

Erprobung der Laserbathymetrie an Bundeswasserstraßen im Binnenbereich

ROBERT WEISS¹

Zusammenfassung: Eine Aufgabe der Bundesanstalt für Gewässerkunde besteht in der Erprobung und Evaluierung neuer Verfahren und Systeme zur Erfassung der Topografie von Land- und Gewässerbettflächen. In Kooperation mit dem Wasser- und Schifffahrtsamt Dresden wurden 2014 die bathymetrischen ALS-Systeme AHAB CHIROPTERA₁ und RIEGL VG820G mit dem Ziel getestet, belastbare Aussagen zu den Möglichkeiten und Grenzen bathymetrischer ALS-Systeme im Bereich der Bundeswasserstraßen zu erhalten. Im Rahmen des Projektes wurden neben Befliegungen auch die Einflussparameter auf die Laserbathymetrie erfasst.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die untersuchten ALS-Systeme prinzipiell funktionieren, die Erwartungen aber nicht erfüllt wurden. Aufgrund der relativ geringen Pulsrate des AHAB CHIROPTERA₁ konnte die geforderte Punktdichte von ≥ 4 Pkt/m² nicht erreicht werden. Bedingt durch die Eigenschaften der Elbe, insbesondere die Trübung und die Reflektivität des Gewässerbodens konnten die Laserimpulse das Wasser der Elbe nur bis zu einer gewissen Grenze durchdringen. Im Bereich der Elbe wurden so nur Eindringtiefen von $< 0,4$ m erreicht, was keine Erfassung des Gewässerbodens ermöglichte. Im Bereich der Altarme wurden größere Eindringtiefen erreicht, deren Beträge mit wenigen Ausnahmen im nicht überschritten haben. In einem besonders klaren Altarm wurden mit dem AHAB CHIROPTERA₁ eine Eindringtiefe von ~ 2 m erreicht, was in etwa dem 1,3-fachen der zeitgleich festgestellten Secchitiefe entsprach. Prinzipiell wurden mit dem RIEGL V820G vergleichbare Ergebnisse erzielt, nur konnte die zuletzt genannte große Eindringtiefe an dieser Stelle nicht reproduziert werden. Ursache hierfür war die zu diesem Zeitpunkt wesentlich geringere Sichttiefe. Ein vollständiges Gewässerbett wurde mit keinem System erfasst.

Neben den Gewässerbettpunkten bieten die ALS-Systeme auch die Möglichkeit, Punkte auf der Wasseroberfläche zu erfassen. Vergleiche mit Pegeln haben gezeigt, diese im Fall des AHAB CHIROPTERA₁ sehr gut mit den ALS-Daten übereinstimmen, wohingegen die Wasseroberflächenpunkte des RIEGL VQ820G um etwa 0,08cm gegenüber der realen Wasseroberfläche versetzt waren. Die Standardabweichung der Differenzen betrug in beiden Fällen 0,03m. Die Genauigkeit beider Scanner im Landbereich konnte anhand von Referenzflächen geprüft werden, wobei sich mittlere Abweichungen von weniger als 0,04m bei gleichzeitigen Standardabweichungen von 0,03-0,05m ergeben haben. Es hat sich weiterhin gezeigt, dass die Laserbathymetrie nur dann funktioniert, wenn der Gewässerboden frei von Vegetation ist. Sofern diese vorhanden ist, wird deren Oberfläche und nicht der Gewässerboden erfasst.

1 Einleitung

Die Bundesanstalt für Gewässerkunde ist ein im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Verkehr und Digitale Infrastruktur angesiedeltes wissenschaftliches Institut. Ein wesentlicher Auftrag besteht insbesondere in der Beratung der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes. Im Rahmen dieses Auftrages erprobt und evaluiert die BfG neue Verfahren und Systeme

¹ Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz; E-Mail: weiss@bafg.de

zur Erfassung der Topografie von Land- und Gewässerbettflächen. In Zusammenarbeit mit dem Wasser- und Schifffahrtsamt Dresden erfolgten 2014 Erprobungen der bathymetrischen ALS-Systeme RIEGL VQ820G und AHAB CHIROPTERA_I mit dem Ziel, belastbare Aussagen zu den Möglichkeiten und Grenzen der ALS-Systeme zu erhalten. Ziel war die Erfassung von Flachwasserbereichen, die mit herkömmlichen flächenhaften Echolotsystemen nicht vermessen werden können. Neben der eigentlichen Befliegung wurde ein umfangreiches Begleitprogramm initiiert. Ziel des Begleitprogramms war die Erfassung möglichst aller Einflussparameter sowie die Schaffung von Referenzflächen.

2 Untersuchungsgebiet und Messprogramm

Als Untersuchungsgebiet wurde die Bundeswasserstraße Elbe zwischen Torgau und der Lutherstadt Wittenberg bzw. den Elbe Kilometern 183 und 203 ausgewählt. Hinzu kamen einige Altarme bzw. stehende Gewässer in der Nähe der Elbe. Die Lage des Untersuchungsgebiets ist in Abb. 1 dargestellt.

Das für die Untersuchung aufgelegte Messprogramm beinhaltete neben den eigentlichen Befliegungen auch ein Begleitprogramm, in dessen Rahmen seit August 2013 wöchentlichen Sichttiefenbestimmungen (Secchitiefe) an unterschiedlichen Standorten im Bereich des Hauptstroms und der Nebengewässer durchgeführt werden (Abb. 2, links). Weiterhin erfolgte die Einbringung und Einmessung von jeweils 1,5m x 1,5m großen Referenzflächenpaaren, wobei je Standort eine Fläche oberhalb und eine Fläche unterhalb der Wasseroberfläche aufgestellt wurden (Abb. 2, rechts). Für die Erstellung eines DGM-W und die Nutzung als Referenzfläche erfolgte unmittelbar vor der ersten Befliegung eine flächenhafte Neuvermessung des Gewässerbodens der Elbe mithilfe eines modernen Flächenpeilsystems. Bedingt durch das Messsystem konnte der Gewässerboden nur in Bereichen erfasst werden, die eine bestimmte Wassertiefe aufweisen und wo ein sicheres Manövrieren mit dem Schiff gewährleistet ist. Folglich konnten Flachwasserbereiche und insbesondere die Buhentaschen nicht vermessen werden. Neben der Elbe wurden 2013/2014 bestimmte Altarme mithilfe eines ferngesteuerten Messsystems flächendeckend neu vermessen. Anfang März 2014 erfolgte die Geländeaufnahme mithilfe des AHAB CHIROPTERA_I, wobei das gesamte Untersuchungsgebiet zweifach aus einer Höhe von etwa 300m gescannt wurde. Dem AHAB CHIROPTERA_I folgte Mitte März bzw. Anfang April eine mehrfache Befliegung mit dem RIEGL VQ802G aus einer Flughöhe von rund 400m. Zum Zeitpunkt der Befliegung mit dem AHAB CHIROPTERA_I führte die Elbe relativ wenig Wasser bzw. der am Pegel Elster erfasste Wasserstand lag nur 0,57m über dem mittleren Niedrigwasserstand (MNW). Zeitnah zu den Befliegungen erfolgten Sichttiefenbestimmungen. Am Hauptgewässer Elbe wurde eine Secchitiefe etwa 0,7m festgestellt, während die Sichttiefen in den Altarmen zwischen 1,6m und 0,8m variierten. Während der vier Wochen später durchgeführten bathymetrischen Befliegung mit dem RIEGL VQ820G lag der Wasserstand der Elbe mit 0,48m über MNW noch etwas niedriger, wobei zu diesem Zeitpunkt stärkere Gewässertrübung und damit eine geringere Secchitiefe zu verzeichnen waren. Die zeitnah festgestellten Sichttiefen lagen bei etwa 0,6m an der Elbe und zwischen 0,7m und 1,1m in den Altarmen. Die eingebrachten Referenzflächen unter Wasser waren Zeitpunkt der Befliegung in einer Wassertiefe von 0,3 – 0,8m installiert.

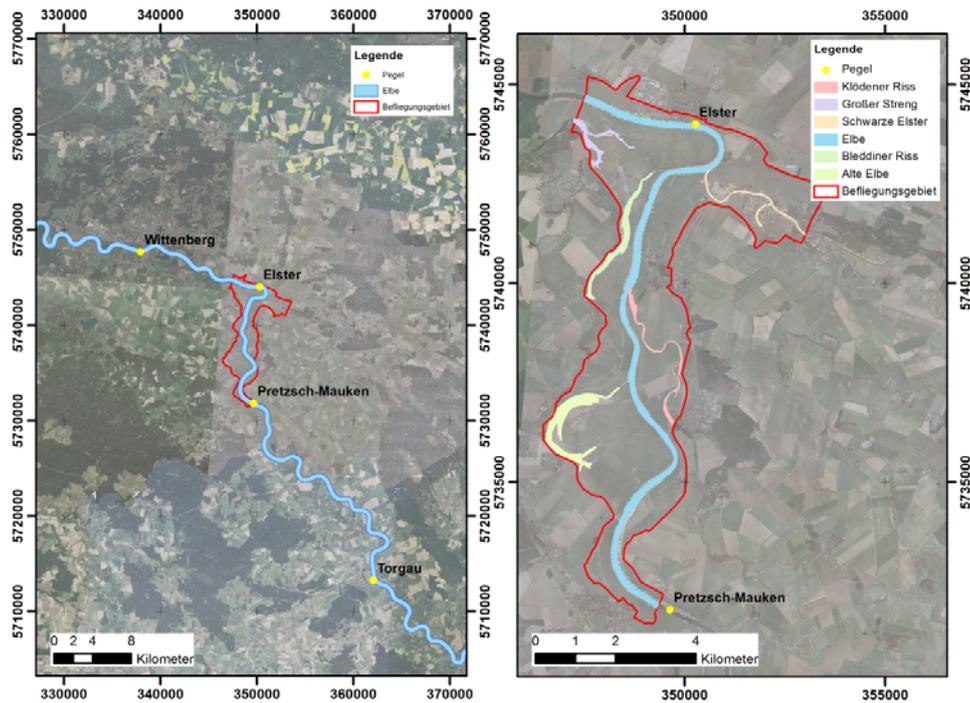


Abb. 1: Untersuchungsgebiet



Abb. 2: Sichttiefenmessungen (links) und Referenzfläche unter Wasser (rechts)

3 Ergebnisse

Die Bewertung beider Systeme erfolgte auf Basis der mit einem einfachen Überflug erreichbaren Punktdichte, der Genauigkeit gegenüber Referenzflächen und der Eindringtiefe. Als Referenzflächen kamen großflächige Sportplätze, Referenzplatten und Wasseroberflächen in unmittelbarer Pegelnähe zum Einsatz. Alle Differenzen so definiert, dass von der Referenzhöhe die durch ALS-bestimmte Punkthöhe abgezogen wird (Soll-Ist). Negative Differenzen bedeuten somit, dass die ALS-Punktewolke über der Referenzhöhe liegt.

3.1 Full-Waveform Aufzeichnung

Für eine größtmögliche Flexibilität in Bezug auf die Auswertung der erfassten Daten wurde im Rahmen der Ausschreibung die Erfassung von Full-Waveform Daten vorgeschrieben. Während der Befliegung mit dem AHAB CHIROPTERA_I wurden die Full-Waveform Daten aller Beobachtungen des bathymetrischen Kanals aufgezeichnet. Bedingt durch die wesentlich größere Pulsrate des RIEGL VQ820G konnten nur die Full-Waveform Daten jeder zehnten Einzelmessung aufgezeichnet werden. Exemplarisch sind in Abb. 3 die Full-Waveform Beobachtungen eines Laserschusses über Land (blau) und Wasser (grün) dargestellt. Aus der Abbildung geht hervor, dass das grün dargestellte Signal einer Beobachtung über/im Wasser gegenüber einer Landbeobachtung wesentlich schwächer ausfällt.

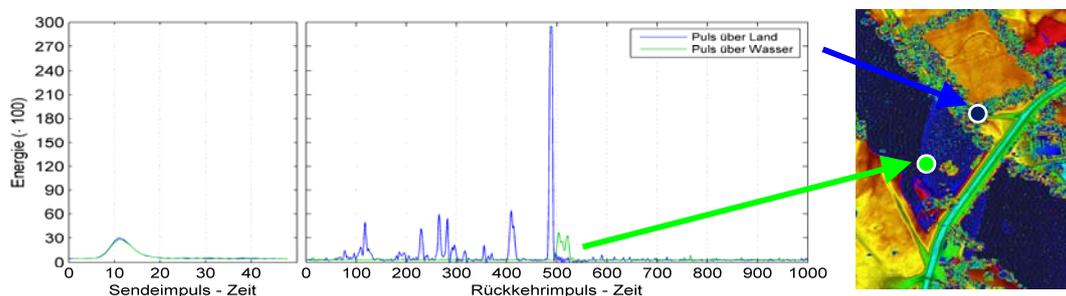


Abb. 3: Full-Waveform Aufzeichnung einer Beobachtung über Land (blau) und Wasser (grün)

Die in Abb. 3 grün dargestellte Waveform ist einem Wasserpunkt mit einer Wassertiefe von 1,2m zugeordnet. In der Abbildung sind die Echos für die Wasseroberfläche und das Gewässerbett zu erkennen. In sehr flachem Wasser ist eine Trennung der beiden Echos und damit die Unterscheidung zwischen Wasseroberfläche und Gewässerbett nicht mehr möglich. Aus den Auswertungen geht hervor, dass die Grenzwassertiefe etwa bei 0,2 – 0,3m liegt.

3.2 Punktdichte

Bedingt durch die relativ geringe Abtastrate des bathymetrischen Kanals des AHAB CHIROPTERA_I sind mit diesem System nur relativ geringe Punktdichten zu erwarten. Darüber hinaus ist die Punktdichte aufgrund der Bauart des Scanners (ellipsoidisches Bodenmuster) ungleichmäßig verteilt. Im Randbereich des Scanners werden sehr viele Beobachtungen erfasst, wohingegen im Zentralbereich weitaus weniger Beobachtungen vorliegen. Die real erreichte Punktdichte lag erheblich unterhalb der theoretisch erreichbaren Punktdichte bei 35kHz. Als Ursache wurde von AHAB ein Problem in der Scannersteuerung ermittelt, welches mittlerweile behoben ist. Bei einer Geschwindigkeit von ~230km/h und einer Flughöhe von etwa 300m über Grund ergab sich bei einer einfachen/doppelten Befliegung eine mittlere Punktdichte von ~0,6Pkt/m² bzw. 1,2Pkt/m². Im Rahmen der Auswertung erfolgte eine Aufteilung des Untersuchungsgebiets in 1m² große Zellen und eine Analyse der Verteilung der Beobachtungen. In rund 64% aller Zellen ist bei einer einfachen Befliegung keine Beobachtung vorhanden und weitere 22% weisen nur eine Beobachtung je Zelle auf. Erfolgt eine Reduktion aller Beobachtungen auf jeweils nur eine Beobachtung je Laserschuss (Last-Pulse-Auswertung), sinkt die mittlere Punktdichte auf ~0,4Pkt/m² bzw. 0,9Pkt/m².

Der RIEGL VQ820G ist konstruktiv für eine Pulsrate von bis zu 512kHz ausgelegt, wobei im Rahmen der Befliegung nur eine Pulsrate von 256kHz genutzt wurde. Bedingt durch die hohe Pulsrate sind am Boden wesentlich größere Punktdichten möglich. Bei einer einfachen Befliegung ergaben sich im Bereich der Altarme unter Nutzung aller Beobachtungen mittlere Punktdichten – je nach Gewässer – von 12-24Pkt/m². In Summe lagen für 83% - 94% der Altarmflächen je m² 10 und mehr Last-Pulse Beobachtungen vor.

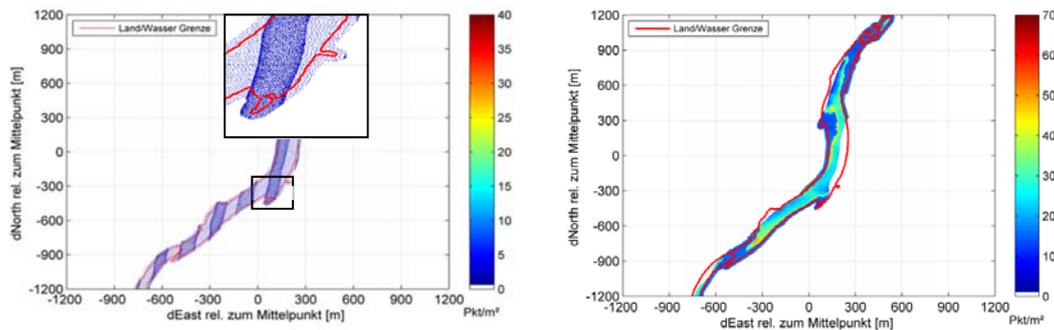


Abb. 4: Erreichte Punktdichte bei einer einfachen Befliegung (links: CHIROPTERA_I; rechts: VQ820G)

3.3 Genauigkeit

Für die Beurteilung der Genauigkeit beider Scannersysteme erfolgten Vergleiche mit größeren Referenzflächen. Als Referenzflächen dienten drei Sportplätze, deren Stützpunkte im Referenzsystem der Befliegung aufgenommen und deren Oberflächen über bivariate Polynome modelliert wurden. Jeder ALS-Beobachtung wurde eine interpolierte Höhe der modellierten Oberfläche gegenüber gestellt. Im Fall des AHAB CHIROPTERA_I ergaben sich an allen drei Sportplätzen ähnliche Ergebnisse. Die direkt georeferenzierten Beobachtungen des topografischen und bathymetrischen Kanals lagen 0,105m – 0,128m über der Referenzfläche, wobei die Standardabweichung der Differenzen fünf bis sechs Zentimeter betrug. Von den Abweichungen lassen sich 0,097m durch eine fehlerhafte Berücksichtigung des GNSS-Antennenmodells der Referenzantenne erklären. Im Rahmen der bathymetrischen Befliegung am 01.04.2014 wurde nur eine Referenzfläche mehrfach überflogen. Je nach Überflug lagen die mittleren Abweichungen zwischen -0,022 und -0,042m (Standardabweichung 0,015m-0,018m), wobei sich im Mittel eine mittlere Abweichung von -0,03m ergeben hat (vgl. Abb. 5). Wird der systematische Höhenfehler der CHIROPTERA_I Befliegung berücksichtigt, ergeben sich bei beiden ALS-Systemen sehr ähnliche Differenzen zur Referenzfläche.

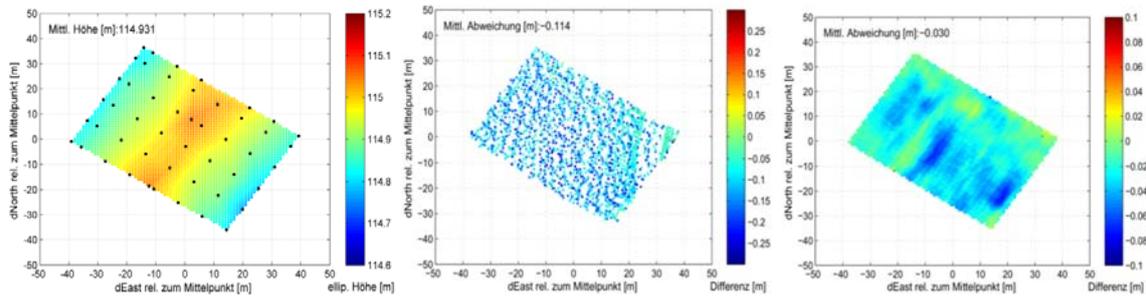


Abb. 5: Referenzfläche (o.r.) und Differenzen der CHIROPTERA_I (Mitte) und VQ820G (rechts) Beobachtungen

Die ausgebrachten Referenzflächenpaare wurden von beiden Systemen mehrfach überflogen, wobei im Fall der Flächen an Land Differenzen festgestellt wurden, die etwa den zuvor beschriebenen Ergebnissen entsprechen. Die Referenzflächen unter Wasser wurden nur in einem Fall von drei ALS-Beobachtungen des AHAB CHIROPTERA_I mit einer mittleren Abweichung von -0,126m (Standardabweichung 0,01m) erfasst. Analog erfasste der RIEGL VQ820G zehn Beobachtungen auf einer Referenzfläche. Die resultierende mittlere Abweichung liegt bei 0,02m (Standardabweichung 0,09m).

Neben bathymetrischen Informationen liefern beide ALS-Systeme auch Punkte auf der Wasseroberfläche. Vergleiche georeferenzierter Pegelbeobachtungen mit ALS-Beobachtungen in unmittelbarer Pegelnähe zeigen auf, dass mithilfe bathymetrischer ALS-Systeme die Höhe der Wasseroberfläche sehr gut erfasst werden konnte. Im Umkreis von 50m rund um den Pegel wurden im Fall des AHAB CHIROPTERA_I mittlere Differenzen von -0,06 bis -0,09m bei einer Standardabweichung von 0,02m festgestellt. Bedingt durch den systematischen Höhenfehler sollten Differenzen von -0,097m auftreten. Ergebnisse des RIEGL VQ820G weisen eine mittlere Differenz von 0,08m (Standardabweichung 0,028m) auf.

3.4 Eindringtiefe

Mit beiden Systemen konnten nur geringe Eindringtiefen erreicht werden, die je nach Gewässer sehr stark variierten. Im Bereich der Elbe wurden maximale Eindringtiefen von 0,4m erreicht. Die Altarme sind von großen Variationen gekennzeichnet, wobei die Eindringtiefe von einigen wenigen Reflektionen im Bereich der Wasseroberfläche bis hin zu einer nahezu flächendeckenden Erfassung des Gewässerbetts reicht. Mit Ausnahme weniger Beobachtungen sind nahezu alle erfassten Eindringtiefen kleiner als 1m. Häufig wurden auch Punkte erfasst und als Gewässerbettspunkte klassifiziert, deren Höhen gegenüber einem realen Gewässerbett sehr große Variationen aufweisen. Eine mögliche Ursache hierfür ist die Unterwasservegetation, an deren Oberfläche das Laserlicht reflektiert wird. Exemplarisch sind die Eindringtiefen für die Elbe (jeweils links) und für den Altarm Klödener Riss in Abb. 6 (AHAB CHIROPTERA_I) und Abb. 7 (RIEGL VQ820G) dargestellt. Die maximale Eindringtiefe wurde mit dem AHAB CHIROPTERA_I im Bereich des Klödener Risses festgestellt. An dieser Stelle konnte bei einer Sichttiefe von 1,6m noch Gewässerbodenpunkte in ~2m Wassertiefe erfasst werden. Der RIEGL

VQ820G liefert prinzipiell vergleichbare Ergebnisse, wobei die zuletzt genannte große Eindringtiefe an dieser Stelle nicht erreicht wurde. Ursache hierfür ist die stärkere Wassertrübung bzw. die zum Zeitpunkt der Befliegung festgestellte schlechtere Sichttiefe. Das Gewässerbett der Elbe wurde von keinem System erfasst.

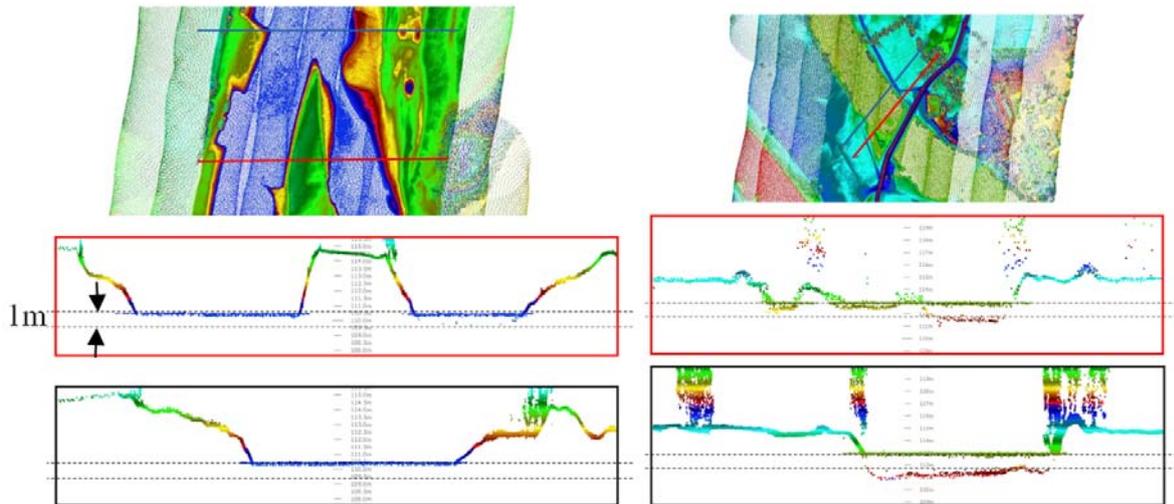


Abb. 6: Eindringtiefen des AHAB CHIROPTERA_i im Bereich der Elbe (links) und des Altarms Klödener Riss (rechts)

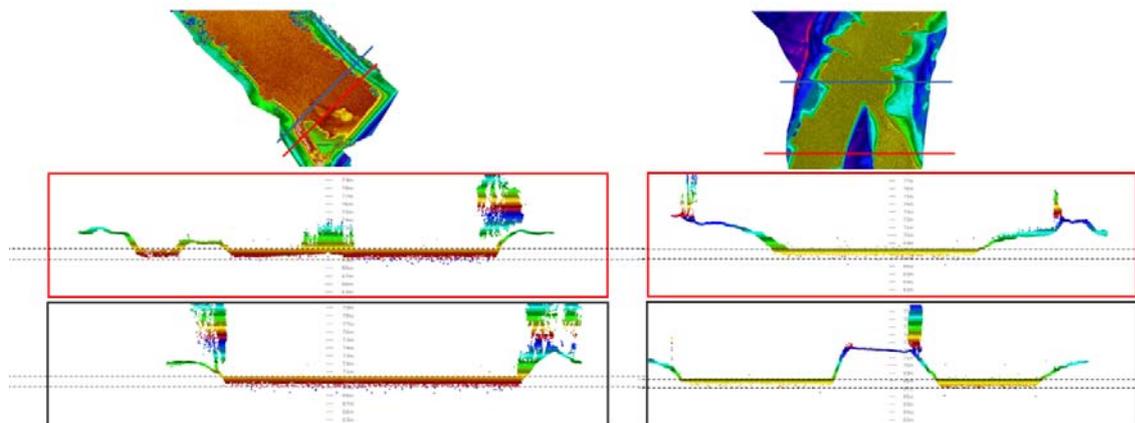


Abb. 7: Eindringtiefen des RIEGL VQ820G im Bereich des Klödener Risses und der Elbe (rechts)

4 Fazit und Ausblick

Die Erwartungen in Bezug auf die Möglichkeit der Laserbathymetrie wurden nicht erfüllt, wobei die Hauptursachen hierfür in den physikalischen Eigenschaften der Gewässer zu suchen sind. Ziel war die vollständige Erfassung von Flachwasserbereichen (Tiefenkorridor zwischen 0,3m – ~2,0m Wassertiefe).

In Bezug auf die Punktdichte konnte der RIEGL VQ820G die Zielvorgaben problemlos erreichen, wohingegen der AHAB CHIROPTERA_I nicht die gewünschte Punktdichte erreichte. In Bezug auf die Genauigkeit bleibt für beide Scanner festzustellen, dass relativ zu den Referenzflächen nur geringe systematische Abweichungen vorhanden sind und eine Genauigkeit von deutlich unter einem Dezimeter erreicht werden konnte.

Bedingt durch die Trübung der Elbe und auch der Nebengewässer konnten die Laserimpulse die Wassersäule nur in geringem Umfang durchdringen und Gewässerbettpunkte erfassen. Im Allgemeinen wurden nur Eindringtiefen weit unterhalb eines Meters erreicht. Nur in relativ klaren Gewässern ergaben sich größere Eindringtiefen. Maximal wurden etwa 2m bei einer festgestellten Sichttiefe von 1,6m erreicht. Ausgehend von den zeitgleich bestimmten Sichttiefen bleibt festzustellen, dass die ALS-Systeme die Spezifikationen in Bezug auf die Eindringtiefe (1,3-fache beim AHAB CHIROPTERA_I und 1-fache bei RIEGL VQ820G) in den Altarmen erfüllt haben. Aktuell wird von AHAB an einer Modifikation des Auswertalgorithmus gearbeitet, die insbesondere in trüben Gewässern höhere Eindringtiefen ermöglichen soll. Erste Ergebnisse deuten auf eine Verbesserung hin. Inwieweit sich damit auch die Ergebnisse im Bereich der Elbe verbessern lassen, bleibt abzuwarten. Bedingt durch die relativ starke Trübung der Elbe ist zu befürchten, dass die gesamte Energie der Laserimpulse auf dem Weg zum Gewässerboden absorbiert bzw. diffus reflektiert wird. Folglich sind im Rückkehrsignal keine Reflektionen vom Gewässerboden enthalten, wodurch dieser nicht erfasst werden kann.

5 Literaturverzeichnis

- GUENTHER, G., 1985: Airborne Laser Hydrography - System Design and Performance Factors, NOAA Professional Paper Series National Ocean Service 1.
- VOSELTMANN, G. & MAAS, H.-G., 2010: Airborne and Terrestrial Laser Scanning, Whittles Publishing Dunbeath, Caithness KW6 6EY, Scotland, UK.