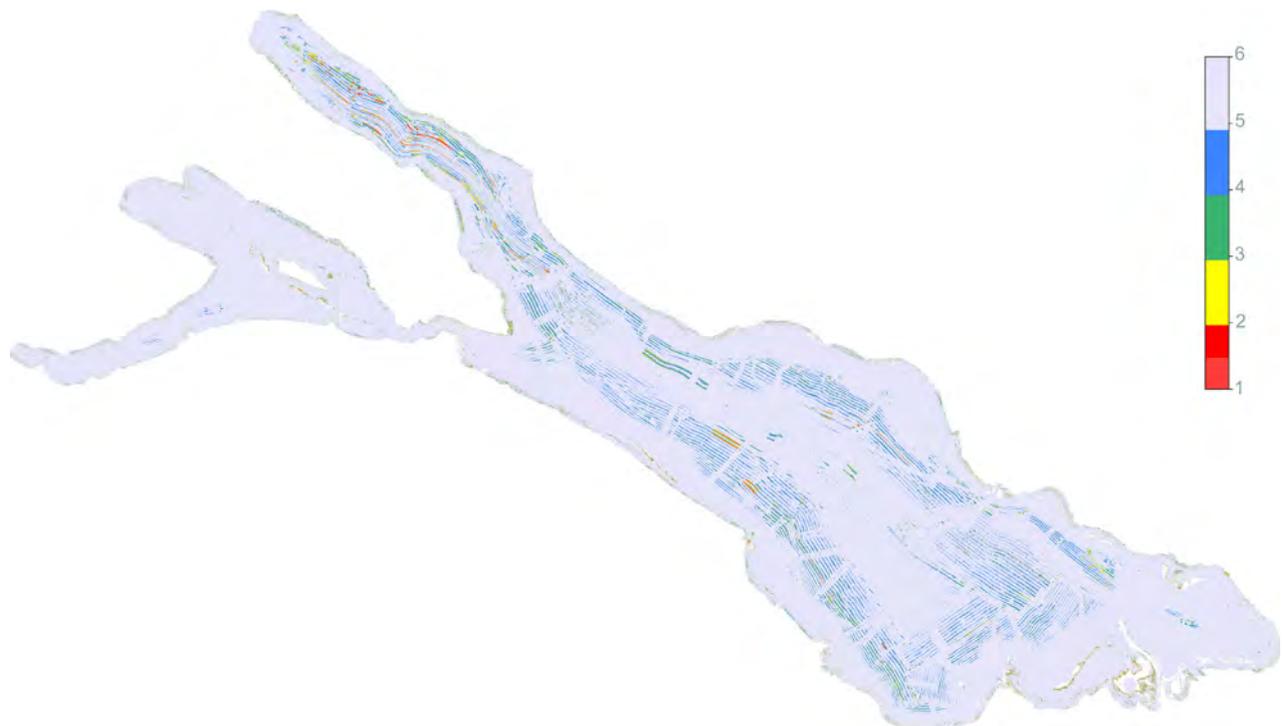


Abb. 5-9: Die Datendichte wurde nach Bereinigung des Datensatzes in 5 Klassen dargestellt. In der Klasse 5 (grau) sind alle Zellen mit einer Dichte über 5 (Datenpunkte / m<sup>2</sup>) und deutlich darüber zusammengefasst.

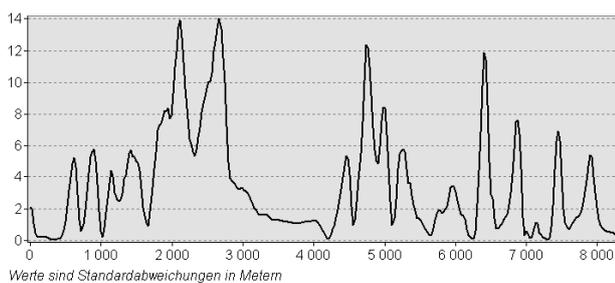
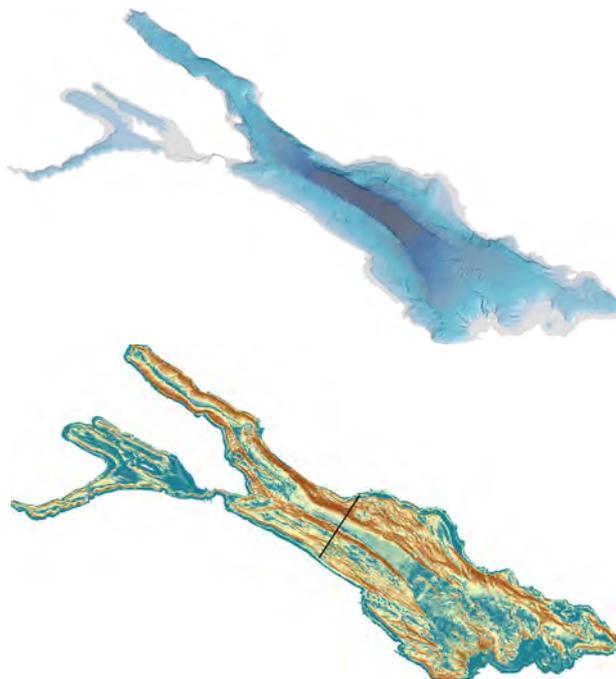


Abb. 5-10: Das Geländemodell von 1990 (oben) und die Differenz zu 2015 (mitte). Im Profil sind Unterschiede von bis zu 14 m zu erkennen. Das Differenzmodell ist zu Verdeutlichung mit einem Histogramm-gesteuerten Farbverlauf dargestellt.

durchdachtes, internes Datenbank-Schema. Die Software kennt lediglich 5 Kategorien oder Klassen von Punktwolken („accepted, rejected, examined, outstanding, designated“) mit eigentlich vordefinierten Bedeutungen. Der Vorschlag der QS zur Klassifizierung der Fächerlotdaten war, „examined“ für Wracks und Unterwasserbauten und „outstanding“ für Gasblasen und Fische in der Wassersäule sowie teilweise für Makrophyten zu verwenden. Schon nach Kennzeichnung mehrerer zehntausend Punkte als „examined“ respektive „outstanding“ wurde deutlich, dass die Speicherung weiterer Kennzeichnungen dieser Klassen wie auch das Erstellen von DGMs überproportional lange dauert.

Der Fehler wurde umgehend an den Hersteller gemeldet doch es stellte sich heraus, dass eine Behebung nicht zeitnah erfolgen konnte. Dem wurde Rechnung getragen, indem die komplette Fächerlotaufzeichnung des Bodensees räumlich in 5 Teilabschnitte getrennt wurde und wesentlich mehr Personal als anfangs kalkuliert, an den jeweiligen Teilbereichen arbeitete. Dies wurde vorrangig durch ein Team aus Bachelor- und Masterstudenten sowie zwei Promotions-Studenten der Uni Bremen ermöglicht. Insgesamt wurden ca. 160 Millionen Punkte manuell als „examined“ und „outstanding“ gekennzeichnet. Eine fast ebenso große Menge wurde „rejected“. Vor allem im äußeren Fächerbereich mussten oftmals mehr Punkte als erwartet gelöscht werden, da die Streuung dort relativ groß wurde.

Da bei einer 100-120 % Überdeckung der Linien in diesem Bereich äußerster und innerer (Nadir-naher) Fächerbereich aufeinandertreffen und der innerste Fächerbereich von diesem Typ Fächerlot sehr präzise gemessen wird, wurde die Streuung im äußeren Fächer schnell auffällig, obwohl sie innerhalb der Spezifikation liegt (s. Abb. 5-5).

Die notwendige Trennung des Gesamtprojektes in fünf Teilbereiche (Untersee, Überlingersee, unterer, mittlerer und oberer Obersee) nahm 8 Tage Rechenzeit mit 3 sehr gut ausgestatteten Desktop-PCs mit je 64 GB RAM, 4\* CPU Intel Xeon 3,6GHz, 64-bit in Anspruch; die Vereinerung erforderte annähernd 28 Tage Rechenzeit. Diese Verzögerung wirkte sich erheblich auf die Qualitätssicherung der Fächerlot- und LiDAR-Daten aus, da mit demselben Software-Produkt gearbeitet wurde.

#### 5.4.5 Kontrolle des Endproduktes und Vergleich mit der Vermessung von 1990

Die Leistungsbeschreibung für die Fächerlotvermessung forderte, dass die Daten nach „Spezifikationen der IHO Standards for Hydrographic Surveys (S44) (IHO S-44, 5th edition (2008), s. Tabelle 1) gewonnen werden, nach Möglichkeit die

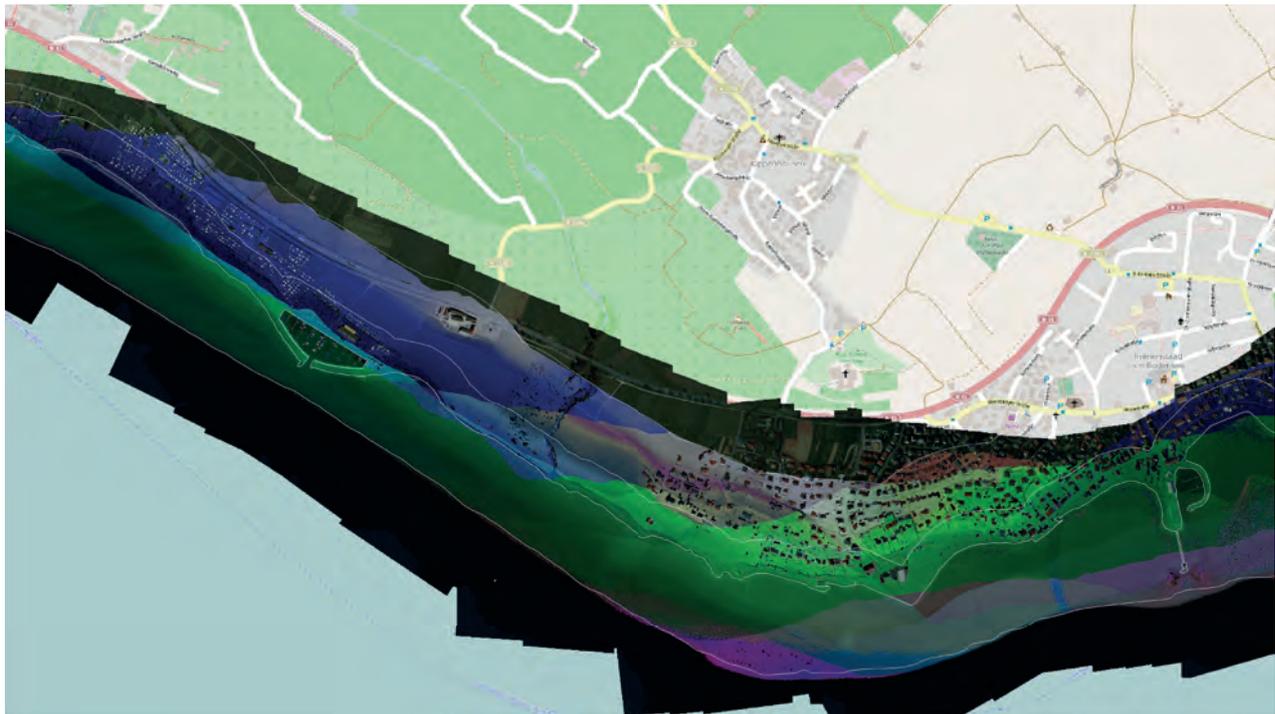


Abb. 5-12: Einzelne Flugstreifen in Verbindung mit dem Orthomosaik bei Immenstaad. Die weißen Linien markieren die Uferlinie sowie eine 100 m und 300 m landeinwärts liegende Linie. Als Hintergrundinformation dient die Karte von Open Street Map.

Genauigkeitsanforderungen der „Special order“ (vgl. Anhang, Kap. 10.2). Die „Special Order“ zeigt eine Genauigkeit in Abhängigkeit der Tiefe an, die vor allem für See- und Schifffahrtswege erforderliche Sicherheiten bietet.

Mit einer Reihe von Profilen quer zur eigentlichen Vermessungsrichtung sowie eigenen Kontrollmessflächen werden statistische Vergleichsrechnungen zwischen dem Oberflächenmodell und den Querprofilen oder zwischen dem Oberflächenmodell und einem Kontrollflächenmodell ausgeführt. Die hierfür verwendeten Oberflächenmodelle werden dabei stets ohne die Querprofile und Kontrollflächen errechnet, um eine Quasi-Autokorrelation zu vermeiden. Statistisch wird dabei auch auf die Geometrie des Fächerlotes eingegangen und ein Vergleich der Punktwolken aus Querprofilen und Kontrollflächen über die Fächerbreite hinweg ausgewertet. Bei einer idealen Fächeröffnung von 120° entstehen bei einer Einteilung in 10°-Schritte 12 Klassen von Punktwolken, die gegen die Oberflächenmodelle auf Varianz und Standardabweichung hin getestet

werden. Im Fall der sog. „Special Order“ basiert die Fehlerrechnung zur Tiefengenauigkeit auf:

$$\pm \sqrt{a^2 + (b * d)^2}$$

wobei a = 0,25 m, b = 0,0075 und d die Tiefe in Metern ist. Ein Beispiel dieser Kontrollrechnung ist in Abb. 5-6 zu sehen.

Die neue Vermessung des Sees gewährt die von der „Special Order“ geforderte Genauigkeit sogar bis an die tiefsten Stellen des Sees (Abb. 5-7). In 250 m Wassertiefe ergibt sich aus der oben gezeigten Formel eine geforderte Tiefengenauigkeit von +/- 0,87 m. Die durchschnittliche vertikale Abweichung für die über 6 Millionen Punkte, die zur Ermittlung der größten Tiefe herangezogen wurden ist 0,5 m (Abb. 5-7). Die Messungenauigkeit wird dabei durch eine komplexe Fehlerrechnung nachgewiesen. Hierbei wird die sogenannte „Total Propagated Uncertainty (TPU)“ für jeden Tiefenpunkt mit Angaben

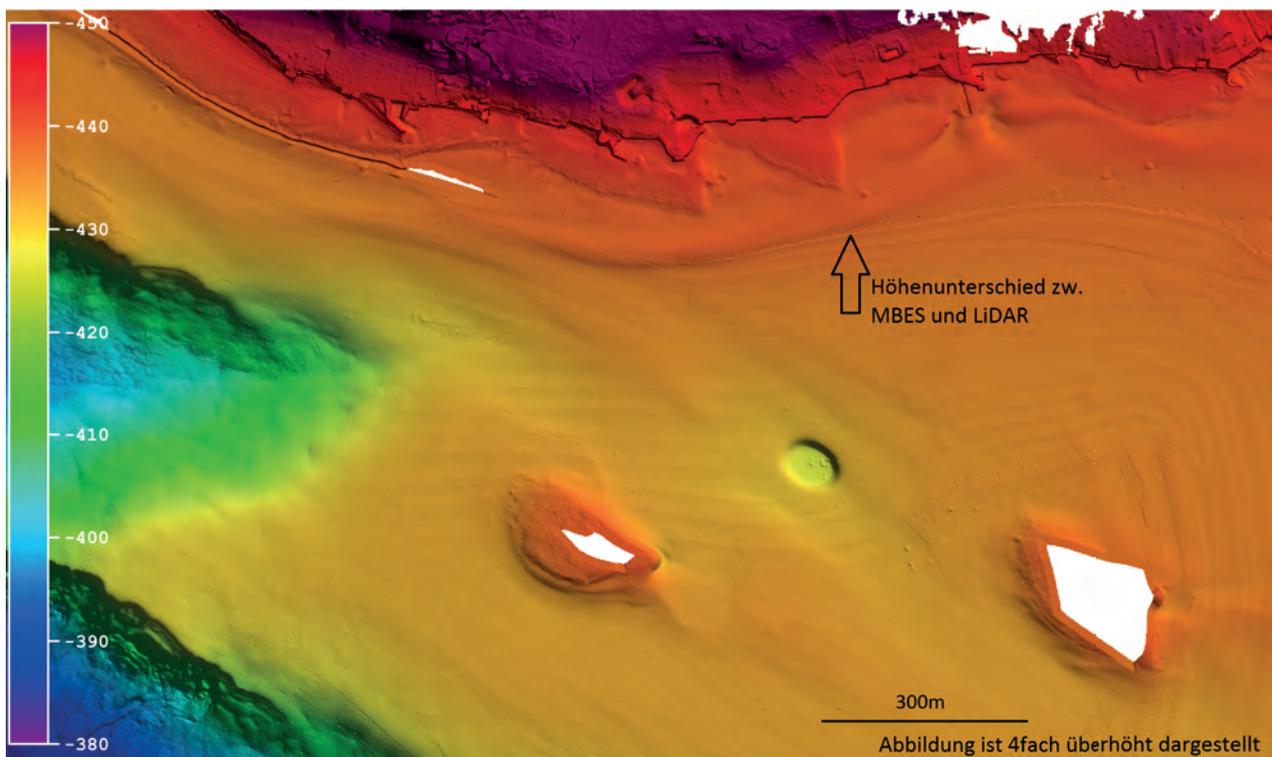


Abb. 5-11: Wasserschall- und Übergangsprobleme MBES-LiDAR bei Lindau. Der LiDAR-Bereich liegt hier oberhalb der Fächerlotmessung. Die angegebenen Tiefenwerte sind ellipsoidische Höhen, die softwarebedingt als negative Werte dargestellt sind. Die Uferlinie liegt deshalb bei etwa -441,8 m.

zu Hebelarmen und Offsets (Kapitel 5.4.1 und 5.4.2, respektive Kap. 3), Einstellungen während der Vermessung (Genauigkeit der angegebenen Wasserschallgeschwindigkeit, Position, Tiefgang und Heading), und Laborwerten der eingesetzten Geräte (Spezifikationen, Standardabweichungen von GPS, IMU, MBES, SVP) errechnet. Die Abbildung 5-7 zeigen die horizontalen und vertikalen Unsicherheiten in Metern, mit denen die über 6 Millionen Messungen an der tiefsten Stelle des Sees behaftet sind. Sie zeigen auch die prozentuale Verteilung des Fehlers nach seiner (möglichen) Herkunft. Die Werte liegen innerhalb der geforderten Spezifikation.

Ein Vergleichsbeispiel an einer der flachsten mit MBES kartierten Stelle ist in Abb. 5-8, in der Nähe des Rohrsptz südwestlich der Rheinmündung dargestellt. Auch hier wird die IHO „special order“ im Vergleich eines 1 m-DGM zu einem Querprofil gerechnet. Das DGM wurde unter Berücksichtigung der TPU erzeugt. Die Unsicherheit innerhalb dieses Gebietes liegt bei 5 cm, bei insgesamt 1,1 Millionen betrachteten Da-

tenpunkten. Die Standardabweichung von mehr als 1 Million Punkten liegt unter 0,1 m. Die hier dargestellten Höhen sind ellipsoidische Höhen, Wassertiefen liegen bei ca. 3,5–23 m.

Die geforderten Punktdichten (mind. 1 Pkt/m<sup>2</sup> >200 m Wassertiefe, 2 Punkte bei 200-100 m, 5 Punkte bei <100 m) werden bei den Rohdaten bis auf wenige Bereiche mit nicht korrekt gespeicherten Aufzeichnungen erreicht. Selbst nach der Prozessierung, bei der eine stellenweise Ausdünnung der Daten (durch eine partiell unzureichende Wasserschallkorrektur oder wegen Ausreißern in den äußeren Lotungen) unvermeidbar war, ist die erforderliche Punktdichte weitestgehend erreicht (Abb. 5-9). Die Anforderungen wurden auch hier erfüllt.

### Vergleich mit der IGKB-Vermessung von 1990

Eine wichtige Vergleichsmöglichkeit der neuen Vermessung des Bodensees ist die 1990 fertiggestellte Bodenseevermessung der IGKB. Für einen direkten Vergleich wurde aus beiden Ge-

ländemodellen ein Gitter mit einer Maschenweite von 25 m hergestellt (Abb. 5-10). Auf den ersten Blick fällt bei der Rasterweite von 25 m die geringe Datendichte und die damit erkennbare Gitterung des Geländemodells von 1990 auf, die vermutlich durch das Interpolieren der Daten entstanden ist. Das resultierende Differenzmodell beider Vermessungen auf Basis der 25 m-DGM zeigt deutliche Unterschiede (Std-Dev, Abb. 5-10). Vor allem in Gebieten mit großen Hangneigungen gibt es Unterschiede mit bis zu 14 m zwischen den Geländemodellen.

Vermutlich gibt es mehrere Gründe für diese Unterschiede. 1990 betrug der Punktabstand zwischen den Einzelmessungen 8-10 m entlang der Profillinien, sodass kleine Strukturen sicher nicht abgebildet werden. Zudem wurde 1990 ein Single-Beam-Echolot mit einem Öffnungswinkel von 9° verwendet. Gerade bei steilen Hangneigungen ergibt dieser Öffnungswinkel eine sehr große Fläche auf dem Seeboden, über die eine Tiefe gemittelt ausgegeben wird. Schließlich ist nicht dokumentiert, welche Zeitdifferenzen es zwischen der Ortung des Schiffes, dem Aussenden, Empfangen und Verarbeiten des Echolotsignals und dem Abspeichern auf Datenträgern, tatsächlich gab, und ob das bei der Auswertung berücksichtigt wurde. Zudem muss vor diesem

Hintergrund die bei der IGKB-Vermessung von 1990 angewendete Hangneigungskorrektur (Braun & Schärpf 1994) diskutiert werden. Dabei wurden die Tiefenwerte systematisch verschoben, um ein vermeintlich zu früh empfangenes Echo an steilen Hangsituationen zu berücksichtigen. Diese Korrektur wurde vermutlich vorgenommen, um die breite Schallkeule des damals verwendeten Echolotschwingers auszugleichen. Mit dem hier verwendeten Öffnungswinkel von 1\*1° der einzelnen Tiefenwerte ist diese Korrektur nicht notwendig.

### Vergleich der Fächerecholotdaten mit den LiDAR-Daten

Obwohl beide Datensätze in sich konsistent sind und flächendeckend den Anforderungen gerecht werden, gibt es im direkten Vergleich der Fächerecholotdaten mit den LiDAR-Daten stellenweise Höhendifferenzen von 5-12 cm im Bereich der 5 m-Linie. Diese resultieren vermutlich aus lokalen, sehr starken Wasserschallschwankungen (Abb. 5-11) und eventuell aus einer geringfügig zu tief angesetzten Korrektur der LiDAR-Daten, bedingt durch eine Ungenauigkeit in der Erfassung des Wasserspiegels (siehe Kapitel 4). In fast allen Bereichen mit einer Differenz liegen die Laserdaten unterhalb der Fächerlotdaten. Mehr

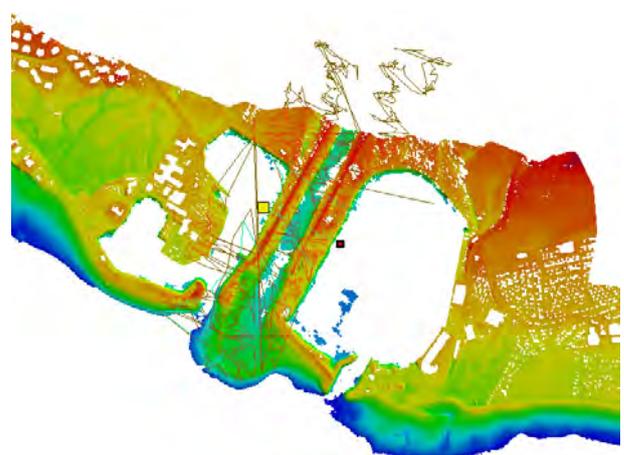
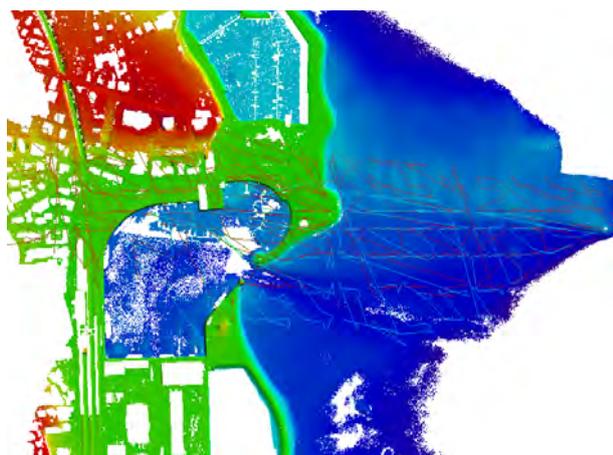


Abb. 5-13: Der Hafen in Romanshorn (links) und die Häfen an der Argenmündung bei Langenargen (rechts). In beiden Gebieten wurden zur Qualitätskontrolle nach IHO die Querprofile gegen die Geländemodelle aus uferparallelen Streifen gerechnet. Da die LiDAR-Daten (anders als die Fächerlotdaten) als Punktwolken in HIPS&SIPS eingelesen werden, verlieren sie in der Darstellung den Bezug zur Flugtrajektorie und erscheinen als wirres Geflecht aus blauen und roten Linien. Das darunterliegende DGM ist aus den uferparallelen Flugstreifen gerechnet.

zum Produkt der verschnittenen Datensätze und dessen Qualität findet sich in Kapitel 5.6.

#### 5.4.6 Fazit zur Qualität der Vermessung mit dem Fächerecholot

Der Vergleich mit den SBP-Daten sowie den Kontrollpunkten wurde in den Kapiteln 5.2.1 und 5.3 beschrieben und zeigte eine gute Übereinstimmung des Fächerecholot-Datensatzes mit den davon unabhängigen Kontrollmessungen. Die 5 m-Linie, die nach den Anforderungen an die Vermessung mit dem Fächerecholot als landseitige Begrenzung dienen sollte, konnte an manchen Stellen nur lückenhaft vermessen werden. Gründe hierfür (z.B. sehr steile Areale, in denen mit der Kormoran nur extrem schwierig zu manövrieren ist) sind in Kap. 3.3.1 erläutert und bedingt durch die technischen Voraussetzungen akzeptabel.

Die geforderte horizontale und vertikale Genauigkeit sowie Punktdichten sind in verschiedenen Abschnitten dieses Kapitels aufgezeigt. Abb. 5-6 und 5-8 zeigen exemplarisch IHO-Differenzrechnungen mit Standardabweichungen im flachen Wasser von deutlich unter 0,1 m. Die Vermessung der tiefsten Stelle des Bodensees zeigte lediglich eine 1,4 m horizontale und 0,5 m vertikale Unsicherheit (TPU; siehe Abb. 5-7). Die Standardabweichung und Datendichte für das gesamte 1m Grid sind in Abb. 5-16 dargestellt.

Als Fazit zur Kontrolle der Tiefenvermessung mit dem Fächerecholot kann sicherlich von einer sehr erfolgreich durchgeführten Fächerlotvermessung gesprochen werden. Die Vorgaben der Ausschreibung wurden weitestgehend erfüllt und bis auf wenige Lücken im Bereich der 5 m-Tiefenlinie wird die neue Vermessung allen Anforderungen gerecht. Bei sehr hohen Ansprüchen an den Detaillierungsgrad mit Rasterweiten unterhalb von 2-3 m sind allenfalls im flachen Wasser lokale Nachbearbeitungen erforderlich. Allerdings liegt dieser Tiefenbereich im Bereich lokal stark ausgeprägter Erosion und Akkumula-

tion und zudem oberhalb der Wellenbasis bei Starkwindereignissen, sodass hier ohnehin mit einer sehr hohen Dynamik der Sedimenthöhen zu rechnen ist.

### 5.5 Vorgaben für die Lasermessungen

#### 5.5.1 Begleitung der Ausschreibung für das bathymetrische Laserscanning

Da das bathymetrische Laserscanning eine sehr neue und innovative Technik ist, gibt es vergleichsweise wenig Erfahrungen mit den Qualitätsanforderungen an diese Vermessungstechnik. Als kompetenter Partner auf dem Gebiet der LiDAR-Ausschreibung wurde deshalb die Technische Universität Wien hinzugezogen, die in enger Abstimmung mit der Qualitätssicherung einen sehr detaillierten Anforderungskatalog für die Arbeiten formulierte.

#### 5.5.2 Erfüllen der technischen Rahmenbedingungen lt. Ausschreibung

Die LiDAR-Daten wurden der Qualitätssicherung im binären LAS-Format (Version 1.2) übergeben und wurden mit der Software CARIS HIPS & SIPS ausgewertet, gefiltert und unter Verwendung des CARIS Base Editor mit den Fächerlotdaten verschnitten. Die Qualitätssicherung der Laser-scan-Daten gestaltete sich als sehr zeitaufwendig, da bedingt durch Hard- und Softwareprobleme und Personalengpässe (Krankheit, Auftragslage) zu gravierenden Verzögerungen kam, unter denen auch die interne Kontrolle der Produkte litt (s. Kap. 4, Kap. 5.7). Die Datensätze mussten durch den Auftragnehmer nach Kontrolle der QS mehrfach nachbearbeitet und erneut in das LAS-Format ausgespielt werden, wobei allein der Datenexport bis zu einer Woche Zeit in Anspruch nahm. Die wesentlichen Eckdaten der Anforderungen zu Punktdichten und Standardabweichungen an Land und in verschiedenen Wassertiefen wurden für 10 \* 10 m große Analyseeinheiten wie untenstehend definiert.

Analyseneinheiten an Land:

- In 90% der Analyseeinheiten liegen min. 500 Punkte.
- In 95% der Analyseeinheiten liegen min. 250 Punkte.
- In max. 5% der Analyseeinheiten liegen min. 125 Punkte.

Analyseneinheiten im Wasser:

- Wassertiefe 0 bis 2 m: wie an Land.
- Wassertiefe 2 bis 4 m: 6 Punkte pro 1 m<sup>2</sup>; In max. 5% der Analyseeinheiten liegen mind.63 Punkte, sonst 300 Punkte.
- Wassertiefe 4 bis 6 m: 4 Punkte pro 1 m<sup>2</sup>; In max. 5% der Analyseeinheiten liegen mind.50 Punkte, sonst 200 Punkte.

Die Analyse der topographischen LiDAR-Daten ergab eine Datendichteverteilung wie unten aufgeführt:

- ca. 94,48 % der Analyseeinheiten haben min. 500 Punkte
- ca. 96,04 % der Analyseeinheiten haben min. 250 Punkte (1,57 % zw. 250 – 500 Punkten)
- ca. 98,91 % der Analyseeinheiten haben min. 125 Punkte (2,87 % weniger als 250 Punkte)
- ca. 1,09 % der Analyseeinheiten haben weniger als 125 Punkte

Die Überlappung zweier benachbarter Flugstreifen quer zur Flugrichtung (Querüberdeckung) sollte mindestens 50 % betragen. Abb. 5-12 zeigt exemplarisch 5 Flugstreifen und ihre Überdeckung bei Immenstaad. Die durchschnittlich erreichte Wassertiefe mit LiDAR liegt bei ca. 5 m, in größeren Wassertiefen sind nur wenige Daten vorhanden. Die Datendichte im tieferen Wasser ist stellenweise geringer als die

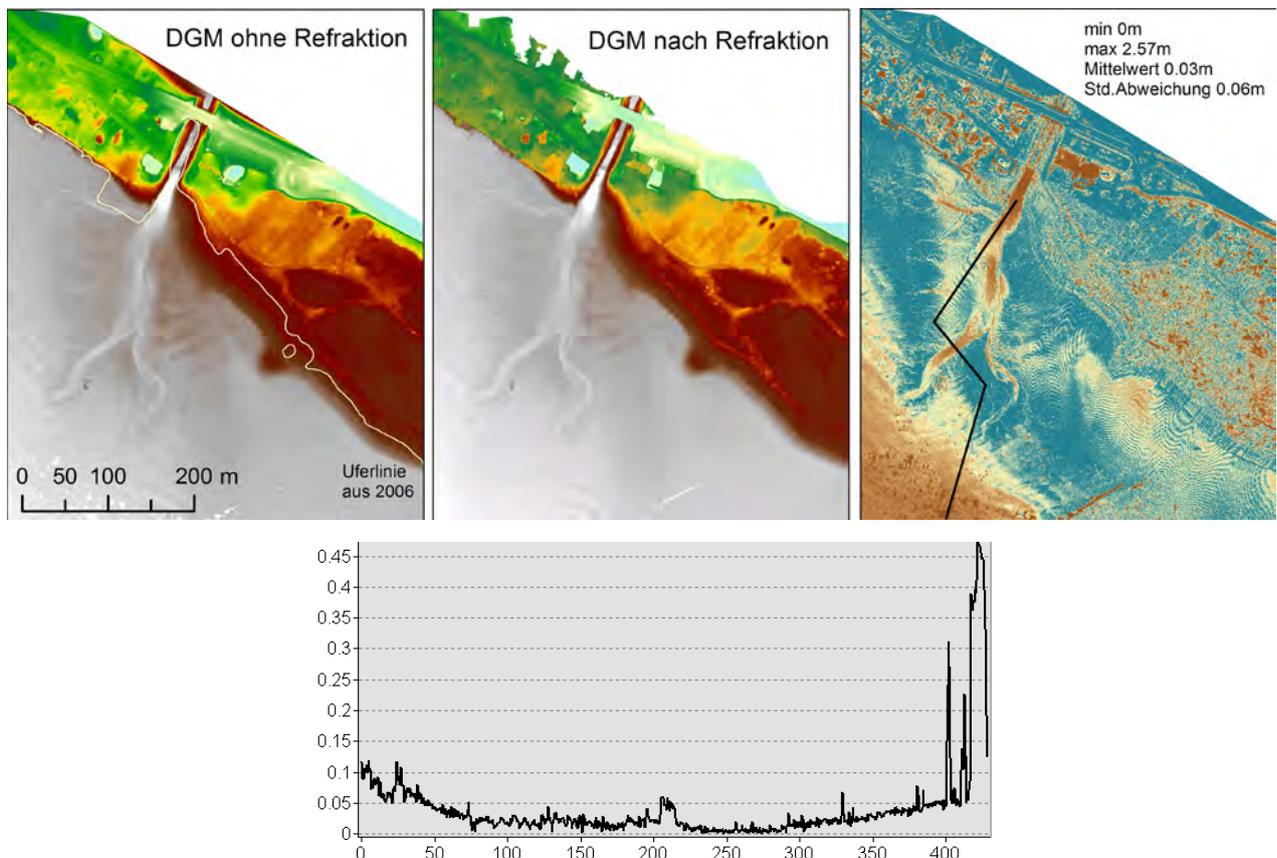


Abb. 5-14: Differenzmodelle an der Rotachmündung aus Daten ohne (links) und mit Refraktion unterhalb des Wasserspiegels (rechts) sowie einem Profil über die Differenzen (unten; Angaben in Meter).

Vorgabe von 4 Punkten pro 1 m<sup>2</sup>. Gründe für die stellenweise geringere Dichte bzw. Eindringung sind im Kap. 4 erläutert. Die absolute Standardabweichung sollte nicht mehr als horizontal 20-30 cm und, je nachdem ob an Land oder im Wasser, vertikal nicht mehr als 10-20 cm betragen.

Um die Tiefengenauigkeit vergleichbar mit den Fächerlotdaten zu machen, wurde auch bei den LiDAR-Daten die IHO „Special Order“ angewandt. Für eine korrekte Fehlerabschätzung (vor allem horizontal), wäre auch hier die Berechnung der TPU (vgl. Kap. 5.4.4) nötig, die allerdings gegenwärtig noch mit keinem Softwarepaket möglich ist.

Die Refraktion der bathymetrischen LiDAR-Daten kann nur indirekt beurteilt werden, da zum Zeitpunkt der Berichterstellung die Klasse „Wasserspiegel“ nicht vorlag. Der Wasserspiegel ist die Ebene ab der nach Snellius ein für das Medium Wasser geeigneter Brechungsindex, in Abhängigkeit der Wellenlänge, verwendet wird. Am Differenzmodell der Rotach (Abb. 5-14) wurde ein Vergleich zwischen bereinigten Daten ohne Refraktion im bathymetrischen Teil und dem finalen LiDAR-Datensatz (mit Refraktion) durchgeführt. Hier zeigten sich die erwarteten Tiefenunterschiede von 3-15 cm. Dabei ist zu beachten, dass die Refraktion sowohl eine vertikale wie auch eine horizontale Komponente besitzt. Da der horizontale Betrag so nicht ermittelt werden kann, hat er sicherlich einen gewissen Anteil an der vertikalen Differenz. Da die Farbcodierung zur besseren Erkennbarkeit in Abb. 5-14 eine Streckung über das gesamte Histogramm erfahren hat, sind im Profil die Werte an dem Beispieltransekt entlang der Rotachmündung dargestellt.

Der bathymetrische LiDAR-Datensatz liegt im Verschneidungsbereich (4-6 m Wassertiefe) stellenweise 5-15 cm unter den MBES-Daten (siehe Abb. 5-11 und Kap. 6.1.2). Die Ursache dafür konnte noch nicht eindeutig identifiziert werden. Neben der schon erwähnten Wasserschallproblematik bei den MBES-Daten ist das Bestimmen der Wasseranschlaglinie für die bathymetrischen

LiDAR-Daten mit einem bestimmten Fehler behaftet. Der Abgleich der LiDAR-Daten mit den DGMs der Länder könnte im Raum Österreich durch die vorliegende, relativ geringe Auflösung von 10 m beeinträchtigt sein.

### 5.5.3 Kontrolle des Endprodukts des topobathymetrischen Laserscanning

Auf das Ergebnis der Laserscanning-Vermessung wurde im Zuge der Kontrolle und noch vor dem Verschneiden des Datensatzes mit den MBES-Daten ein automatischer Tiefenfilter angewendet, um eventuell verbliebene Ausreißer zu entfernen. Ein wichtiger Punkt in der Endkontrolle war der Vergleich mit den Kontrollpunkten und Passpunktflächen der Vermessungsämter. Das Resultat wurde in Kapitel 5.3 gezeigt.

Die LiDAR-Vermessung des Bodensees war in mancherlei Hinsicht Neuland. Die Größe des Projektes, der sehr hohe Anspruch im Hinblick auf Punktdichte und das topobathymetrische Laserscanning sowie einige Probleme innerhalb der verwendeten Software HydroVish, beziehungsweise dem Export in das LAS-Format waren Herausforderungen. Bis auf geringe Datenlücken im Übergang zur Fächerlotvermessung und einigen wenigen anderen Stellen um den See, an denen der 100 m-Puffer vom Ufer und damit auch Linie des Extremhochwassers nicht ausreichend abgedeckt wurden, entspricht das Produkt den Anforderungen der Ausschreibung. An manchen Uferabschnitten wurde landseitig ein größerer Bereich abgedeckt als gefordert. Die Nachvermessung vom Mai 2015 wurde mittlerweile ausgewertet und hat den Datensatz weiter vervollständigt.

Auch in den finalen Produkten (LiDAR-Kacheln in Größen von 1\*1 km) verbleiben allerdings Fehlklassifikationen, die sowohl bei der automatischen als auch bei der manuellen Klassifikation aufgetreten sind. Die Klassifikation von LiDAR Daten ist eine sehr komplexe und wenn manuell durchgeführt, eine enorm zeitraubende Arbeit. Für weiterführende, detaillierte



Abb. 5-15: Interpolierte Bereich (orange) mit einem Ausschnitt westlich und östlich der Mündung des Alpenrheins.

Analysen müssen die einzelnen LiDAR Kacheln ggf. einer genauen Kontrolle und Korrektur unterzogen werden.

#### 5.5.4 Fazit zur Qualität der Vermessung mit LiDAR

Die Ergebnisse des topobathymetrischen Laserscanning entsprechen weitestgehend den Anforderungen der Ausschreibung. Mit einer Standardabweichung von 0,05-0,08 m konnte die vertikale Genauigkeit durch Vergleich mit den terrestrischen Passpunkten der Vermessungsämter (Kap. 5.3) bestätigt werden. Unter Wasser wurden Standard-Abweichungen von 0,05-0,2 m durch Vergleich mit Passpunkten entlang von Stegen und durch IHO-Differenzmessungen wie in Abb. 5-13 nachgewiesen. Bei der Genauigkeit unter Wasser ist die größte Fehlerquelle nicht die Refraktion, sondern die Bestimmung des Wasserspiegels bzw. des Wasseroberflächenmodells (Kap. 4.3.3). Die horizontale Genauigkeit liegt

trotz der überlappenden Footprints der Lasersignale (bedingt durch den Durchmesser von ca. 0,5 m am Boden, Tab. 4-1), bei etwa 0,2-0,3 m. Das wurde u.a. an Gebäuden in hochauflösenden Open-Street-Map Karten und an Passpunkten von Kontrollflächen der Vermessungsämter überprüft. Die geforderten Datendichten lt. Ausschreibung werden größtenteils erfüllt, oftmals auch vielfach übertroffen. Ausnahmen sind die in Kap. 6.1.2 erwähnten Datenlücken. Die Histogramme der Datendichten und die Standardabweichung des 1 m Gesamtgrids sind in Abb. 5-16 dargestellt.

#### 5.6 Bewertung der verschnittenen Datensätze

Das Herstellen des Gesamtdatensatzes aus LiDAR und MBES ist in Kapitel 6 beschrieben. Nach der detaillierten Kontrolle der Einzelprodukte konzentrierte sich die Qualitätssicherung bei der Herstellung des Gesamtproduktes auf die Verschneidungsbereiche (siehe Kap. 6) und die Dokumentation der Lücken („Holidays“) sowie deren Interpolation. Die In-

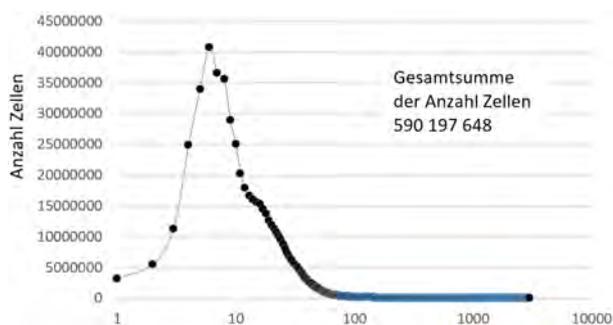


Abb. 5-16: Datendichte pro m<sup>2</sup> (links) und Standardabweichungen (rechts, in Meter) für das Gesamt-DGM (LiDAR und MBES).

terpolationsschritte wurden innerhalb des Projektes abgestimmt und ein Gesamtraster der interpolierten Flächen erstellt (siehe Abb. 5-15). Die Interpolation wurde für das 10 m-Gitter und für das 3 m-Gitter durchgeführt. Da der Interpolationsalgorithmus lediglich eine 3\*3 bzw. 5\*5 Matrix zulässt, sind in dem interpolierten 3 m-Gitter einige deutliche Höhengsprünge im interpolierten Übergang von steilen Hängen und Kanten zu erkennen.

Der Algorithmus reicht bei breiteren Datenlücken nicht aus, um mit der richtigen Hangneigung zu extrapolieren. Da sich der Großteil der Datenlücken im reliefarmen, flachen Wasser befindet, werden die Gebiete vom Algorithmus aber in der Regel gut erfasst und berechnet. Vor allem im 10 m-Raster ist damit ein Fehler bedingt durch Interpolation vernachlässigbar. Anzumerken ist, dass sich die Interpolation auch auf LiDAR-Bereiche erstreckt, die als Löcher bei der Klassifikation des Bodens z.B. durch Klasse Gebäude entstanden sind. Eine prozentuale Angabe der echten Lücken wäre deshalb nicht eindeutig und in jedem Fall ist die Fläche echter Lücken deutlich geringer als hier dargestellt.

Die Insel Reichenau wurde fälschlicherweise auch als Lücke gedeutet, da der Algorithmus unter CARIS HIPS&SIPS für Inseln keine andere Lösung kennt. Dieses Problem konnte erst in einer neuen Version des CARIS BASE Editor™ (Version 4.1.10) behoben werden. Eine Gesamtstatistik auf Basis des 1 m-DGMs zeigt in den beiden Abbildungen 5-17 und 5-18 die Datendichte und Standardabweichung.

## 5.7 Erfüllen der Vorgaben für Orthofotos

Zeitgleich mit dem Laserscanning wurden Orthofotos aufgenommen, wohl wissend, dass die relativ geringen Flughöhen bis max. 600 m eine Standard-Orthofotoaufnahme ausschließen. Durchgeführt wurde die Luftbildaufnahme mit einer Hasselblad-Mittelformatkamera (siehe Kapitel 4). Wie in Kapitel 4.4.4 beschrieben, fand ein radiometrischer Ausgleich lediglich in Form einer Farbanpassung und nur innerhalb einer Kampagne statt, nicht jedoch zwischen den Kampagnen (bedingt durch hohe Kontrast- und Helligkeitsunterschiede sowie die unterschiedlichen Vegetationsstadien). Da spätere Kampagnen u.a. geflogen wurden um Lücken zu schließen, sind Abstriche in der Qualität des Produktes (Mosaiks) gegenüber der Ausschreibung unvermeidlich.

Bedingt durch die Befliegung in den verschiedenen Jahreszeiten ist ein Gesamtmosaik aller Bilder nicht möglich. Die Qualitätssicherung erfolgte in erster Linie visuell. Hierbei wurden unterschiedliche Artefakte entdeckt, die dazu führten, dass die Mosaik zwei weitere Male erneut gerechnet, exportiert und der Qualitätssicherung übergeben wurden.

Wie in Kapitel 4 erwähnt, konnte das Mosaik aufgrund seiner Größe nicht als ein zusammenhängendes Orthofotomosaik gespeichert werden. Es wurde in 11 Blöcken geliefert, die zusammen 587 1\*1 km große Kacheln mit einer Größe von je 588 MB enthalten. Das vorliegende Mosaik hat eine Auflösung von 7 cm, damit wurde die

geforderte Bodenauflösung gut erfüllt. Um die Kacheln auf ihre Vollständigkeit und korrekte Verortung zu prüfen, wurden sie von Seiten der Qualitätssicherung in 11 Teilmosaiken, mit 0,5 m Auflösung gerechnet (entsprechend der maximalen Lagetoleranz). Daraus wurde ein Gesamtmosaik mit 2 m Auflösung erzeugt.

Die Teilmosaiken können so anhand der Bodenklassen des LiDAR sowie den DGMs der Länder (siehe Kapitel 6) auf ihre richtige Verortung überprüft werden. Auch Open-Street-Map (<https://www.openstreetmap.de>) wurde erfolgreich genutzt, um die Daten zu überprüfen (Abb. 5-12). Die Abbildung zeigt das Orthofotomosaik und LiDAR-Daten sowie die geforderten Abdeckungsgebiete von 300 m Lotrecht zur Uferlinie von 2006. Der Abdeckungsgebiet von 300 m abseits der Uferlinie konnte nicht an allen Stellen um den See eingehalten werden.

## 5.8 Projektzeitplan

Verzögerungen durch technische und personelle Probleme sowohl bei der Laser- als auch bei der Fächerlotdatenerfassung und der Verarbeitung haben sich negativ auf den Projektzeitplan ausgewirkt.

Bei der Fächerlotvermessung führte ein später Beginn der Datenakquise zu erheblichen Problemen bei der Wasserschallkorrektur, zudem gab es personelle Probleme bei der Nachbearbeitung (der hauptsächlich mit der Bearbeitung des Projekts betraute Mitarbeiter hat die Gruppe verlassen). Das Prozessieren wurde in wesentlichen Teilen an der Uni Bremen/MARUM durchgeführt. Die gut aufgestellten personellen Ressourcen der Uni Bremen erlaubten die Fertigstellung

des Produktes im April 2015. Allerdings mussten wegen der späten Datenübergabe Abstriche in Kauf genommen werden. Versuche einer weiteren Verbesserung des Echolotdatensatzes um Lindau oder im Untersee mussten aus zeitlichen Gründen abgebrochen werden. Insgesamt ergab sich von der Akquise bis zur Nachbearbeitung der Fächerlotdaten eine Verzögerung von fast 8 Monaten. Eine weitere Ursache für diese Verspätung liegt in einem Software-Fehler von CARIS HIPS&SIPS, wie in Kapitel 5.4.3 beschrieben.

Beim Laserscanning waren neben dem teilweisen Personalausfall beim Prozessieren im Wesentlichen folgende Punkte für die angefallenen Verzögerungen relevant:

- Ein Defekt in der Laserquelle Dez. 2013 – Einbau reparierte Laserquelle Feb. 2014
- Stromspitzen in der Laserquelle – Tests März 2014, Behebung zu Ende März 2014
- Sondergenehmigung Rheindelta – 3 Monate, erteilt zu Mai 2014
- Mehraufwand: Nachpulsfilterung eines Doppellayer durch Neuverhalten der Laserquelle – 1,5 Monat
- Mehraufwand Datendichte: Höhere Datendichte und Datenvolumen durch bereits während der Aufnahme gewählte erhöhte Erfassungsdichte - 1 Monat
- Datenexport las problematisch – falsche Zuordnung von Punktinformationen – 2 Monate
- Korrektur Fehlklassifizierungen – ca. 3 Monate

Der finale LiDAR Datensatz mit allen in Tab. 4-5 angeführten Klassen im LAS v.1.2 Format wurde erst im März 2016 übergeben.

## 6 Verschneiden der Daten und Herstellen der Produkte

### 6.1 Zusammenführen der Echolot- und LiDAR-Daten

#### 6.1.1 Datengrundlage, Projektion

Für das Herstellen der neuen Bodenseekarte war eine Verschneidung der LiDAR- mit den Fächerecholotdaten notwendig. Die beiden Datensätze wurden mit unterschiedlichen Methoden erhoben, eigener Software prozessiert, verschiedensten Korrekturverfahren unterzogen (Kap. 3 und 4), und sollten nun passgenau zueinander vorliegen. Da die Datenqualität von vielen Gegebenheiten bei der Aufzeichnung, Verortung und Refraktions-Korrekturverfahren und schließlich von der manuellen Bearbeitung abhängt, sind geringfügige Abweichungen beider Datensätze unausweichlich (s. Kap. 5), weshalb mit der Verschneidung auch eine Homogenisierung einhergeht. Die Daten der LiDAR-Befliegung wurden als binär kodierte Punktwolke im UTM32N Koordinatensystem mit Basissystem ETRS89 übermittelt. Die Fächerlotdaten lagen im binären Caris HIPS and SIPS Format, in derselben Projektion vor. Damit war die Möglichkeit gegeben, beide Datensätze als Punktwolken

miteinander zu verschneiden. Die Daten der LiDAR-Nachbefliegung vom Mai 2015 wurden dem Datensatz nachträglich zugeführt, um Datenlücken weitestgehend zu schließen.

#### 6.1.2 Verschneiden der Datensätze und Umgang mit Datenlücken

Die zur Verschneidung der Daten benutzte Software ist der Caris BASE Editor™ (Version 4.1.10). Die Software bietet eigens für LiDAR und Fächerecholotdaten zugeschnittene Algorithmen zur Kombination verschiedenster Datensätze wie 3D-Punktwolken und digitaler Oberflächen- und Höhen- bzw. Tiefenmodelle.

Vor dem Verschneiden wurden die Datensätze einer iterativen Endkorrektur in Caris HIPS & SIPS unterzogen. Ein automatischer Tiefenfilter half, wenige noch vorhandene Ausreißer zu entfernen. Zusätzlich mussten einzelne nicht erkannte Ausreißer und Unregelmäßigkeiten aus beiden Datensätzen manuell entfernt werden, da sie erst nach dem manuellen und automatischen Nachbearbeiten der Ausgangs-Daten

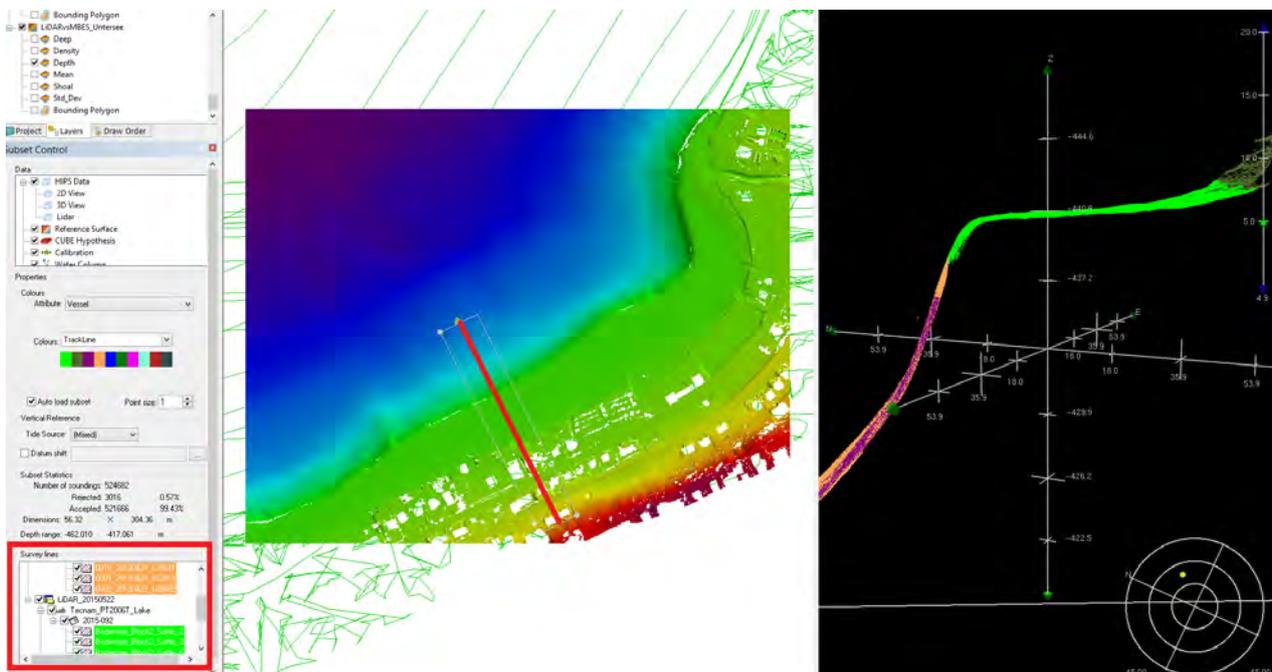


Abb. 6-1: Screenshot aus der Software Caris: Sehr gute Passgenauigkeit zw. LiDAR und MBES im Untersee. Das Profil und die verwendeten LiDAR-/MBES-Linien sind rot markiert. Rechts im Bild ist die Daten-Punktwolke in einer 3D – Darstellung von der Seite zu sehen.

und nach Vereinigung der beiden Datensätze sichtbar wurden. Da der gesamte Datensatz im binären Caris-Format etwa 1,8 TB groß ist und diese Fehler oft nur in unterschiedlichen Skalierungen sichtbar sind, musste der zeitaufwendige Vorgang (Editieren und Erzeugen eines gemeinsamen, digitalen Geländemodells (DGM)) mehrfach wiederholt werden. Zudem machte ein im Tiefenschärfe-Projekt entdeckter Software-Fehler von HIPS & SIPS (s. Kap. 5.4.3, 5.8) auch diese Nachbearbeitung zu einem aufwendigen Unterfangen. Das Erstellen der digitalen Geländemodelle (DGM) geschah auf Basis der aus den HIPS & SIPS erstellten CSAR-Files, welches sich performant in den BASE Editor einlesen lässt. Aufgrund der Größe des Projektes und dem oben genannten HIPS & SIPS Software-Fehler war es notwendig, das gesamte DGM in mehrere Teile zu zerlegen, zu bearbeiten und später wieder zusammenzufügen. Aus dem zusammengeführten CSAR-File wurde anschließend ein für die gängigen Software-Pakete lesbares DGM-Format (BAG, ESRI ASCII-Grid) exportiert.

Bei der Qualitätskontrolle (s. Kap. 5.5) zeigte sich an einigen Stellen ein Höhenversatz im

Übergangsbereich LiDAR zu MBES. Zwei Vergleiche mit sehr guter Übereinstimmung bzw. einem maximalen Höhenversatz sind in den Abb. 6-1 und 6-2 dargestellt. Die Abb. 6-2 in der Bregenzer Bucht zeigt einen lokalen Höhenversatz von 20-30 cm. Ob dieser durch das naheliegende, sehr gering aufgelöste DGM (10 m) auf der österreichischen Seite bedingt ist, ist unklar. Als Rahmenregel für den Verschneide-Algorithmus im BASE Editor wurde die für die Hydrographie übliche Regel „nimm den höher liegenden z-Wert“ verwendet. Damit wird neben der Sicherheit für die Schifffahrt auch das Problem der teilweise lokalen Unterschiede vermieden bzw. klein gehalten. Die verbleibenden vertikalen Unterschiede zwischen beiden Datensätzen liegen im Mittel unter 10 cm und sind akzeptabel. Die LiDAR-Daten liegen dabei i.d.R. geringfügig tiefer als die Fächerlot-Daten, evtl. ist das durch eine etwas zu tief angenommene Wasseranschlaglinie bei der Refraktion der bathymetrischen LiDAR-Daten bedingt. Die Restfehler der einzelnen Datensätze durch diese geringfügig zu tiefen, bathymetrischen Laser-Bodenpunkte oder einzelne, nicht plausible Wasserschallprofile oder MBES-Bereiche ohne mögliche GPS-Nachkorrektur, sind für das 10 m

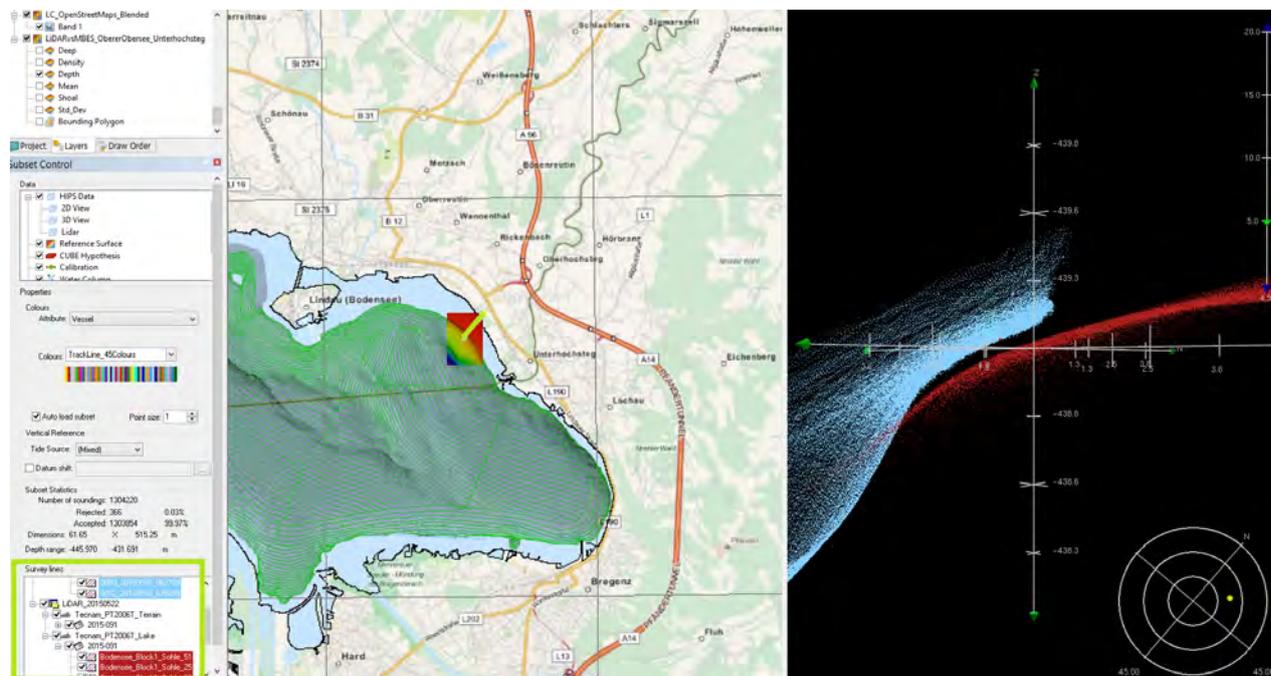


Abb. 6-2: Screenshot aus der Software Caris: Der größte ermittelte, lokale Höhenversatz in der Nähe von Lindau zwischen den Punktwolken von LiDAR und MBES beträgt hier einige Dezimeter. Das Profil und die beteiligten LiDAR-/MBES-Linien sind grün umrandet. Rechts im Bild ist die Daten-Punktwolke in 3D dargestellt.

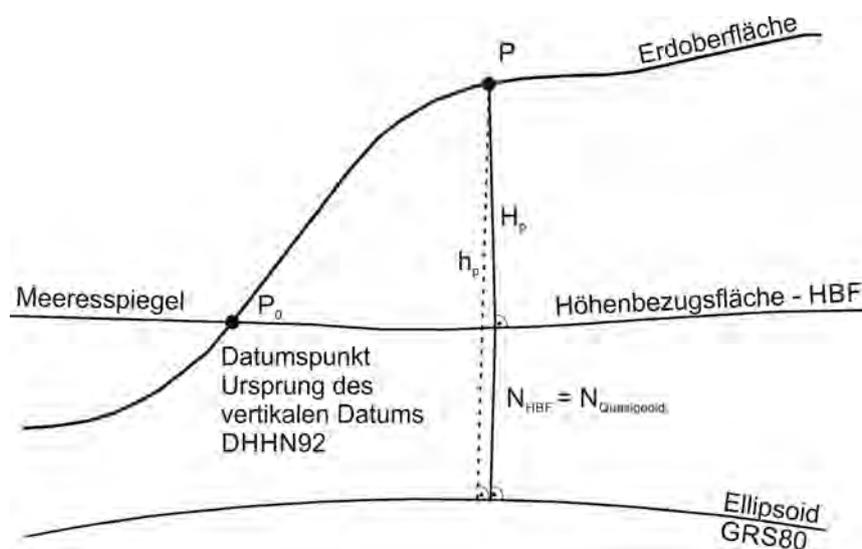


Abb. 6-3: Beziehung zwischen ellipsoidischer Höhe  $h_p$ , Gebrauchshöhe  $H_{DHHN92}$  und Quasigeoid (verändert nach Schneid & Meichle (2005)).

Gitter der 1:50.000 Karte nicht relevant. Weiterführende Auswertungen an Gittern mit maximaler Auflösung (<2 m) müssen diese Inhomogenität je nach Fragestellung berücksichtigen, allerdings ist dann auch eine zwischenzeitlich aufgetretene natürliche Veränderung vermutlich von größerer Relevanz.

Nach dem Verschneiden gab es in wenigen Gebieten kleinere Datenlücken (s. Kap. 5), die mit einem iterativen Interpolationsverfahren (entsprechend der jeweiligen Kartenauflösung) geschlossen wurden. Diese Lücken gibt es lediglich an sehr ebenen, flachen Arealen, sodass hieraus entstehende Kartengenauigkeiten vernachlässigbar sind. Bei der Interpolation kamen Algorithmen von Caris zum Einsatz, die ein Zuwachsen über eine 3X3 oder 5X5 Matrix und 1-6 Nachbarpunkten zulassen. Gewählt wurde dabei die 5x5 Matrix mit mind. 4 Nachbarn. Die interpolierten Flächen sind durch einen eigenen Rasterdatensatz gekennzeichnet, lassen sich so jederzeit einwandfrei identifizieren und sind am ISF und bei den Vermessungsverwaltungen dokumentiert.

Eine abschließende Glättung des Datensatzes erfolgte in Abhängigkeit zur Rasterweite/Pixelgröße der Karte. Dabei wird das sogenannte „3D double buffering“ angewendet. Dieser Prozess ermöglicht das Entfernen von „Störwerten“, stellt

signifikante Erhebungen aber prominent dar. Die Funktionsweise des Algorithmus kann man sich mit einer Kugel mit definierbarem Radius erklären, die über die Oberfläche des DGMs rollt und dabei die „Störwerte“ glättet. Bei einem Radius von 1/100 des Kartenmaßstabs wurden nur sehr kleinräumige Strukturen und damit auch Restfehler geglättet.

## 6.2 Produkte und Formate, Langzeitarchivierung

Aus den zusammengeführten Daten wurden folgende, digitale Produkte hergestellt:

- Kombiniertes DGM mit einer Auflösung von 10 m im Format ESRI ASCII (\*.asc) in den Koordinatensystemen UTM32N (ETRS89/GRS80 bzw. DHHN92 Höhen) und Gauß-Krüger Zone 3 (GK3 in DHHN92 Höhen).
- DGM Kombiniertes DGM mit einer Auflösung von 3 m im Format ESRI ASCII (\*.asc), ebenfalls in UTM32N und GK3.
- Karten für die Öffentlichkeitsarbeit im Maßstab 1:50.000 (Format A0) und im Maßstab 1:200.000 (Format A2), sowie 2D und 3D Abbildungen für Plaspekte, Postkarten für verschiedene Medien (Magazine, Zeitungen, Homepage).

Zur Höhenberechnung im in Deutschland gültigen Höhensystem DHHN92 (Höhen über Normalhöhennull (NHN), Bezugspunkt ist der Meeresspiegel in Amsterdam), wurde ein noch nicht publiziertes, sog. Quasigeoid des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie (BKG) mit Stand 2015 herangezogen. Zur zwischenzeitlich erfolgten Freigabe des Quasigeoids gab es keine Änderungen (BKG 2016). Die geometrische Ausgangsfläche dieser Vermessung, auf die sich auch alle GPS-Messungen innerhalb des Projektes beziehen, ist das Referenzellipsoid des Geodätischen Referenzsystems von 1980, kurz GRS80. Es dient auch dem europäischen Raumbezugsystem ETRS89 als geometrische Rechen- und Abbildungsfläche. Zusammen bilden ETRS89 & GRS80 das geodätische Datum, das zur einheitlichen, länderübergreifenden Lage- und Höhen-Vermessung des Bodensees gewählt wurde. Damit stellt das ETRS89 „ellipsoidische Höhen“, und das DHHN92 physikalische Gebrauchshöhen bereit. Die Skizze in Abb. 6-3 zeigt schematisiert die mathematische Beziehung zwischen Ellipsoid, Quasigeoid und Höhenbezugsfläche. Eine genaue Beschreibung findet sich in Schneid und Meichle (2005).

Als Referenzhöhe für den mittleren Wasserstand (und die Gewässertiefe, siehe Kap. 8) wurde das 30-jährige Wasserstandsmittel am Pegel Konstanz verwendet (3,31 m über dem

Pegelnullpunkt von 391,89 m NHN, Zeitraum 1980/2010). Tiefenberechnungen auf diese Seespiegelhöhe werden in Kapitel 5-2-1 erläutert. Die Gebrauchshöhe auf Basis DHHN92 errechnet sich aus:

$$HDHHN92 = ([HGRS80] - [HQuasigeoid])$$

Die DGM wurden im gängigen ESRI ASCII-Format geliefert, lesbar für GIS- & Spezial-Software wie z.B. ESRI ArcGIS, QPS Fledermaus sowie andere, LiDAR oder MBES-verarbeitende Software. Die Herstellung der Produkte erfolgte im Hinblick auf Auflösung, Detailtreue oder Ausschnittgröße. Die Karte im Format A0 sowie der Plaspunkt sind ebenfalls über den unten genannten Link verfügbar.

Zur Gewährleistung einer eindeutigen Identifizierbarkeit wurden die öffentlich zugänglichen Produkte mit einer digitalen Objekt-Identifikation (DOI) versehen. Eine Langzeitdatenbank, die solche DOIs ausstellen kann ist PANGAEA (www.Pangaea.de), weshalb sie als „Data Publisher for Earth & Environmental Science“ für die digitale Veröffentlichung der Daten gewählt wurde. Die Daten stehen unter der DOI <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.855987> zum Download zur Verfügung.

## 7 Projektbegleitende Öffentlichkeitsarbeit

Wegen des erwarteten großen Interesses des Fachpublikums und der Bevölkerung wurde eine Werbeagentur mit Sitz in Konstanz mit der Durchführung der Öffentlichkeitsarbeit beauftragt. Diese beinhaltete vor allem eine Konzeption und Entwicklung des Erscheinungsbildes, die Entwicklung, Erstellung und Pflege einer Projekt-Homepage, die Gestaltung einer Broschüre für die Öffentlichkeit, eine filmische Dokumentation des Projektes, das Layout des Abschlussberichtes und das Herstellen weiterer Materialien (Rollups) für Werbezwecke. Es wurde eine umfassende Pressearbeit mit der Aufbereitung von Informationen für die lokale, regionale und nationale Tagespresse, Fernsehen und andere analoge und digitale Medien gestartet. Insgesamt gab es drei Pressekonferenzen und sechs Presseaussendungen.

### 7.1 Das Erscheinungsbild des Projektes Tiefenschärfe

Ausgangspunkt für die Gestaltung des Erscheinungsbildes waren erste Vorschläge der Vorbereitungsgruppe der IGKB mit dem ursprünglichen Projektnamen „Bodensee digital – hochauflösende Tiefenvermessung“. Im April 2013 begannen die Arbeiten mit der Namensfindung: Aus meh-



rerer alternativen Vorschlägen (z.B. „Seeboden digital“, „Seegrund digital“, „Bodensee HD“) wurde der Projektname „Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee“ gewählt. Hierfür wurden Gestaltungsansätze entworfen, auf denen, neben dem mit einer Unschärfe versehenen Umriss des Bodensees, die Farbgebung, die Typografie und das Logo selbst definiert wurde (Abb. 7-1). Dieses Erscheinungsbild wurde für alle Anwendungen eingesetzt.

### 7.2 Die Website

Als zentrales Instrument der Öffentlichkeitsarbeit wurde im Zeitraum Mai bis September 2013 die Homepage [www.tiefenschaeerfe-bodensee.de](http://www.tiefenschaeerfe-bodensee.de) realisiert. Nach der grundlegenden Konzeption erfolgte die Gestaltung der Seite auf Basis des entworfenen Erscheinungsbildes, die Programmierung sowie das Entwerfen und die Generierung der Inhalte (Abb. 7-2).

Die Website wurde als Projektseite für das Fachpublikum, die interessierte Öffentlichkeit und Medienvertreter konzipiert, in der alle relevanten Informationen Platz finden. Das Ziel der Website ist die laufende und aktuelle Information der Zielgruppen, ohne Bereitstellung eines



Hochauflösende  
Vermessung  
Bodensee

Abb. 7-1: Name, Farbe, Typografie und Position des Schriftzuges wurde in mehreren Schritten entwickelt, bis das endgültige Projektlogo definiert war. Links ein erster Entwurf aus der Vorbereitungsgruppe mit dem ursprünglich gewählten Namen „Bodensee digital“.



Abb. 7-2: Die Startseite der Homepage zeigt ein Panoramabild auf dem Forschungsschiff „Kormoran“. Grundidee der Website war, die eindrucksvollen Bilder des Projektes in den Vordergrund zu stellen. Der News-Ticker zwischen Bild und Text informiert über aktuelle Ereignisse im Projekt.

internen Bereiches für die Projektpartner. In den inhaltlichen Menüpunkten wird über die Ziele und Nutzen des Projektes informiert, sowie allgemeine Inhalte zur Methodik der Vermessung per Fächerecholot und Laserscanning angeführt. Die Projektpartner und –beteiligten sind auf der Website genannt und die jeweiligen Internetauftritte verlinkt. Unter dem Menüpunkt „Presse/Bilder“ wurden den Nutzern Presstexte, Logos, Bild- und Filmmaterial zur Verwendung und Veröffentlichung zur Verfügung gestellt. Im Bereich „Pressespiegel“ wurde eine kleine Auswahl an Presseveröffentlichungen aufgeführt. Programmiert wurde die Projektseite mit dem Content-Management-System „rukzuk“. Die Seite war im Projektverlauf sehr gut frequentiert. Die höchsten Zugriffszahlen gab es jeweils kurz nach den Pressekonferenzen zu einzelnen Themen (Abb. 7-3).

### 7.3 Pressekonferenzen und -mitteilungen

Das Kernstück der Öffentlichkeitsarbeit war die Pressearbeit in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Hierzu wurde zu Projektbeginn ein Presseverteiler mit ca. 80 Medien der lokalen, regionalen und nationalen Medien aufgebaut, bestehend aus Tages- und Fachpresse, Fernsehsendern und Internetkanälen. Die Projektinformationen wurden für die lokale, regionale und nationale Tagespresse, das Fernsehen und andere analoge und digitale Medien aufbereitet. Neben einer allgemeinen Pressemappe wurden sieben spezifische Presstexte geschrieben.

Für das Kick-off Treffen des Projektes wurde am 25. Juni 2013 eine große internationale Pressekonferenz, verbunden mit einer Ausfahrt auf dem Forschungsschiff „Kormoran“, organisiert und eine Presseausendung durchgeführt. Mit

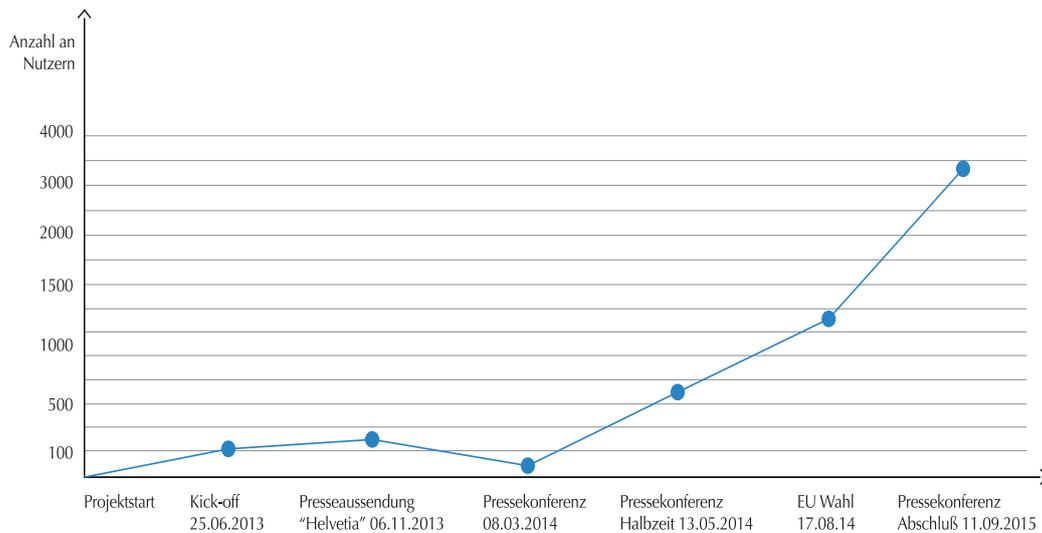


Abb. 7-3: In den Zugriffsstatistiken der Website ist deutlich abzulesen, wann Pressemitteilungen versendet wurden und Pressekonferenzen stattfanden. Die höchsten Zugriffszahlen erfolgten im August 2014 nach einem Bericht der Deutschen Presse-Agentur zur EU-Wahl mit nationaler Reichweite sowie im September 2015 nach der Berichterstattung zum Projektabschluss.

über 20 Medien- und Presseagenturvertretern aus drei Ländern wurde ein weit überdurchschnittliches Ergebnis von 107 Presseveröffentlichungen erzielt (Abb. 7-4).

Ein weiterer Termin wurde am 8. März 2014 auf dem Flugplatz Hohenems/ Österreich für Fernsehsender organisiert. Hier hatten die Kamerteams die Möglichkeit, an Bord des Vermessungsflugzeuges und einem Begleitflugzeug mitzufiegen, und über den Start der LIDAR-Befliegung zu berichten. (Abb. 7-5). Zudem wurde zur „Halbzeit“ des Projektes am 13. Mai 2014

eine weitere Pressekonferenz am Flugplatz Hohenems organisiert, da zeitgleich die Befliegung mit dem Laserscanner endete. Auch hier konnte mit über 10 Medienvertretern eine sehr gute Resonanz erzielt werden.

Die Abschluss-Veranstaltung am 11.09.2015 im Würth Haus in Rorschach, bei dem die Projektergebnisse vorgestellt wurden, zog dann neben über 100 Besuchern aus Verwaltungen, Politik und Wissenschaft auch eine große Zahl an Pressevertretern an. Mit mindestens festgestellten 77 Veröffentlichungen, in größerer Zahl auch in



Abb. 7-4: Bei der Pressekonferenz zum Kick-off des Projektes am 25. Juni 2013 waren alle Plätze im Institut für Seenforschung in Langenargen belegt.



Abb. 7-5: Bei bestem Wetter waren Fernseherteams aus drei Ländern auf dem Flugplatz Hohenems/ Österreich auf der Suche nach den besten Bildern.

landesweiten Medien, erhielt die Presseberichterstattung zum Abschluss des Projektes nochmals eine außerordentliche Präsenz in den Medien.

Neben den Pressekonferenzen erfolgten mehrere Presseausendungen: Anlässe waren der Besuch des Umweltministers des Landes Baden-Württemberg, Franz Untersteller, am 22. Juli 2013 auf dem Forschungsschiff Kormoran und der Wrackfund des Raddampfers „Helvetia“ vor Romanshorn im November 2013 (Abb. 7-6). Mit den Veröffentlichungen zum Projektabschluss im September 2015 wurden über 320 Presseveröffentlichungen gezählt.

## 7.4 Drucksachen

Im Verlauf des Projektes wurden mehrere Print-Produkte entwickelt. Als Halbzeit-Bilanz entstand eine Projektbroschüre, in der das Projekt vorgestellt, die Vermessungsmethoden erläutert, der Nutzen des Projektes beschrieben und ein Ausblick auf die zu erwartenden Ergebnisse gemacht wurde. Für den Projektabschluss wurde das Layout einer Karte mit dem fertigen Geländemodell des Bodensees im Maßstab 1:50.000 produziert. Zusätzlich wurde ein Plaspekt – eine Kombination aus Plakat und Prospekt – entwickelt. Auf der Vorderseite ist das Geländemodell des Bodensees im Maßstab 1:200.000 abgebildet, auf der Rückseite

werden die einzelnen Schritte des Projektes sowie die Zielsetzung und die Ergebnisse des Projektes in anschaulicher Form gezeigt. Alle wesentlichen Projektergebnisse wurden in dem vorliegenden Abschlussbericht zusammengefasst, dessen Layout ebenfalls Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit war.

## 7.5 Projektfilm

Projektbegleitend gab es an mehreren Tagen Dreharbeiten zur Herstellung einer Filmdokumentation, welche an der Abschlussveranstaltung am 11. September erstmals gezeigt wurde. Im Film sind die wichtigsten Projektschritte dokumentiert. So wurde das Forschungsschiff „Kormoran“ bei seinen Messfahrten mehrfach begleitet, wobei auch eine Unterwasserkamera zum Einsatz kam. Die Kamera flog mit den Vermessungen aus der Luft mit. In zahlreichen Interviews wurden die Projektbeteiligten über den Projektzeitraum zum jeweils aktuellen Stand des Projektes interviewt. Als Interviewpartner standen Dr. Martin Wessels (Projektleitung, ISF), Minister Franz Untersteller, Dr. Tobias Schneider (Interreg, Regierungspräsidium Tübingen), Prof. Dr. Flavio Anselmetti (Fächerecholotvermessung, Universität Bern), Frank Steinbacher (AHM, Laserscanning), Paul Wintersteller (Qualitätssicherung,



Abb. 7-6: In über 200 Metern Wassertiefe wurde ein großes Wrack anhand der Verzerrungen am Bug als Salondampfer „Helvetia“ identifiziert. Es wurde 1933 versenkt, eine damals nicht unübliche Form der Entsorgung.



Abb. 7-7: Szene aus dem Dokumentarfilm „Tiefenschärfe“. Das Forschungsschiff „Kormoran“ war sowohl wichtigste Ausgangsstation für die Dreharbeiten auf dem Bodensee, als auch zentrales Bildmotiv.

Universität Bremen), Berthold Klauser (LGL-BW) und Robert Roschlaub (LDBV) zur Verfügung. Die Interviews werden mit publikumswirksamen Bildern vom Bodensee und der eigentlichen Vermessung ergänzt (Abb. 7- 7).

Im Anschluss an die Dreharbeiten wurde das umfangreiche Filmmaterial gesichtet und geschnitten. Das Ergebnis ist eine Dokumentation des Projektes „Tiefenschärfe“ mit einer Länge von ca. 20 Minuten sowie einer kürzeren Version zur Aufführung bei der Abschlussveranstaltung und zur Verwendung in den Medien. Der Film wird nach Fertigstellung auf der Website integriert und den Medienvertretern zur Veröffentlichung zur Verfügung gestellt.

## 7.6 Präsentationen in Fachzeitschriften und auf politischer Ebene

Neben den oben genannten Aktivitäten der Werbeagentur wurden von der Projektleitung und den Vermessungsverwaltungen zahlreiche weitere Anfragen von Medien, Privatpersonen und Vereinigungen bearbeitet. Das Projekt wurde noch während der Projektlaufzeit in Fachzeitschriften präsentiert (Wessels et al. 2015a, 2015b, im Druck) und mit vielen Vorträgen der interessierten

Öffentlichkeit und dem Fachpublikum präsentiert (z.B. VoGIS Fachforum, Internationales 3D-Forum Lindau, INTERGEO, InfoVerm2016). Der politischen Ebene konnte das Projekt mit seinen Zielsetzungen für einen innovativen Gewässerschutz bei einem Besuch des baden-württembergischen Umweltministers (Abb. 7-8) und zusätzlich den versammelten Umweltministern sämtlicher Bundesländer und des Bundes präsentiert werden.



Abb. 7-8: Interesse auf höchster Ebene: Auf dem Forschungsschiff „Kormoran“ wurde der Umweltminister des Landes Baden-Württemberg, Franz Untersteller im Juli 2013 bei einer Ausfahrt über den aktuellen Stand des Projektes informiert.

## 8 Erste Verwendungen der Daten aus dem Projekt Tiefenschärfe

Die Daten des Projektes Tiefenschärfe fanden schon vor dem offiziellen Projektende bei vielen Stellen ein sehr großes Interesse. In diesem Kapitel werden einige wenige Nutzungen mit der Zielsetzung für einen nachhaltigen Gewässerschutz kurz genannt.

### 8.1 Projekte mit Daten aus dem Projekt Tiefenschärfe

#### 8.1.1 Das Projekt „Seezeichen“

Schon während der Vermessung mit dem Echolot wurde deutlich, dass es vor allem im Bereich des Überlingersees große Strukturen am Seeboden gibt, die sich nicht mit dem Auftreten von Hangrutschungen erklären lassen (Abb. 8-1). Die Strukturen ließen schnell die Vermu-

tung aufkommen, dass es sich um Grundwasserzutritte in den Bodensee handelt. Zutritte von Grundwasser unterhalb der Wasseroberfläche werden von Tauchern immer wieder berichtet und sind aufgrund der Geologie des Einzugsgebietes sehr plausibel: In der anstehenden Molasse des Bodenseegebietes gibt es intensiv genutzte Aquifere von besonderer Bedeutung für die Trinkwassergewinnung, von denen seit langem vermutet wird, dass sie in den Bodensee austreten.

Die Daten des Tiefenschärfe-Projektes werden verwendet, um diese mutmaßlichen Wasseraustrittsstellen zu lokalisieren und mit anderen Techniken zu charakterisieren (Bioindikatoren, Chemismus, Isotopie, seenphysikalische Parameter, Austrittsmengen), um so in einem Gesamtbild die möglichen Austauschprozesse zwischen Grund-

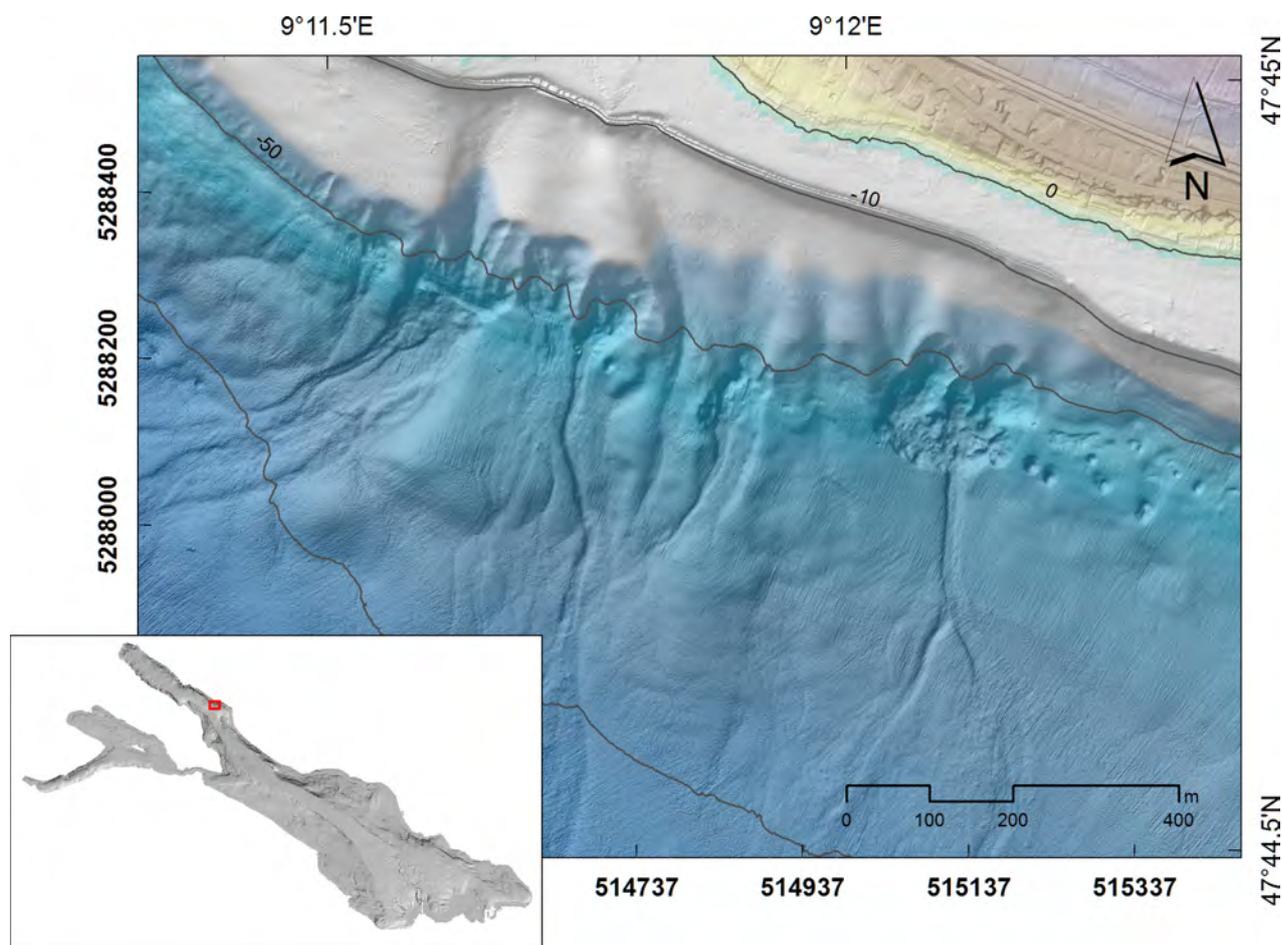


Abb. 8-1: Vermutete Grundwasserzutritte im Überlingersee.

wasser, Sediment und dem Seewasserkörper zu beschreiben. Damit gewinnt das unterirdische Einzugsgebiet des Bodensees an zusätzlicher Bedeutung für den Gewässerschutz, was wiederum bei entsprechenden Genehmigungsverfahren zur Grundwassernutzung zu beachten ist.

Das Projekt (Laufzeit April 2015 – März 2018) wird von den Partnern ISF, der Bodenseewasserversorgung (ZV BWV, Sipplingen), Büro Prof. Kobus und Partner (KuP, Stuttgart), der Technischen Universität Braunschweig und der Universität Bayreuth unter dem Namen „Seezeichen“ bearbeitet und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Förderschwerpunkt „Regionales Wasserressourcen-Management für den nachhaltigen Gewässerschutz in Deutschland“ (ReWaM) gefördert.

### 8.1.2 Das Projekt „HyMoBioStrategie“

In einem weiteren BMBF-Projekt aus demselben BMBF-Förderschwerpunkt mit derselben Laufzeit wird untersucht, welche Auswirkungen anthropogene Veränderungen in der Uferzone des Bodensees (Uferverbauungen, Hafenanlagen, Renaturierungen, Erosionssicherungen von UNESCO-Welterbestätten) auf Wellen und Strömungen, den Feststoffhaushalt, sowie auf Unterwasserfauna (Makrozoobenthos) und Unterwasservegetation (Makrophyten) der Uferzone haben. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf dem Verständnis der Kopplung von hydrodynamischen, hydromorphologischen und biozönotischen Prozessen, für welche eine detaillierte Kenntnis der Bodentopographie notwendig ist (Abb. 8-2). Von dem Projekt werden Lösungsvorschläge für eine

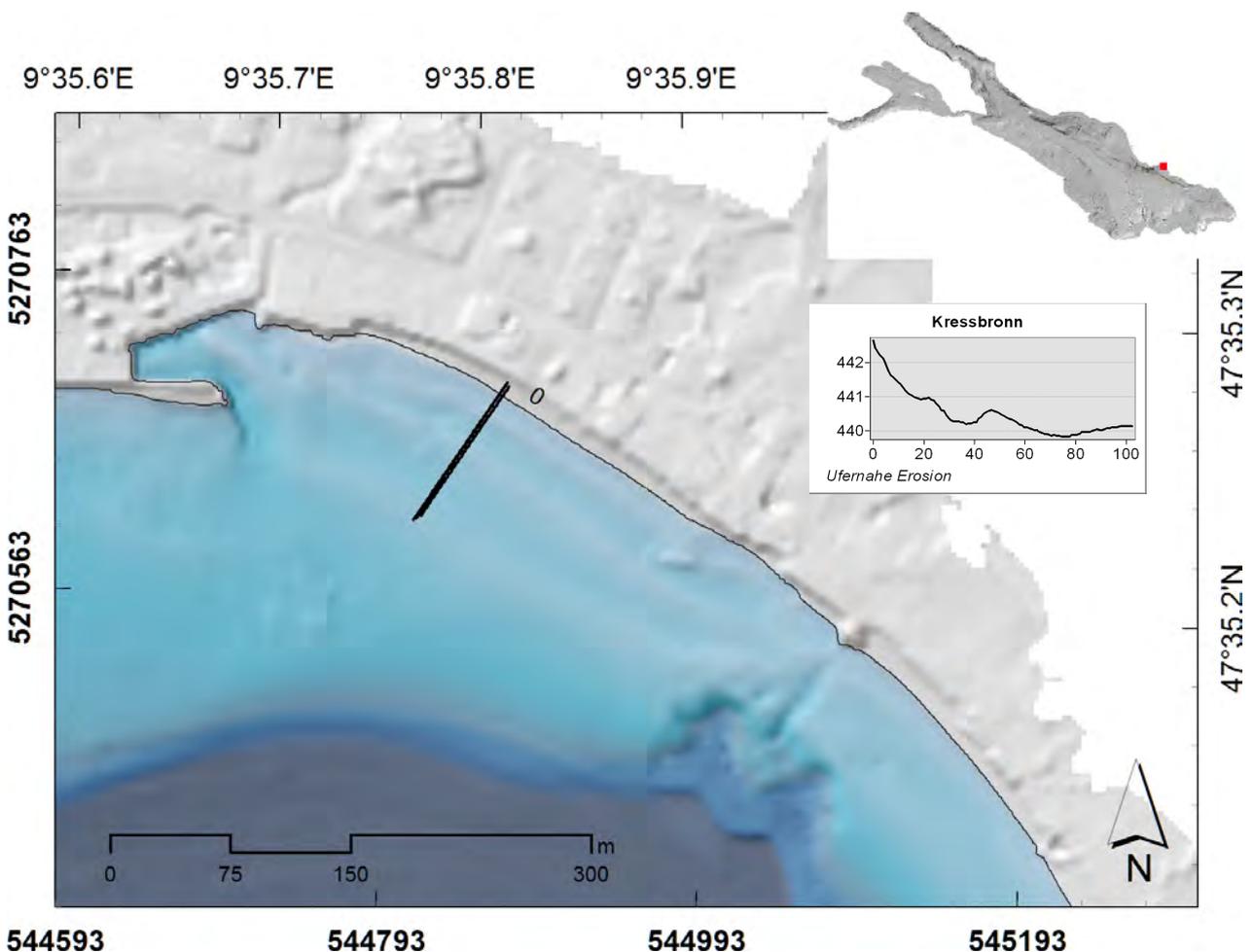


Abb. 8-2: Die Daten aus der Flachwasserzone in Kressbronn zeigen die Kleinräumigkeit der Ufermorphologie (siehe das eingelassene Höhenprofil entlang der schwarzen Linie). Deutlich sichtbar sind auch die starken Materialdefizite an dem Steg für die Fahrgastschiffahrt: An- und abliegende Schiffe sorgen hier für erhebliche Materialumlagerungen und Erosion.

nachhaltige Ufergestaltung/-renaturierung unter Berücksichtigung der vorhandenen intensiven Nutzungsansprüche (Erholung, Tourismus) und Nachhaltigkeitskonflikten (FFH, Natura 2000, UNESCO-Welterbestätten) erwartet, um den Renaturierungsleitfaden der IGKB (IGKB 2009) mit wissenschaftlich sehr anspruchsvollen Daten weiter abzusichern.

### 8.1.3 Seebodenstrukturen am Schweizer Seeufer

Im Rahmen des Tiefenschärfe-Projektes wurden entlang des Schweizer Seeufers eine Vielzahl von Erhebungen in 5-7 m Wassertiefe entdeckt, von denen die größten einen Durchmesser von ca. 25-30 m haben und 1-2 m aus dem Seeboden

herausragen (Abb. 8-3). Ein anderer Typ hat einen Durchmesser von etwa 10 m und ragt bis etwa 1 m aus dem Seeboden. Diese Strukturen sind von Romanshorn bis Güttingen gut erkennbar, und scheinen dort in Richtung Westen im Seeboden zu verschwinden.

Ursprünglich wurde vermutet, dass es sich um Artefakte (einzelne Fehlmessungen aufgrund der Überlagerung der Signale vom Fächerecholot und Sedimentecholot) handelt. Das konnte mit hoher Sicherheit ausgeschlossen werden, da die Strukturen auf mehreren Messprofilen jeweils an derselben Stelle mit sehr gut vergleichbaren Resultaten abgebildet wurden und auch nach dem Bereinigen einzelner Fehlmessungen erhalten blieben (Abb. 8-3, 8-5). Während der Fahrt mit einem flachseismischen Messsystem („boomer“)

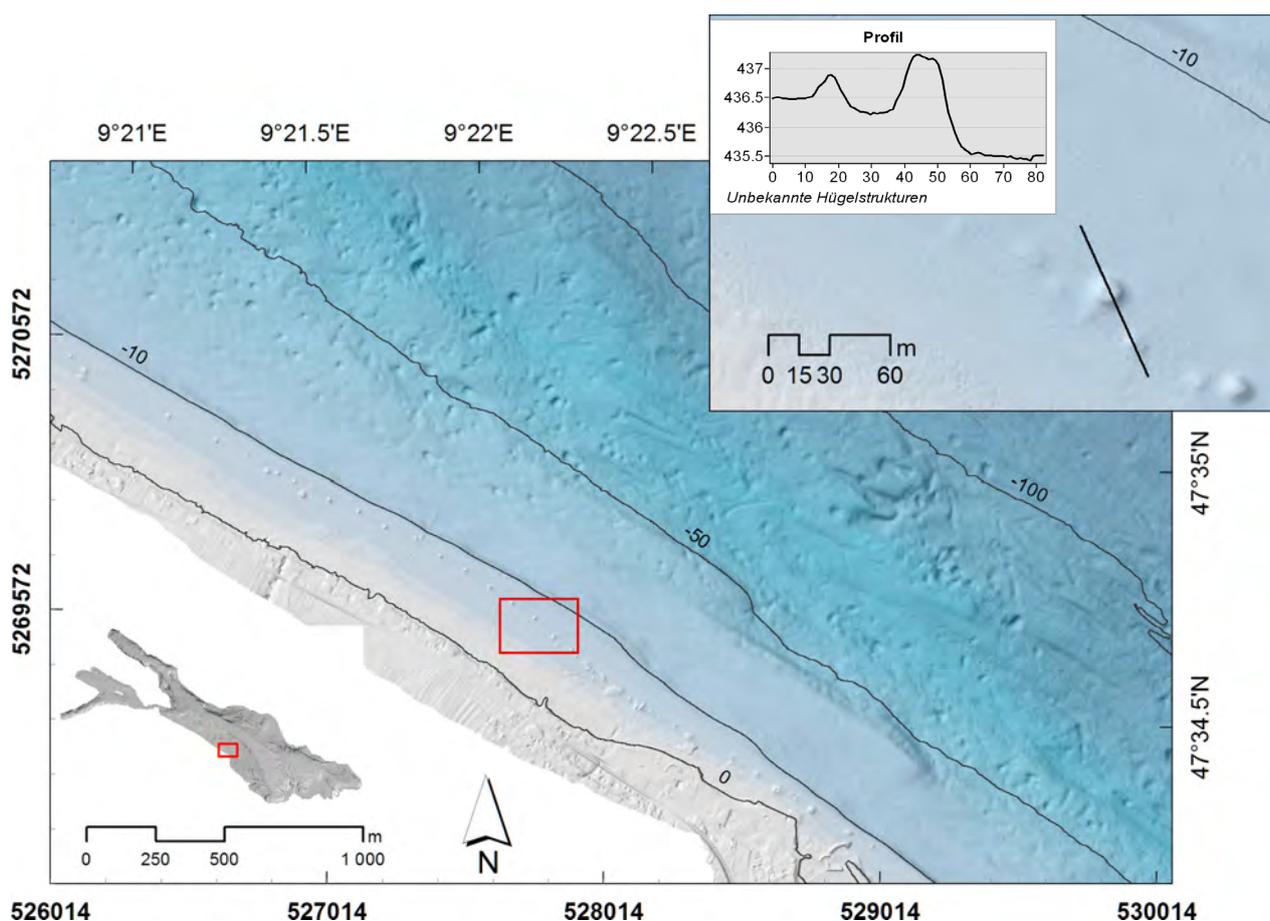


Abb. 8-3: Im Tiefenschärfe-Projekt wurde eine Vielzahl von bisher nicht bekannten Hügelstrukturen entlang des Schweizer Seeufers entdeckt. Ihre Entstehung ist derzeit nicht bekannt.

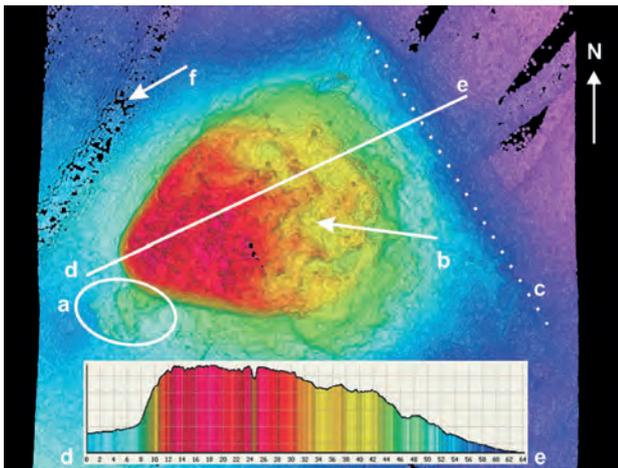


Abb. 8-4: Der „Mäuseturm“ in Güttingen ist ein hochmittelalterliches Bauwerk in der Flachwasserzone (aus: Schnyder & Wessels, 2013).

der Universität Bern konnte zudem gezeigt werden, dass die Strukturen vermutlich nicht mit dem tieferen Untergrund in Verbindung stehen (unveröff. Daten, Univ. Bern, ISF).

Die Abmessungen der oben beschriebenen Erhebungen erinnern an den „Güttinger Mäuseturm“, eine vermutlich hochmittelalterliche inselartige Untiefe mit Gebäuderesten (Abb. 8-4). Dieser „Mäuseturm“ ragt bei Abmessungen von ca. 30 \* 30 m etwa 2 m aus dem umgebenden Seegrund heraus (Schnyder & Wessels, 2013). Die kantonale Denkmalschutzbehörde wurde von den Funden in Kenntnis gesetzt, die eine erste taucherische Erkundung initiierte. Es zeigte sich, dass die Erhebungen aus größeren Steinen (bis 40 cm Durchmesser) bestehen. Eine vorläufige Hypothese ist, dass die Strukturen in früheren Zeiten zum Treideln von Schiffen genutzt wurden oder genutzt werden sollten. Eine natürliche Ursache, etwa das diese Erhebungen spätglaziale Relikte des Eisrückzuges oder im See durch Sortierungsprozesse geformt sein könnten, scheint angesichts der Regelmäßigkeit der Strukturen und der Größe der gefundenen Steine annähernd ausgeschlossen.

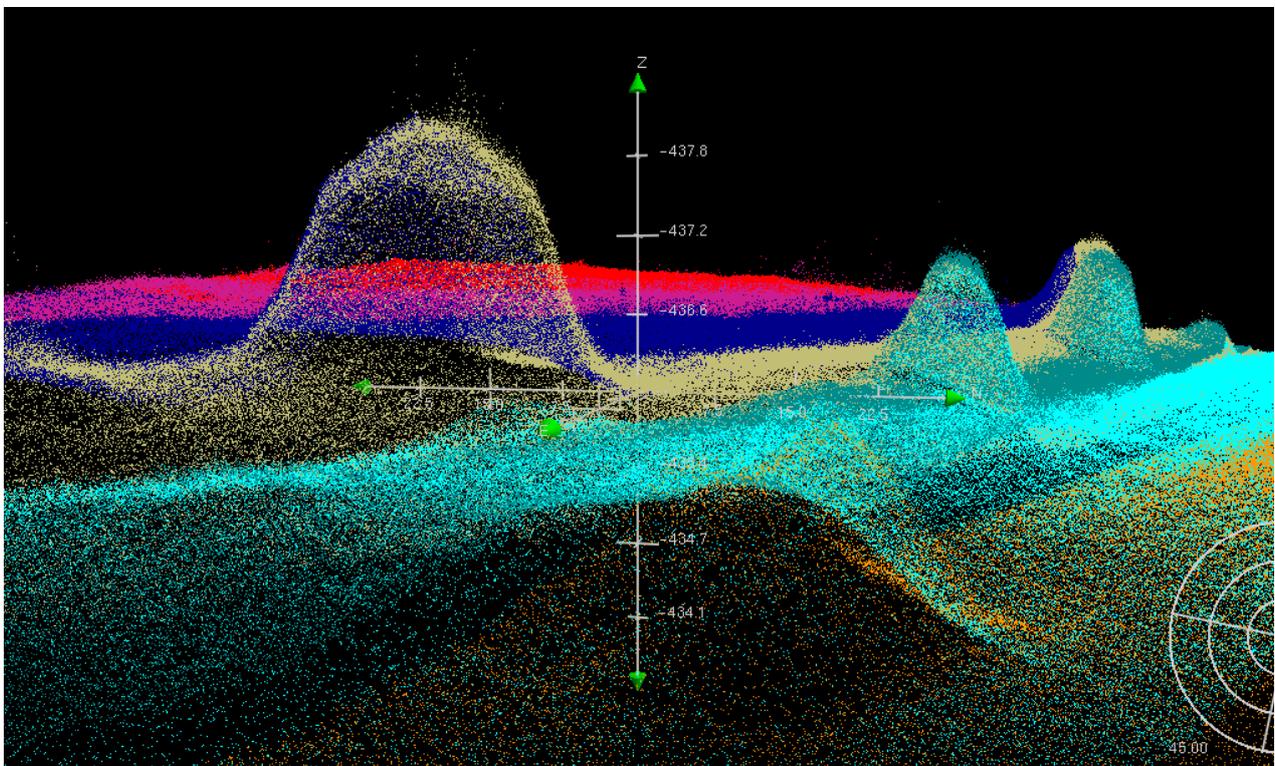


Abb. 8-5: Punktwolke der Hügelstrukturen am Thurgauer Seeufer. Die Daten einzelner Profile mit dem Fächerlot und dem Laserscanner sind unterschiedlich eingefärbt.

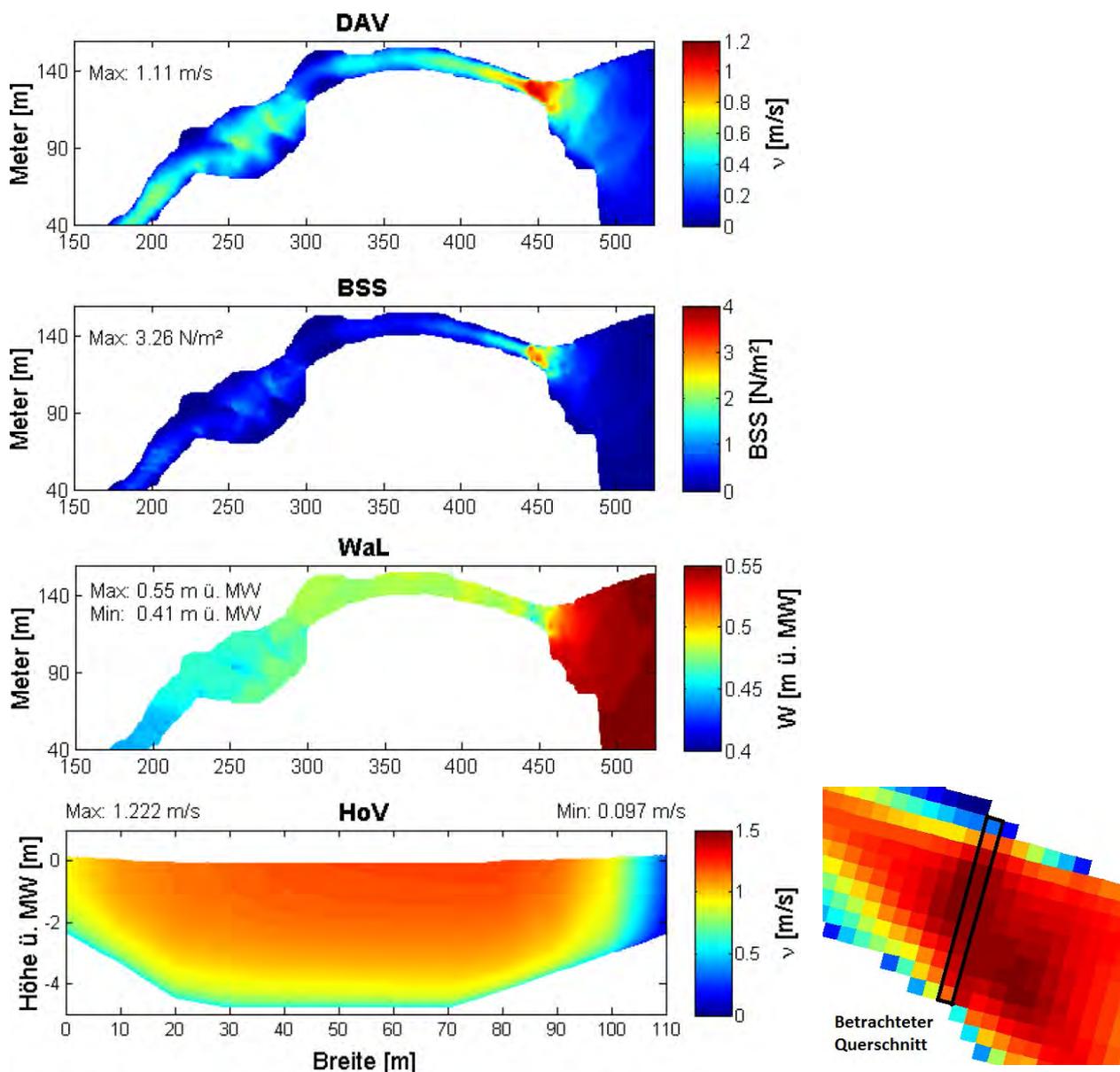


Abb. 8-6: Mit Modellrechnungen lassen sich einige hydrodynamische Parameter im Seerhein und Konstanz Trichter abschätzen. Die Ergebnisse hängen stark von der Güte und der räumlichen Auflösung der verwendeten Bathymetrie ab (Abbildung aus Pflugbeil, 2014; (DAV = tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit, BSS = Bodenschubspannung, WaL = Wasserstand, HoV = Horizontalgeschwindigkeit). Das verwendete Tiefenmodell für den Abfluss im Konstanz Trichter besitzt eine grobe Auflösung und kann mit den Tiefenschärfe-Daten deutlich besser gerechnet werden.

### 8.1.4 Hochauflösende Modellierung des Seerheins und des „Orkopfes“

Dreidimensionale hydrodynamische Modelle für Gewässer erfordern die Kenntnis über die Topographie des Gewässerbeckens. Die Qualität der Modellergebnisse wird durch die Präzision und Auflösung der bathymetrischen Daten maßgeblich beeinflusst. Insbesondere bei der Untersuchung von kleinskaligen Phänomenen,

wie z.B. Strömungs- und Transportvorgängen in der Flachwasserzone oder im Ausstrombereich des Sees, sind sehr hochauflösende Tiefendaten erforderlich, um die hydrodynamischen Vorgänge realitätsnah abbilden und somit möglichst belastbare Schlussfolgerungen ziehen zu können. Erhebliche Verbesserungen werden durch die neuen Daten des Tiefenschärfe-Projektes beispielsweise für die dreidimensionale hydrodynamische Untersuchung der Strömungen im Be-

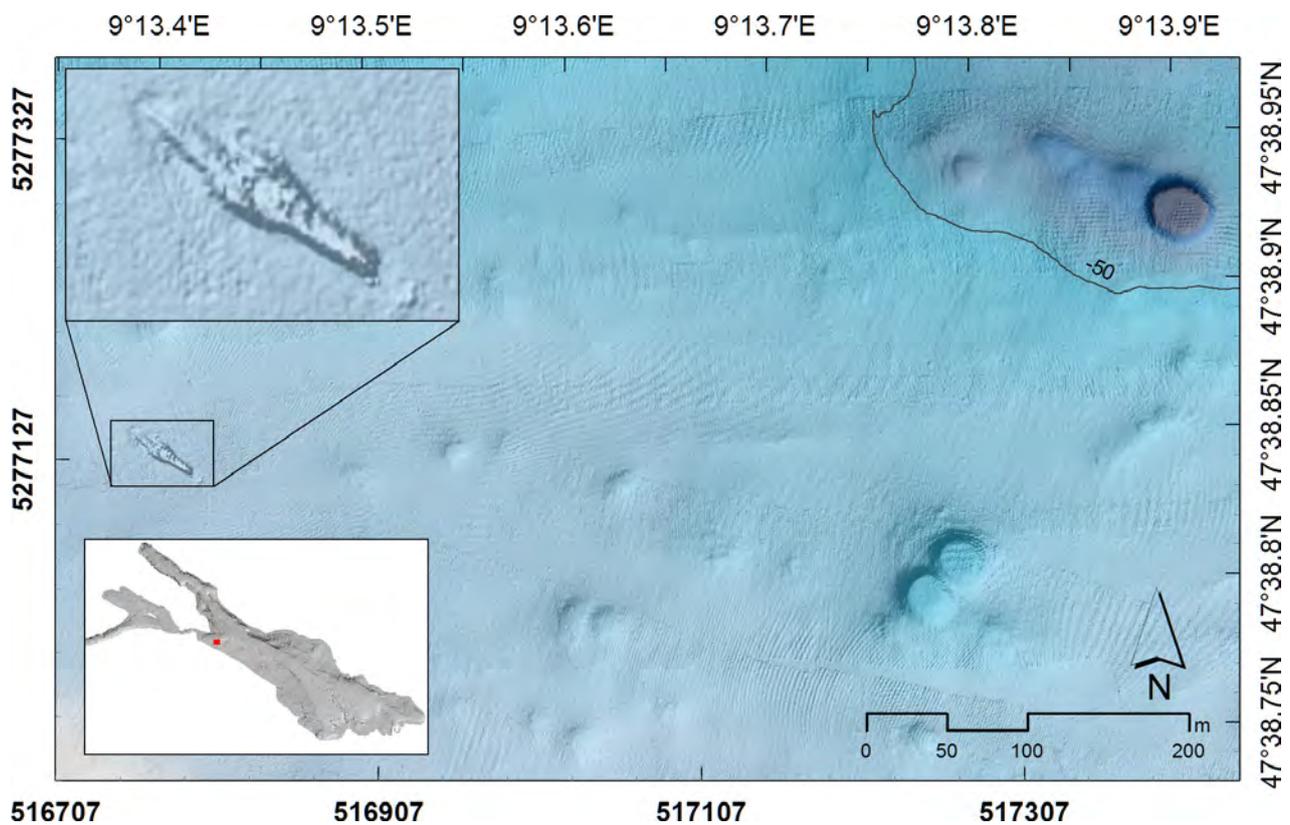


Abb. 8-7: Das Wrack des Schaufelraddampfers „Jura“ ist seit langem bekannt und ein beliebtes Ziel von Sporttauchern. Unweit der „Jura“ gibt es mehrere pockmarks: große, annähernd kreisrunde, Vertiefungen am Seeboden.

reich Seerhein bei Konstanz oder beim Orkopf bei Eschenz erzielt. Hier sind bei sehr weitreichenden Fragestellungen, wie der Wasserstandsdynamik und der Erosion von Abflussschwellen des Obersees und Untersees, erhebliche Wissenszugewinne zu erwarten, da die Modelle bislang mit den weniger gut aufgelösten Daten der Vermessung von 1990 durchgeführt wurden (Abb. 8-5, aus: Pflugbeil, 2014).

### 8.1.5 Schiffswracks am Seeboden

„Man kann nur schützen, was man kennt“ lautet ein häufig genannter Spruch. Im Projekt Tiefenschärfe wurden die Daten des Fächerecholotes auch im Hinblick auf Schiffswracks detailliert analysiert, um sie aus dem Datensatz zu entnehmen. In Abb. 8-6 wird am Beispiel des gut bekannten Schaufelraddampfers „Jura“ gezeigt, wie gut sich solche Objekte in den Daten abzeichnen. Im Rahmen einer Bachelorarbeit Jan-Derk

Groeneveld (2014) an der Universität Bremen wurden die Möglichkeiten zur Erkennung von Wracks anhand der statistischen Auswertung von bathymetrischen Fächerecholotdaten und deren Backscatter untersucht. Hieraus ergaben sich Hinweise auf 35 zum Teil bisher nicht bekannte Schiffswracks. Diese Daten stehen den zuständigen Denkmalschutzbehörden zur Verfügung, um sie mit bisher bekannten Fundmeldungen und Hinweisen abzugleichen. Gezielt kann nun weitergearbeitet werden, ob es sich dabei ggfls. um archäologisch bedeutsame Schiffswracks handelt und ob möglicherweise eine besondere Gefährdung für einzelne Wracks besteht.

### 8.1.6 Megarippel in der Flachwasserzone

Von Luftbildern bekannt sind Scharen großer, parallel zur Uferlinie verlaufender Megarippel, die an „Unterwasserdünen“ erinnern und vorzugsweise in Buchtsituationen auftreten. Diese

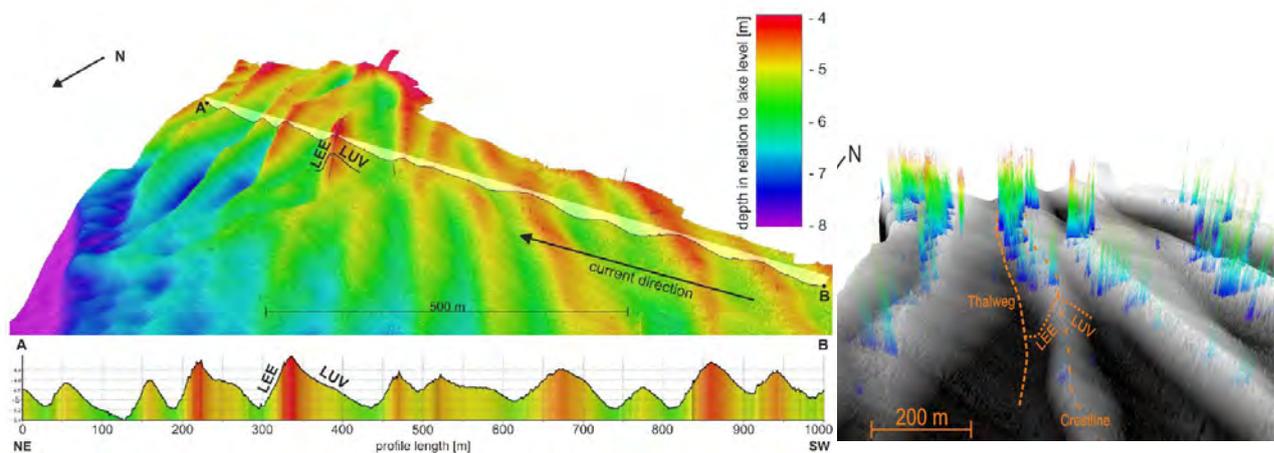


Abb. 8-8: Megarippel in der Flachwasserzone in der Nähe der Alpenrheinmündung am Rohrspitz. An der Kuppe der Strukturen treten Gasblasenströme aus (farbige Strukturen; aus: Brückner 2015).

Strukturen sind wenige Dezimeter hoch, haben Wellenlängen von einigen Zehnermetern und lassen sich mehrere hundert Meter (im Einzelfall auch Kilometer) parallel zum Ufer verfolgen (Abb. 8-7). Die Genese dieser Strukturen ist bislang nicht verstanden und naheliegende

Fragestellungen sind, ob sie ortsfest sind, ob es dauerhafte oder nur temporäre Strukturen sind, welche Mechanismen zu ihrer Bildung beitragen und welche Rückkopplungen es zwischen den Megarippeln und dem Makrophytenwachstum gibt. Indirekt hat das wiederum Auswirkungen

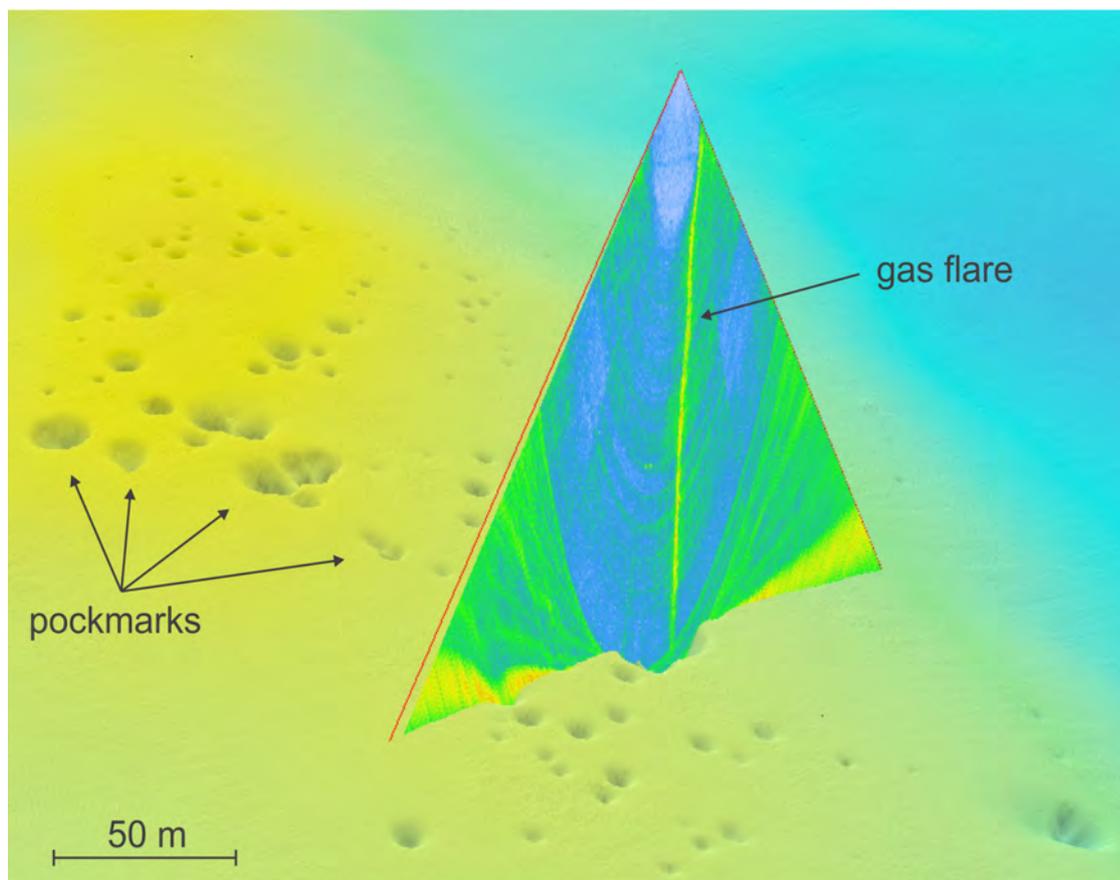


Abb. 8-9: Gasaustritt aus einer pockmark im östlichen Bodensee.

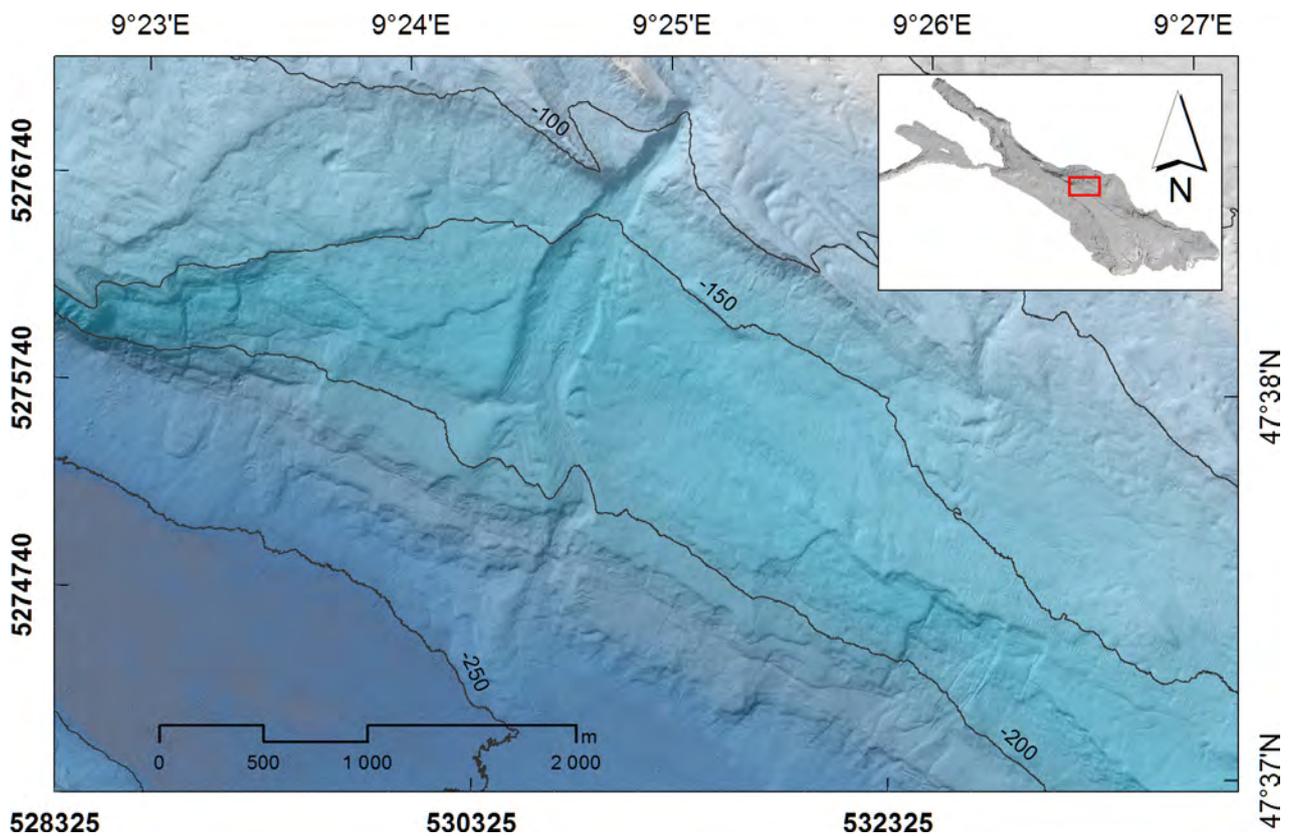


Abb. 8-10: Aus dem Auftreten von Hangrutschungen sollen Hinweise auf die seismische Aktivität der vergangenen Jahrtausende abgeleitet werden.

auf die Erosionsgefährdung der Seeufer. Mit den Daten der Vermessung werden die Geometrien dieser Megarippel erfasst, sodass sie konkret untersucht werden können (Praktikumsarbeit Felix Quick 2017). Es kann analysiert werden, ob es einen Bezug zwischen Verbauung und der Rippenstruktur gibt, da die Reflexionen an Mauern bzw. die Energiedissipation hier sicherlich eine Rolle spielt.

Beobachtet wurde zudem am Rohrspitz, dass Gasblasen aus den Kuppen der Megarippel austreten (Abb. 8-7). Hierbei handelt es sich vermutlich um Methan, das innerhalb des Sedimentkörpers entlang der Kuppe fokussiert wird und nach oben steigt. Jegliche Bilanzierung von Methankonzentrationen in der Flachwasserzone muss solche Rahmenbedingungen berücksichtigen. Eine erste detaillierte Untersuchung dazu war Thema einer Projektarbeit von Nils Brückner (2015) an der Universität Bremen.

### 8.1.7 Methanentgasungen aus dem Seeboden

Im Rahmen eines Projektes der Deutschen Forschungsgemeinschaft wurden die gleichzeitig aufgenommenen Daten der Wassersäule und des Seebodens verwendet, um den räumlichen Zusammenhang zwischen pockmarks (Wessels et al. 2010) und in der Wassersäule sichtbaren Gasaustritten weiter zu untersuchen. Es zeigt sich, dass diese pockmarks deutlich weiter verbreitet sind als ursprünglich vermutet wurde, es aber im westlichen Seeteil kaum Gasaustritte wie im östlichen Seeteil gibt (Abb. 8-6). Beispielfhaft wird in Abb. 8-8 gezeigt, dass im östlichen Obersee der Austritt von Methangas genau über der runden Trichterstruktur der Pockmark liegt.

### 8.1.8 Hangrutschungen

Insgesamt zeigte die Kartierung der Unterwasserlandschaften einen unerwarteten Formenreich-

tum am Seeboden (Abb. 8-9). Die Daten wurden in weiteren Arbeiten gezielt ausgewertet, um z.B. Hangrutschungen im Bodensee zu kartieren (Masterarbeit Brückner, 2016). Es können damit Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeit von Hangrutschungen bzw. besonders gefährdete Gebiete abgeleitet werden. Ergänzt man diese Daten mit älteren Hangrutschungen, können Hinweise auf die seismischen Aktivitäten der vergangenen Jahrtausende abgeleitet werden, da solche Hangrutschungen häufig von Erdbeben ausgelöst werden (Masterarbeit Tobias Schwestermann, 2016).

## 8.2 Nutzungen durch die Wasserwirtschaft und andere Interessenten

Neben den oben genannten Auswertungen wurden vorläufige Daten noch während der Projektlaufzeit für verschiedene Vorhaben der Wasserwirtschaft und weitere Interessengruppen bereitgestellt. Die folgende Aufzählung ist nicht vollständig, sondern soll lediglich einen Eindruck der Bandbreite der Verwendbarkeit der Daten geben:

- Für das Fischereizentrum in Steinach wird mit Hilfe der neuen Vermessungsdaten der Standort für eine neue Wasserentnahme aus dem See optimiert.
- Zur Vorbereitung eines Tests zur technischen Machbarkeit der Speicherung von Windstrom mit Hilfe am Seeboden verankerter hohler Betonkugeln wurden die Daten für eine Analyse möglichst nah am Ufer gelegener ebener Stellen in größeren Wassertiefen bereitgestellt. Das Projekt wurde zwischenzeitlich erfolgreich durchgeführt, sodass man nun an die Verwirklichung unter realen Bedingungen in 600 – 700 m Wassertiefe denkt.
- Für die Verlegung einer 20 kV Leitung unter dem Seerhein und durch den Untersee wurden vorläufige Daten verwendet, um eine optimale Trassenführung zu gewährleisten.
- Im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Hochschule Karlsruhe wurden in Zusammenarbeit mit einem Tauchsportverband und der Wasserschutzpolizei einige exemplarische Karten für Tauchplätze hergestellt. Mit vereinheitlichten Karten zur Planung von Tauchgängen an den attraktivsten Tauchplätzen soll das Tauchen im Bodensee für Sporttaucher sicherer gemacht werden (Bachelorarbeit Benedikt Futterer (2015)).
- Eine weitere Bachelorarbeit (Vanessa Weinstok, 2016) widmete sich dem Thema ob naturferne und naturnahe Uferabschnitte unterschiedliche Strukturen in der Flachwasserzone aufweisen. In zwei exemplarischen Abschnitten zeigte sich vor natürlichen Ufern eine höhere Strukturvielfalt als vor verbauten Ufern.
- Für touristische Zwecke wurde aus dem Datensatz eine hochwertig produzierte Karte des Bodensees von einem privaten Kartenverlage gedruckt (NaturNavi GmbH, 2016).
- Mit Hilfe der Tiefenschärfe-Daten und weiterer Sonardaten des ISF wurden vor dem Friedrichshafener Seeufer Prospektionen auf bislang nicht entdeckte Kampfmittel aus dem Krieg durchgeführt. Die Daten wurden zudem genutzt, um für das ROV (remotely operated vehicle, „Tauchroboter“) des ISF, der Wasserschutzpolizei und des Kampfmittelbeseitigungsdienstes detaillierte Karten bereitzustellen, um z.B. Sucheinsätze nach vermissten Personen oder wissenschaftliche Taucheinsätze effektiver durchzuführen.
- Die Tiefenschärfe-Daten zeigen im Bereich von Stegen der Ausflugschifffahrt zum Teil massive Erosionserscheinungen durch die An- und Ablegemanöver der „Weissen Flotte“ (vgl. Abb. 8-2). Die Schiffsbetreiber und Schiffsführer können nun mit realen und gut nachvollziehbaren

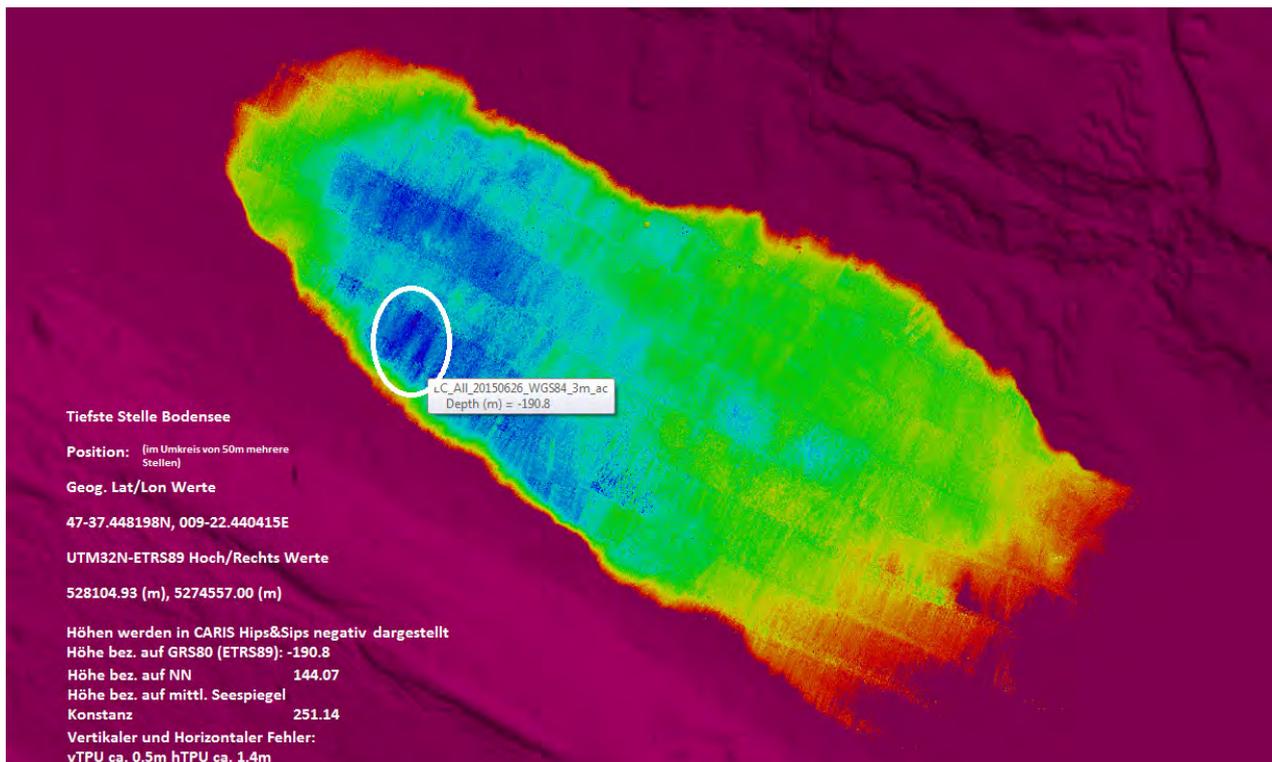


Abb. 8-11: Die tiefste Stelle von 251,1 m zwischen Fischbach und Uttwil. Farbige dargestellt sind etwa 6 Millionen Messwerte über 250 m Wassertiefe, die tiefste Stelle befindet sich in dem weißen Kreis.

Daten sensibilisiert werden, um möglichst eine den Seeboden schonende Fahrweise zu entwickeln.

- Mit den Tiefenschärfe-Daten wurden bei einer archäologischen Ausgrabung im Konstanzer Trichter die Seebodenhöhen erhoben, um die Fundlage besser beurteilen zu können. Zu Kontrollzwecken wurden die Tiefenschärfe-Daten mit eigenen Messungen (Leica 900, RTK-GPS) zwei Jahre nach der Befliegung verglichen. "Die Übereinstimmung ist verblüffend (keine Abweichung erkennbar)", so der federführende Archäologe M. Mainberger. Auch wenn das eher ein Eindruck als eine statistisch belastbare Aussage ist, zeigt es doch die sehr gute Verwendbarkeit der Tiefenschärfe-Daten.

### 8.3 Beschreibende Daten des Bodensees

Neben dem Darstellen der Strukturen wurden in den vergangenen Vermessungen jeweils einige beschreibende Werte angegeben (z.B. die maximalen und mittleren Tiefen). Naturgemäß führt eine erneute Vermessung zu Veränderungen der bisherigen statistischen Angaben, die für den Gewässerschutz nur eine sehr begrenzte Bedeutung haben. Die tiefste Stelle des Bodensees liegt zwischen Fischbach und Uttwil auf einer Höhe von 144 m über dem Meer, bezogen auf das Deutsche Haupthöhennetz (DHHN). Die daraus errechnete Wassertiefe beträgt 251,1 m, bezogen auf einen mittleren Wasserstand von 331 cm am Pegel Konstanz für den Bodensee Obersee (s. Abb. 8-10). Dem verwendeten Wasserstand liegen der Zeitraum 1.1.1980 – 31.12.2010 und die täglichen Aufzeichnungen des Pegels Konstanz zugrunde. Diese Tiefe wurde aus über 6 Millionen Datenpunkten mit einer Wassertiefe über 250 m berechnet.

Da alle verwendeten Sensoren eine hohe, aber nicht absolute Messgenauigkeit haben, lässt sich mit Hilfe der technischen Daten der einzelnen Sensoren eine so genannte TPU (total propagated uncertainty) für den akkumulierten Fehler der Messwerte berechnen, der sich wiederum aus einer horizontalen und vertikalen Komponente zusammensetzt. Für die tiefste Stelle im Bodensee errechnet sich ein horizontaler Fehler von 1,4 m bei einem vertikalen Fehler von 0,50 m (vgl. Kap. 5.4.5). Die Beiträge der Sensoren zum jeweiligen Gesamtfehler können aus der Abb. 5-7 entnommen werden.

### 8.4 Das Projekt Tiefenschärfe

In Kap. 5.4.5 wurden die IGKB-Vermessungen von 1990 und 2015 verglichen und Abweichungen bis 14 m beschrieben, die letztlich Ausdruck der technischen Entwicklung der Hydroakustik seit 1990 sind. Insgesamt sind die für diese neue Karte verwendeten Systemkomponenten deutlich

präziser und höher auflösend (bzw. waren sie 1990 noch gar nicht verfügbar). Wenige Zahlen des jeweils verwendeten Echolotes können zur Anschauung dienen: 1990 wurde ein Echolotsignal alle 8 – 10 m mit einem Öffnungswinkel von 9° ausgesendet und erfasst. Nun wurden bis zu 800 Signale mit je einem Öffnungswinkel von 1° aufgezeichnet, in flachen Gebieten wurden dabei Abtastraten bis zu 30 Hz erreicht. Die 1990 gewonnenen Datenpunkte der einzelnen Profile mit Abständen von bis zu 200 m konnten auf ein resultierendes Gitter von 40 m interpoliert werden. Nun wurde mit dem Fächerecholot jeder Quadratmeter mehrfach mit einem deutlich besser fokussierten Signal erfasst. Insgesamt lässt sich mit den neuen Verfahren eine um Größenordnungen bessere Abbildung von kleinräumigen Strukturen am Seeboden und eine wesentlich höhere Genauigkeit erreichen (Abb. 8-11). Das von der IGKB und dem Interreg-Programm geförderte Projekt trägt seinen Namen zu Recht: „Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee“.

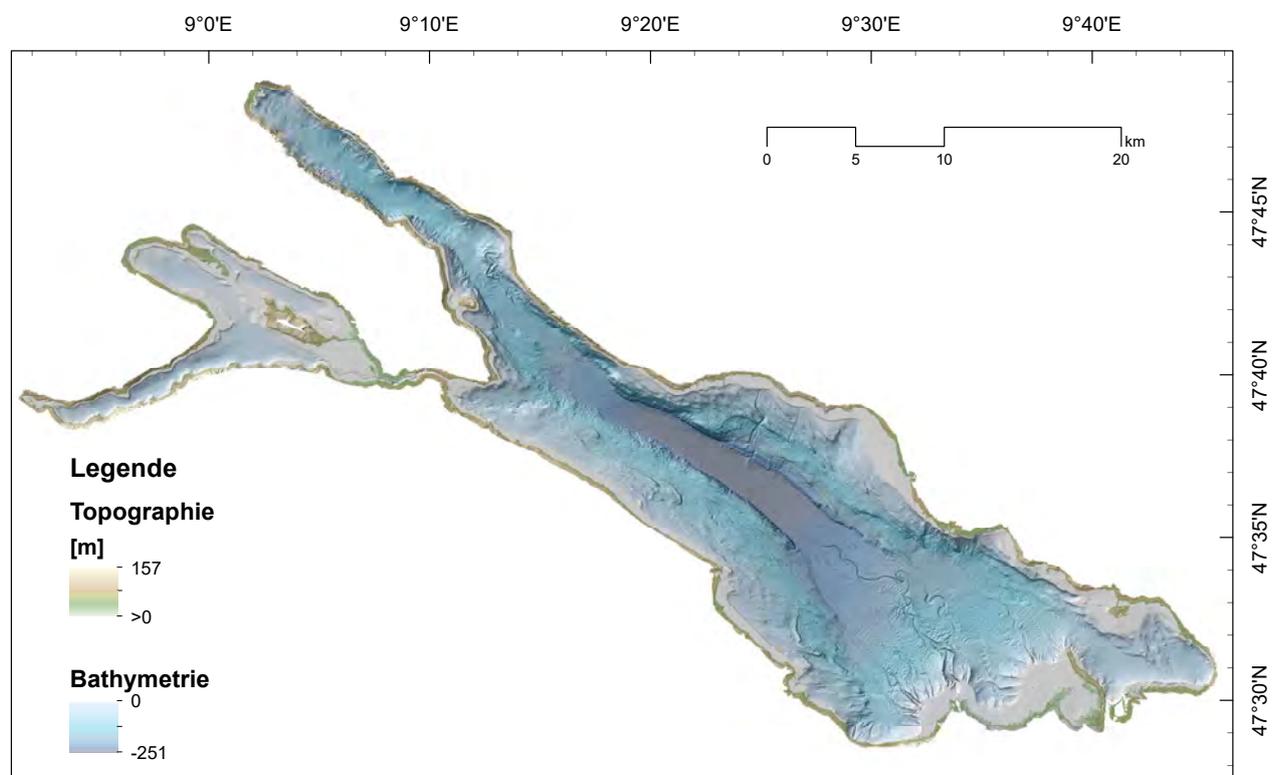


Abb. 8-12: Die neue Tiefenkarte aus dem Projekt „Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee“. Die Wassertiefen und die landseitigen Höhen sind auf den mittleren Wasserspiegel des Bodensee-Obersee bezogen.

## 9 Literaturverzeichnis

- Amt der Vorarlberger Landesregierung. Web map service for Vorarlberg, Austria. Available at [http://vogis.cnv.at/atlas/init.aspx?karte=basis-karten\\_und\\_bilder&ks=digitaler\\_atlas\\_vorarlberg&layout=vogis\\_atlas](http://vogis.cnv.at/atlas/init.aspx?karte=basis-karten_und_bilder&ks=digitaler_atlas_vorarlberg&layout=vogis_atlas) (accessed Jan. 2015).
- Bodensee-online (2015): Database on wind speed and wave heights for Lake Constance. Available at [www.bodenseeonline.de](http://www.bodenseeonline.de) (accessed July 14 2015), Kobus und Partner GmbH.
- Braun, E. & Schärpf, K. (1994): Internationale Bodensee-Tiefenvermessung 1990. - Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart, 98 S.
- Brückner, N. (2015): Current induced bedforms in the shallow water zone of Lake Constance (Central Europe) as a source of free methane. Unpublished Project-Thesis, University of Bremen.
- Brückner, N. (2015): Mass Transport Deposits within Lake Constance, Central Europe - GIS-based Analysis of High-Resolution Hydroacoustic Data. Unpubl. Master-Thesis, University of Bremen.
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. Digital online orthophoto viewer for Germany. Available at [http://sg.geodatenzentrum.de/web\\_bkg\\_webmap/applications/dop/dop\\_viewer.html](http://sg.geodatenzentrum.de/web_bkg_webmap/applications/dop/dop_viewer.html) (accessed Jan. 2015).
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (2016): Quasigeoid der Bundesrepublik Deutschland. Die Höhenreferenzfläche der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder, GCG2016 (German Combined Quasi Geoid 2016).
- 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.
- ESRI. Worldwide online web map service. Available at <http://www.esri.com/data/basemaps> (accessed Jan. 2015).
- Fofonoff, N.P. & Millard, R.C. (1983) Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. *Unesco Technical Papers in Marine Science*, 44, 53 S.
- Futterer, B. (2015): 3D-Modelle von Tauchplätzen im Bodensee. Unveröff. Bachelorarbeit, Hochschule Karlsruhe.
- Gaide, S. (2014): Evaluation of LiDAR processing tools with regards to bathymetric LiDAR at Lake Constance. Unpublished Project-Thesis, University of Bremen.
- Gardner, J.V., Mayer, L.A. & Hughs Clarke, J.E. (2000) Morphology and processes in Lake Tahoe (California-Nevada). *Geological Society of America Bulletin*, 112, 736-746.
- Gasser (1826): Bodensee-Tiefen und Entfernungen, Kubik-Inhalt seines Kessels und Höhe seines Spiegels über der Meeresfläche. *Württembergische Jahrbücher für vaterländische Geschichte, Geographie, Statistik und Topographie*, 107-118.
- Groeneveld, J.D. (2014): Optimierung der Prozessierung von Fächerecholotdaten für die Identifikation von Wracks und Objekten im Bodensee. Unveröff. Bachelorarbeit, Universität Bremen.
- Hecht, E. & Zajac, A. (2003): *Optics*; Fourth Edition, Pearson Higher Education, ISBN 978-0-321-18878-6.
- Hilbe, M., Anselmetti, F.S., Eilertsen, R.S., Hansen, L. & Wildi, W. (2011) Subaqueous morphology of Lake Lucerne (Central Switzerland): implications for mass movements and glacial history. *Swiss Journal of Geosciences*, 104, 425-443.
- Hörnlimann, J. (1893): Die Tiefenmessungen und das Kartenmaterial für die Herstellung der neuen Bodensee-Karte. *Schr. Ver. Gesch. Bodensee*, 22, S. 50-57.
- IGKB (1985): Tiefenvermessung des Bodensees, Begründung und Verfahrensvorschlag mit Zeitplan und Kostenverteilung. Anlage zur 31. Kommissionstagung 1985, unveröffentlicht.

- IGKB (2009): Renaturierungsleitfaden Bodenseeufer, IGKB, Bregenz, 93 S.
- IHO (2008): International Hydrographic Organization - Standards for Hydrographic Surveys (S44, 5th edition), [https://www.iho.int/iho\\_pubs/standard/S-44\\_5E.pdf](https://www.iho.int/iho_pubs/standard/S-44_5E.pdf).
- IRR (2009): Seegrundaufnahme vom Jahre 2008. Unveröff. Bericht der Internationalen Rheinregulierung, 41 S.
- 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.
- LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Web map service for Baden-Württemberg, Germany. Available at <http://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/pages/map/default/> (accessed Jan. 2015).
- 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.
- Mayer, L.A. (2006) Frontiers in seafloor mapping and visualization. *Marine Geophysical Researches*, 27, 7-17.
- Pflugbeil, T. (2014): Praktikumsbericht. Unveröffentlicher Praktikumsbericht, Institut für Seenforschung, 77 S.
- Polyanskiy, M.N. Refractive index database. Available at <http://refractiveindex.info> (accessed Feb. 29 2015).
- Quick, F. (2017). Untersuchung von Großrippeln am Bodensee. Unveröffentlicher Bericht zum Praktikum am Institut für Seenforschung der LUBW. 22 S.
- Rau, M. Weather station Kressbronn at Lake Constance with data archive. Available at <http://www.wetter-kressbronn.de/wetterdaten-archiv/> (accessed June 2015).
- Sastre, V., Loizeau, J.-L., Greinert, J., Naudts, L., Arpagaus, P., Anselmetti, F. & Wildi, W. (2010) Morphology and recent history of the Rhone River Delta in Lake Geneva (Switzerland). *Swiss Journal of Geosciences*, 103, 33-42.
- Schäfer, U.; Liebsch, G.; Barthelmes, F.; Pflug, H.; Petrovic, S. & Wessels, M. (2012): SGRAV2012 - eine schiffsgravimetrische Vermessung des Bodensees. Gravimetrie Workshop, Potsdam 2012.
- Schneid, S. & Meichle, H. (2005): Normalhöhen in Baden-Württemberg. Arbeiten zur Einführung von Höhen im System des Deutschen Haupthöhennetzes 1992 (DHHN92). In DVW Mitteilungen. Heft 2/2005, DVW Landesverein Baden-Württemberg [lv-bw.de](http://lv-bw.de).
- Schnyder, M. & Wessels, M. (2013): Güttingen Mäuseturm. In: Brem et al. (Hrsg.): Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee, Vorarlberg Museum Schriften 1: 217 - 220.
- Schwestermann, T. (2016): Mass-movement event stratigraphy in Lake Constance. Unpubl. Master-Thesis, ETH Zürich.
- 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.
- Weinstok, V. (2016): Uferstrukturen am Bodensee - GIS-gestützte Analyse hochauflösender Laserscanning-Daten von natürlichen und künstlichen Uferbereichen. Unveröff. Bachelorarbeit, Hochschule Konstanz.
- Wessels, M.; Bussmann, I.; Schlömer, S.; Schlüter & M.; Böder, V. (2010): Distribution, morphology, and formation of pockmarks in Lake Constance, Germany. *Limnol. Oceanogr.*, 55(6): 2623-2633.
- Wessels, M., Anselmetti, F., Hilbe, M. & Mainberger, M. (2013): Hydroakustische Methoden - Möglichkeiten und Grenzen zur Langzeitüberwachung archäologischer Denkmale im Flachwasser. In: Brem et al. (Hrsg.): Erosion und Denkmalschutz am Bodensee und Zürichsee, Vorarlberg Museum Schriften 1: 271-280.

- Wessels, M.; Anselmetti, F.; Artuso, R.; Baran, R.; Daut, G., Geiger, A.; Gessler, S.; Hilbe, M.; Möst, K.; Klausner, B.; Niemann, S.; Roschlaub, R.; Steinbacher, F.; Wintersteller, P.; Zahn, E. (2015a). Bathymetry of Lake Constance - State of the Art in Surveying a Large Lake. *Hydrographische Nachrichten* 100, 6-11.
- Wessels, M.; Anselmetti, F.; Artuso, R.; Baran, R.; Daut, G., Geiger, A.; Gessler, S.; Hilbe, M.; Möst, K.; Klausner, B.; Niemann, S.; Roschlaub, R.; Steinbacher, F.; Wintersteller, P.; Zahn, E. (2015b): Bathymetry of Lake Constance - a High-Resolution Survey in a Large, Deep Lake. *Zfv* 140: 203-210. DOI 10.12902/zfv-0079-2015.
- Wessels, M.; Brückner, N.; Gaide, S.; Wintersteller, P. (im Druck): Tiefenschärfe–die hochauflösende Vermessung des Bodensees. *WasserWirtschaft* 4 (2017), 28-33.
- Zeppelin, E. (1893): Ältere und neuere Bodensee-Forschungen und -Karten mit Einschluß der Arbeiten der für die Herstellung der neuen Karte und die wissenschaftliche Erforschung des Sees von den fünf Ufer-Staaten eingesetzten Kommissionen nebst zwei Originalberichten. *Schr. Ver. Gesch. Bodensee*, 22, S. 21-45.

## 10 Anhang

Das Projekt „Tiefenschärfe – Hochauflösende Vermessung Bodensee“ sollte auch als Vorlage für die Vermessung weiterer (größerer) Seen mit einer Kombination von Fächerecholot und topobathymetrischem Laserscanning dienen. Im Anhang sollen deshalb die relevanten Spezifikationen der Ausschreibungen dokumentiert werden.

### 10.1 Spezifikationen der Ausschreibungen

#### Auszug aus der Leistungsbeschreibung zur Vergabe der Qualitätskontrolle (QM)

2. Qualitätskontrolle Fächerecholot (März-Mai 2012/13)

2.1. Die Qualitätskontrolle hat sicherzustellen, dass die Fächerecholotdaten gemäß den „IHO Standards for Hydrographic Surveys (S44)“ (IHO S-44, 5th edition) erhoben werden und gemäß dem Leistungsverzeichnis für die Fächerecholotaufnahme (s. Anlage) durchgeführt werden.

2.3. Zur Qualitätskontrolle ist ein parametrisches Sedimentecholot zur Überprüfung der Tiefenmessungen zur Verfügung zu stellen und mit dem Fächerecholot auf Forschungsschiff Kormoran zu installieren (Seiteninstallation). Dabei sollen simultan mit dem Fächerlot die Sedimentoberflächen und tieferen Sedimentschichten während des gesamten Zeitraums erfasst werden. Der Auftragnehmer für den Projektteil „Fächerecholot“ ist in die Bedienung des parametrischen Sedimentecholotes einzuweisen, sodass die eigene Anwesenheit nicht dauerhafte erforderlich ist. Die Triggerung des Parametrischen Lotes ist auf das Fächerlot abzustimmen und vor Beginn der Arbeiten nachzuweisen. Von dem Projektteil Fächerecholot sind Navigationsdaten und Daten des motions sensors für die Korrektur des parametrischen Echolotes zu übernehmen.

2.4. Vor Beginn der Messungen werden mit dem Auftragnehmer der Fächerlotarbeiten tägliche Prüfroutinen für die Fächerecholotmessungen mit Forschungsschiff Kormoran festgelegt. Die täglichen Ausfahrtprotokolle und Prüfroutinen sind im Abstand von zwei Wochen zu überprüfen und abzunehmen.

2.5. Die Arbeitsroutinen für das Fächerecholot

sind an mindestens drei einzelnen Messtagen durch eine Begleitung der Ausfahrt zu überprüfen. Dabei sollen Kontrollprofile gefahren werden und Kontrollmessungen an einer ausreichenden Anzahl von Einzelpunkten stattfinden.

2.6. Einzelne Profile des parametrischen Sedimentecholotes sind nach Vorgabe durch die Projektleitung mit den Daten des Fächerlotes zu vergleichen.

3. Qualitätskontrolle airborne laserscanning (Winter 2013/14)

3.1. Gemeinsam mit den Vermessungsverwaltungen erarbeiten von Rahmenbedingungen für die LIDAR-Befliegung.

3.2. Prüfung der Algorithmen zur Bodenerkennung aus der Befliegung.

3.3. Überprüfung der geforderten Punktdichten sowie der Lage- und Höhenqualität anhand zur Verfügung gestellter Referenzflächen.

3.4. Überprüfung der Plausibilität von DGM-Daten und Orthofotos, Freigabe der prozessierten LIDAR-Daten.

4. Qualitätskontrolle Gesamtprojekt

4.1. Überprüfung von Überlappungsbereichen der Fächerlotdaten und LIDAR-Daten und Vorschläge für Korrektur von Fehlern

4.2. Freigabe der Daten aus 2. und 3.

#### Auszug aus der Leistungsbeschreibung zur Vergabe der Fächerlotmessung

1.4. Die Messungen mit dem Fächerecholot sind mit dem Forschungsschiff „Kormoran“ der LUBW-ISF im Zeitraum 1. März – 15. Juni 2013 sowie im Februar 2014 durchzuführen. ...an insgesamt 12 -15 Tagen (wegen anderer Arbeiten) sowie an Wochenenden steht das Schiff nicht zur Verfügung.

1.5. Das Airborne Laserscanning soll im Zeitraum Dezember 2013 - April 2014 erfolgen, voraussichtlich im Sommer 2015 wird das gesamte Projekt abgeschlossen. Die Fächerlotdaten sollten bis zur Befliegung zur Plausibilitätskontrolle vorliegen

2. Technische Spezifikationen und Durchführung der Messungen

2.4. Die Tiefendaten müssen entsprechend den Vorgaben der Spezifikationen der „IHO Stan-

dards for Hydrographic Surveys (S44) (IHO S-44, 5th edition, s. Tabelle 1) gewonnen werden, nach Möglichkeit sind die Genauigkeitsanforderungen der „Special order“ zu erfüllen.

2.8. Die Messungen müssen flächendeckend bis in eine Wassertiefe von 5 m durchgeführt werden. In Wassertiefen über 200 m muss im Mittel mindestens ein Messwert / m<sup>2</sup> generiert werden. In Wassertiefen von 100 – 200 m müssen mindestens zwei Messwerte / m<sup>2</sup> generiert werden. In Wassertiefen bis 100 m müssen mindestens 5 Messwerte / m<sup>2</sup> generiert werden.

2.10. Messungen in einzelnen, nacheinander abzuarbeitenden Abschnitten sind auf Gebiete mit Kantenlängen von maximal vier Kilometer zu begrenzen. Parallel gefahrene Profile müssen eine Überdeckung von 110 % gewährleisten (Nadir-überdeckend). Zudem ist je Messgebiet ein Profil senkrecht zu den anderen Profilen zu fahren.

3. Postprocessing

3.1. Bezugssystem für die Übergabe der Vermessungsdaten ist ETRS 89 mit ellipsoidischen Höhen. Zur Präsentation und Abgabe an andere Nutzer werden Gebrauchshöhen („NN-Höhen“) verwendet, Abbildungen sollen in UTM 32 angefertigt werden.

3.4. Das Prozessieren der Daten muss in Absprache mit dem Auftraggeber im Dezember 2013 abgeschlossen sein. Die Daten aus der Aufnahme im Februar 2014 müssen für das airborne hydromapping als Referenzdaten zur Verfügung stehen.

3.5. Sämtliche Messungen und das Nachprozessieren sind in einem gedruckten technischen Bericht zu dokumentieren.... Der gesamte Projektteil Fächerecholotaufnahme muss zum 30.Juni 2014 abgeschlossen sein.

Das Werk ist bis spätestens zum 30.09.2014 herzustellen und dem Auftraggeber zu übergeben.

### **Auszug aus der Leistungsbeschreibung zur Vergabe der Laservermessung**

3. Befliegung mittels ALS und Luftbildkamera

3.2. Befliegungsparameter

Die Überlappung zweier benachbarter Flug-

streifen quer zur Flugrichtung (Querüberdeckung) muss mindestens 50% betragen (es muß eine lückenlose Abdeckung des gesamten Projektgebietes mit zumindest zwei Flugstreifen eingehalten werden). Die Flugstreifen müssen so geplant werden, dass Scanschatten möglichst vermieden werden. An den Enden der Längs-streifen und in Abständen von ca. 10 bis 15 km sind Querstreifen zu fliegen.

3.2.1. Punktdichte oberhalb der Wasseroberfläche (Land)

„Die Befliegung muss so durchgeführt werden, dass im Landbereich des Projektgebietes eine mittlere Punktdichte der ALS-Daten von mindestens 10 Punkten pro 1m<sup>2</sup> (pro Flugstreifen mindestens 5 Punkte pro 1m<sup>2</sup>) erreicht wird. Außerdem müssen in einem vom AG definierten regelmäßigen Raster von 10 m x 10 m großen Analyseeinheiten für jeden Flugstreifen zu-mindest folgende Kriterien erfüllt werden (ausgenommen davon Bereiche die zu einer gerichteten Reflexion führen, wie z.B.: Glasflächen oder einzelne Oberflächen die den Laserpuls nicht ausreichend reflektieren, wie z.B. frische Asphaltflächen):

- In 90% der Analyseeinheiten liegen min. 500 Punkte.
- In 95% der Analyseeinheiten liegen min. 250 Punkte.
- In max. 5% der Analyseeinheiten liegen min. 125 Punkte.

3.2.2. Punktdichte unterhalb der Wasseroberfläche (Wasser)

Wassertiefe 0 bis 2 m:

Hier gelten dieselben Anforderungen wie für den Landbereich (10 Punkte pro 1m<sup>2</sup> für das Projektgebiet).

Wassertiefe 2 bis 4 m:

In diesem Tiefenbereich soll eine Punktdichte von mindestens 6 Punkten pro 1m<sup>2</sup> (pro Flugstreifen mindestens 3 Punkte pro 1m<sup>2</sup>) erreicht werden. Außerdem müssen in einem vom AG definierten regelmäßigen Raster von 10 m x 10 m großen Analyseeinheiten für jeden Flugstreifen zumindest folgende Kriterien erfüllt werden:

- In 90% der Analyseeinheiten liegen mind. 300 Punkte.

- In 5% der Analyseeinheiten liegen mind. 125 Punkte.

- In max. 5% der Analyseeinheiten liegen mind. 63 Punkte.

Wassertiefe 4 bis 6 m:

In diesem Tiefenbereich soll eine Punktdichte von mindestens 4 Punkten pro 1m<sup>2</sup> (pro Flugstreifen mindestens 2 Punkte pro 1m<sup>2</sup>) erreicht werden. Außerdem müssen in einem vom AG definierten regelmäßigen Raster von 10 m x 10 m großen Analyseeinheiten für jeden Flugstreifen zumindest folgende Kriterien erfüllt werden:

In 90% der Analyseeinheiten liegen mind. 200 Punkte.

In 5% der Analyseeinheiten liegen mind. 100 Punkte.

In max. 5% der Analyseeinheiten liegen mind. 50 Punkte.

### 3.3. Befliegungszeitraum

Die Befliegung durch den Auftragnehmer (AN) hat im Winter 2013/2014 (ab Dezember 2013) in Absprache mit dem Auftraggeber erfolgen.

## 4. Georeferenzierung und Qualitätskontrolle der ALS Daten

### 4.1. Oberhalb der Wasseroberfläche (Land)

Absolute Genauigkeit der Laserpunkte:

- Absolute Lagegenauigkeit:  $\pm 20$  cm (Standardabweichung)

- Absolute Höhengenaugigkeit:  $\pm 10$  cm (Standardabweichung)

Relative Genauigkeit der Laserpunkte:

- Maximale Lagedifferenz zweier Flugstreifen:  $\pm 15$  cm (Standardabweichung)

- Maximale Höhendifferenz zweier Flugstreifen:  $\pm 7,5$  cm (Standardabweichung)

### 4.2. Unterhalb der Wasseroberfläche (Wasser)

Wassertiefe 0 bis 2 m:

- Hier gelten dieselben Anforderungen wie für den Landbereich (Abschnitt 4.1).

Wassertiefe 2 bis 4 m:

Absolute Genauigkeit der Laserpunkte:

- Absolute Lagegenauigkeit:  $\pm 30$  cm (Standardabweichung)

- Absolute Höhengenaugigkeit:  $\pm 15$  cm (Standardabweichung)

Relative Genauigkeit der Laserpunkte:

- Maximale Lagedifferenz zweier Flugstreifen:  $\pm 20$  cm (Standardabweichung)

- Maximale Höhendifferenz zweier Flugstreifen:  $\pm 10$  cm (Standardabweichung)

Wassertiefe 4 bis 6 m:

Absolute Genauigkeit der Laserpunkte:

- Absolute Lagegenauigkeit:  $\pm 30$  cm (Standardabweichung)

- Absolute Höhengenaugigkeit:  $\pm 20$  cm (Standardabweichung)

Relative Genauigkeit der Laserpunkte:

- Maximale Lagedifferenz zweier Flugstreifen:  $\pm 20$  cm (Standardabweichung)

- Maximale Höhendifferenz zweier Flugstreifen:  $\pm 12$  cm (Standardabweichung)

## 7. Luftbildaufnahmen

### 7.4. Anforderungen an die optionale Erweiterung eines Orthophotomosaiks

#### 7.4.1. Aerotriangulation

Die Lagegenauigkeit (als zweidimensionaler Helmertscher Punktlagefehler), nach Bündelblockausgleich für Drei- und Mehrfach-Verknüpfungspunkte, muss im Mittel besser sein als 7cm.

#### 7.4.2. Berechnung der Orthophotos

#### 7.4.3. Mosaikierung

Der AN hat die zentralen Bildbereiche zu verwenden.

- Das Mosaik muss gänzlich frei sein von Wolken und Wolkenschatten.

- Mehrfach- oder auch Doppel-Abbildungen sind auszuschließen.

- Durch projizierende Abbildung oder sichttote Räume bedingte Bildstörungen sind durch Auswahl eines geeigneten Bildes zu beseitigen oder soweit wie technisch möglich zu minimieren.

#### 7.4.4. Geometrische Genauigkeit des Orthophotos

Als maximal zulässiger Lagefehler für die Orthophotos wird eine Toleranz von 0.5 m verbindlich festgelegt.

## 10.2 Anforderungen der IHO

Die folgende Tabelle dokumentiert die Anforderungen der "International Hydrographic Organization" (IHO) in ihrer derzeit aktuellen Version vom Februar 2008. Das Projekt Tiefen-

schärfe orientierte sich an den strengen Vorgaben der "special order" (IHO STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS (S-44) 5th Edition February 2008). SUMMARY OF IHO MINIMUM STANDARDS FOR HYDROGRAPHIC SURVEYS.

Order	Special	1a	1b	2
<b>Description of areas.</b>	Areas where under-keel clearance is critical	Areas shallower than 100 metres where under-keel clearance is less critical but features of concern to surface shipping may exist.	Areas shallower than 100 metres where under-keel clearance is not considered to be an issue for the type of surface shipping expected to transit the area.	Areas generally deeper than 100 metres where a general description of the sea floor is considered adequate.
<b>Maximum allowable THU 95% Confidence level</b>	2 metres	5 metres + 5% of depth	5 metres + 5% of depth	20 metres + 10% of depth
<b>Maximum allowable TVU 95% Confidence level</b>	a = 0.25 metre b = 0.0075	a = 0.5 metre b = 0.013	a = 0.5 metre b = 0.013	a = 1.0 metre
<b>Full Sea floor Search</b>	Required	Required	Not required	Not required
<b>Feature Detection</b>	Cubic features > 1 metre	Cubic features > 2 metres, in depths up to 40 metres; 10% of depth beyond 40 metres	Not Applicable	Not Applicable
<b>Recommended maximum Line Spacing</b>	Not defined as full sea floor search is required	Not defined as full sea floor search is required	3 x average depth or 25 metres, whichever is greater. For bathymetric lidar a spot spacing of 5 x 5 metres	4 x average depth
<b>Positioning of fixed aids to navigation and topography significant to navigation. (95% Confidence level)</b>	2 metres	2 metres	2 metres	5 metres
<b>Positioning of the Coastline and topography less significant to navigation (95% Confidence level)</b>	10 metres	20 metres	20 metres	20 metres
<b>Mean position of floating aids to navigation (95% Confidence level)</b>	10 metres	10 metres	10 metres	20 metres

Notes:

1: Recognising that there are both constant and depth dependent uncertainties that affect the uncertainty of the depths, the formula below is to be used to compute, at the 95% confidence level, the maximum allowable TVU. The parameters "a" and "b" for each Order, as given in the Table, together with the depth "d" have to be introduced into the formula in order to calculate the maximum allowable TVU for a specific depth:

$$\pm \sqrt{a^2 + (b * d)^2}$$

Where:

- a represents that portion of the uncertainty that does not vary with depth
- b is a coefficient which represents that portion of the uncertainty that varies with depth
- d is the depth
- b x d represents that portion of the uncertainty that varies with depth

- 2: For safety of navigation purposes, the use of an accurately specified mechanical sweep to guarantee a minimum safe clearance depth throughout an area may be considered sufficient for Special Order and Order 1a surveys.
- 3: A cubic feature means a regular cube each side of which has the same length. It should be noted that the IHO Special Order and Order 1a feature detection requirements of 1 metre and 2 metre cubes respectively, are minimum requirements. In certain circumstances it may be deemed necessary by the hydrographic offices / organizations to detect smaller features to minimise the risk of undetected hazards to surface navigation. For Order 1a the relaxing of feature detection criteria at 40 metres reflects the maximum expected draught of vessels.
- 4: The line spacing can be expanded if procedures for ensuring an adequate sounding density are used. "Maximum Line Spacing" is to be interpreted as the:
  - Spacing of sounding lines for single beam echo sounders, or the
  - Distance between the useable outer limits of swaths for swath systems.
- 5: These only apply where such measurements are required for the survey.

### 10.3 Beteiligte Personen und Institutionen

Funktionen der wesentlichen, mit der Durchführung des Projektes beteiligten Personen dokumentiert.

In der folgenden Tabelle sind die Namen und

Name	Institution	Aufgabe
<b>Projektleitung und -Unterstützung</b>		
Martin Wessels	ISF	Projektleitung und -koordination
Gerd Schröder	ISF	Projektleitung und -koordination
Roberto Artuso	swisstopo	Vertreter Vermessungsverwaltung
Christoph Hermann	LGL-BW	Vertreter Vermessungsverwaltung
Berthold Klauer	LGL-BW	Vertreter Vermessungsverwaltung
Thomas Mayer	LDBV	Vertreter Vermessungsverwaltung
Karin Möst	LDBV	Vertreter Vermessungsverwaltung
Robert Roschlaub	LDBV	Vertreter Vermessungsverwaltung
Ernst Zahn	BEV	Vertreter Vermessungsverwaltung
<b>Aufnahme mit dem Fächerecholot &amp; Datenprozessierung</b>		
Flavio Anselmetti	Universität Bern	Organisation und Koordination, Leitung Vermessung mit Echolot
Benjamin Bellwald	Universität Bern	Durchführung Vermessungsarbeiten
Tiago Biller	Universität Bremen	Datenprozessierung
Nils Brückner	Universität Bremen	Datenprozessierung
Jan Derk Groeneveld	Universität Bremen	Datenprozessierung
Michael Hilbe	Universität Bern	Planung und Durchführung Vermessungsarbeiten, Datenprozessierung
Steffen Niemann	Universität Bern / Universität Konstanz	Planung und Durchführung Vermessungsarbeiten, Datenprozessierung
Tingting Wu	Universität Bremen	Datenprozessierung
Jiangong Wei	Universität Bremen	Datenprozessierung

Name	Institution	Aufgabe
<b>Aufnahme mit dem Laserscanner &amp; Datenprozessierung</b>		
Frank Steinbacher	AHM	Organisation und Koordination, Leitung Vermessung mit Laserscanner
Ramona Baran	AHM	Projektdurchführung, Datenprozessierung & -prüfung, Projektdokumentation
Cosmin Barna	AHM	Datenprozessierung
Werner Bengler	AHM	Software
Jenes Csaba	AHM	Datenprozessierung
Wolfgang Dobler	AHM	Datenprozessierung
Loredana Goncilea	AHM	Datenprozessierung
Winfried Kohrs	AHM	Pilot
Michael Kuchenbaur	Steinbacher Consult	Terrestrische Vermessung Passpunkte
Wolfgang Leimer	AHM	Datenprüfung
Manfred Niederwieser	AHM	Datenprozessierung
Torsten Pöhler	AHM	Datenprüfung
Marcel Ritter	AHM	Software
Thomas Schüller	Steinbacher Consult	Terrestrische Vermessung Passpunkte
Gabriel Toth	AHM	Datenprozessierung
Anca Voicu	AHM	Datenprozessierung
<b>Qualitätssicherung</b>		
Paul Wintersteller	Universität Bremen/ MARUM	Organisation und Koordination Leitung der Qualitätskontrolle, Verschneiden der Datensätze, Herstellen Produkte
Gerhard Daut	Universität Jena	Bereitstellung Sedimentecholot
Stefanie Gaide	Universität Bremen	Qualitätskontrolle & Datenprozessierung
<b>Öffentlichkeitsarbeit</b>		
Stefan Gessler	LGM	Leitung Öffentlichkeitsarbeit
Sascha Beutler	LGM	Erscheinungsbild
Lisa-Marie Liebermann	LGM	Organisation
Yuhki Oka	LGM	Kamera
Petra Reinmöller	PR2	Pressearbeit
Annika Strube	LGM	Layout
<b>Schiffsführer</b>		
Kurt Sarembe	ISF	Schiffsführer
Andreas Schießl	ISF	Schiffsführer

Name	Institution	Aufgabe
<b>Vorbereitungsgruppe</b>		
Bernd Engstle	WWA Kempten	Vorbereitungsgruppe
Carmen Kleinmann	WWA Kempten	Vorbereitungsgruppe
Martin Mainberger	Landesdenkmalamt Hemmenhofen	Vorbereitungsgruppe
Roland Schick	Bodenseewasserver- sorgung	Vorbereitungsgruppe
Martin Weiß	IRR	Vorbereitungsgruppe
Thomas Wolf	ISF	Vorbereitungsgruppe
Johny Wüest	EAWAG	Vorbereitungsgruppe



## 11 Liste der vorhandenen „Blauen“ IGKB-Berichte

Nr.	Titel	Jahr
1	Zustand und neuere Entwicklung des Bodensees	1963
2	Die Abwasserbelastung der Uferzone des Bodensees	1964
3	Die Sauerstoffschichtung im tiefen Hypolimnion des Bodensee-Obersees 1963/64 mit Berücksichtigung einiger Untersuchungs-ergebnisse aus früheren Jahren	1964
4	Gewässerschutzvorschriften der Bodensee-Anliegerstaaten	1966
5	Die Temperatur- und Sauerstoffverhältnisse des Bodensees in den Jahren 1961 - 1963	1967
6	Untersuchungen zur Feststellung der Ursache für die Verschmutzung des Bodensees	1967
7	Stellungnahme der Sachverständigen zur Frage einer Bodensee-Ringleitung	1967
8	Die Sauerstoffbilanz des Bodensee-Obersees	1967
9	Bodensee-Sedimente	1971
10	Bericht über den Bodensee	1971
11	Die Berechnung von Frachten gelöster Phosphor- und Stickstoffverbindungen aus Konzentrationsmessungen in Bodenseezuflüssen	1973
12	Die Makrophytenvegetation in der Uferzone des Bodensees	1973
13	Bau- und Investitionsprogramm – Stand der Abwasserbeseitigung	1973
14	Regenentlastungsanlagen, Bemessung und Gestaltung	1973
15	Strömungsverhältnisse im Bodensee-Untersee und der Wasseraustausch zwischen den einzelnen Seebecken	1974
16	Zustand und neuere Entwicklung des Bodensees	1975
17	Die Belastung des Bodensees mit Phosphor-, Stickstoff- und organischen Verbindungen im Seejahr 1971/72	1976
18	Die Phytoplanktonentwicklung im Bodensee in den Jahren 1961 - 1963	1976
19	Stand der technischen Möglichkeiten der Phosphorelimination aus kommunalen Abwässern	1977
20	Die Entwicklung des Crustaceenplanktons im Bodensee, Obersee (1962 - 1974) und Rheinsee (1963 - 1973)	1977
21	Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1963 - 1973), Teil 1 Untersee	1977
22	Chemismus des Freiwassers des Bodensee-Obersees in den Jahren 1961 - 1974	1979
23	Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1965 - 1975), Teil 2 Obersee	1979
24	Bau- und Investitionsprogramm, Stand der Abwasserbeseitigung im Einzugsgebiet des Bodensee-Obersees und des Untersees Planungszeitraum 1978 - 1985	1981
25	Zum biologischen Zustand des Seebodens des Bodensees in den Jahren 1972 - 1978	1981
26	Die submersen Makrophyten des Bodensees – 1978 im Vergleich mit 1967	1981
27	Die Veränderungen der submersen Vegetation des Bodensees in ausgewählten Testflächen in den Jahren 1967 - 1978	1981
28	Die Belastung des Bodensees mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen und organischem Kohlenstoff im Abflussjahr 1978/79	1982
29	Limnologische Auswirkungen der Schifffahrt auf den Bodensee	1982
30	Die Auswirkungen der Reinhaltemaßnahmen auf die limnologische Entwicklung des Bodensees (Lagebericht)	1982
31	Schadstoffe in Bodensee-Sedimenten	1984
32	Quantitative Mikroanalyse flüchtiger, organischer Verbindungen im Bodenseewasser	1985

33	Bau- und Investitionsprogramm, Stand der Abwasserbeseitigung im Einzugsgebiet des Bodensee-Obersees und des Untersees, Planungszeitraum 1986-1995	1985
34	Die Zukunft der Reinhaltung des Bodensees, weitergehende und vorbeugende Maßnahmen – Denkschrift	1987
35	Zur Bedeutung der Flachwasserzone des Bodensees	1987
36	Die Entwicklung der Radioaktivität im Bodensee nach dem Unfall Tschernobyl	1987
37	Die Entwicklung des Crustaceen-Planktons im Bodensee-Obersee (1972-1985) und Untersee – Gnadensee und Rheinsee – (1974-1985)	1987
38	Die Oligochaeten im Bodensee als Indikatoren für die Belastung des Seebodens (1972-1978)	1988
39	Die langjährige Entwicklung des Phytoplanktons im Bodensee (1961-1986)	1989
40	Die Belastung des Bodensees mit Phosphor- und Stickstoffverbindungen, organisch gebundenem Kohlenstoff und Borat im Abflussjahr 1985/86	1989
41	Die Entwicklung der NTA- und EDTA-Konzentration im Bodensee und in einigen Bodensee-Zuflüssen von 1985-1990	1991
42	Seenphysikalische und limnologische Dokumentation zur Vorstreckung des Alpenrheins in den Bodensee – eine Literaturstudie	1993
43	Sedimentoberflächen im östlichen Bodensee-Obersee, Sidescan-Untersuchungen im Zusammenhang mit den Auswirkungen der Vorstreckung des Alpenrheins	1992
44	Dynamische Simulation des Bodensee-Obersees und tolerierbare Phosphor-Fracht	1993
45	Methoden zur Abschätzung der Phosphor- und Stickstoffeinträge aus diffusen Quellen in den Bodensee	1996
46	Submerse Makrophyten der Litoralzone des Bodensees 1993 im Vergleich mit 1978 und 1967	1998
47	Zustand des Seebodens 1992-1994 Sedimentsinventare - Phosphor – Oligochaeten	1998
48	Langjährige Entwicklung chemischer Parameter im Bodensee-Obersee	1998
49	Abschätzung des einwohnerbezogenen Nährstoffaustrags aus Regenentlastungen im Einzugsgebiet des Bodensees	1998
50	Mathematisches Modell des Alpenrhein – Einstroms in den Bodensee	1998
51	Phosphor und Stickstoff aus diffusen Quellen im Einzugsgebiet des Bodensees 1996/97	1999
52	Transport wassergefährdender Stoffe im Ufer- und Zuflussbereich des Bodensees	2000
53	Dem Bodensee in den Abflussjahren 1996 und 1997 zugeführte Stofffrachten	2000
54	Tolerierbare Phosphor-Fracht des Bodensee-Obersees. 2. Auflage	2002
55	Limnologische Bewertung der Ufer- und Flachwasserzone des Bodensees	2009
56	Bodensee-Untersuchung-Seeboden	2009
57	Zur Limnologischen Entwicklung des Bodensee-Untersees von 1969-2005	2007
58	Submerse Makrophyten des Bodensees – Kartierung in den Jahren 2006-2010	2014
59	Phytoplanktonentwicklung im Bodensee von 1965-2007: Einfluss von trophischen und klimatischen Veränderungen	2014
60	KlimBo – Klimawandel am Bodensee	2015
61	Tiefenschärfe - Hochauflösende Vermessung Bodensee	2016



EUROPÄISCHE UNION

Europäischer Fonds  
für Regionale Entwicklung



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra