

GPS- und Tachymetermessungen zur Herstellung eines Tiefen-DGM

Jan Schmidt, Michael Möser

Technische Universität Dresden, Geodätisches Institut

ZUSAMMENFASSUNG :

Gewässervermessung bzw. hydrographische Vermessung ist ein Spezialgebiet der Geodäsie, welches sich mit der Erfassung der Topographie des unter Wasser gelegenen Geländes beschäftigt. Die Koordinatenbestimmung wird dabei durch Kombination von Positionierung und Tiefenmessung realisiert. Der Beitrag befasst sich mit den Möglichkeiten der Positionsbestimmung eines sich bewegenden Wasserfahrzeuges auf der Oberfläche des Gewässers durch Tachymetrie bzw. GPS und der Bestimmung der Gewässertiefe mittels Echolotung. Dabei sollen vor allem genauigkeitsbeeinflussende Faktoren aufgezeigt und Vorschläge für eine Minimierung ihrer Einflüsse dargelegt werden. Ein Ergebnis einer hydrographischen Vermessung kann das digitale Geländemodell des Gewässergrundes darstellen. Wenn dieses für mehrere Epochen zur Verfügung steht, sind Aussagen über eventuelle Geländeänderungen möglich. Die Vorgehensweise von der Planung der Messungen bis zur Erstellung des DGM wird an einem praktischen Beispiel, der Gewässervermessung eines Stausees, erläutert.

ABSTRACT:

Hydrographic survey is a special field of geodesy. It's concerned with acquisition of topography which is located below the surface of the water. The computation of coordinates is realized by combination of positioning and measurement of the water depth. The article is concerned with the possibilities of positioning a moving watercraft on the water surface by tacheometry or GPS and determination of the water depth by use of echo sounding. Factors which affect the accuracy negatively are shown and suggestions for a minimization of their influences will be presented. One result of a hydrographic survey can be the digital terrain model of the water subsurface. Is this for several epochs available, statements about changes of the subsurface are possible. By a practical example, the survey of a reservoir, the proceeding from planning the measurements up to the creation of the DTM will be shown.

1 Einführung

Die Vermessung von Gewässern beinhaltet die Erfassung der Topographie des Gewässergrundes und dessen Veränderung im Laufe der Zeit. Die Darstellung der Topographie erfolgt dabei über Koordinatentripel, welche die Lage und Höhe der im Gewässer befindlichen Geländepunkte darstellen. Die sich hieraus ergebenden Aufgaben und Einsatzgebiete der Gewässervermessung können daher sehr vielfältig sein. So müssen zum Beispiel alle schiffbaren Gewässer wie Küstengebiete, Flüsse, Kanäle oder Häfen eine geforderte Mindesttiefe der Fahrrinne aufweisen, damit eine „reibunglose“ Schifffahrt jederzeit garantiert werden kann. Aber auch für kleinere Fließgewässer sowie künstliche Seen, welche durch Stauanlagen oder Bergbaumaßnahmen entstanden sind, werden zunehmend zuverlässige Messdaten des Gewässerbodens benötigt. Sei es als Planungsgrundlage für bauliche Anlagen, zur Untersuchung der Standfestigkeit und Neigung von Böschungen oder für die Ermittlung von Sedimentablagerungen in Stauseen bzw. Speicherbecken.

Die hierfür erforderlichen Daten des jeweiligen Gewässergrundes werden im Allgemeinen durch die kombinierte Auswertung der Messwerte mehrerer unterschiedlicher System erhalten, deren Ergebnis dreidimensionale Koordinaten der Geländepunkte darstellen. Die Positionierung des zumeist auf dem Wasser bewegten Fahrzeuges erfolgt mittels eines geeigneten Ortungssystems in einem definierten geodätischen Bezugssystem. Die Bestimmung der Gewässertiefe wird mit Hilfe von Lotungsverfahren durchgeführt. Da die Daten durch zwei unterschiedliche Messsysteme aufgenommen werden, ist eine zeitliche und räumliche Synchronisation dieser unabdingbar, um den bei der Ortung gewonnenen Positionen entsprechende Tiefenwerte zuordnen zu können.

Im Folgenden werden mögliche Positionierungs- und Lotungsverfahren in ihrer Funktionsweise und mit den erreichbaren Genauigkeiten vorgestellt. Außerdem sollen anhand eines praktischen Beispiels die Möglichkeiten und Grenzen bei der Erstellung eines digitalen Geländemodells eines Stausees aufgezeigt werden.

2 Positionierungssysteme

In der Verordnung über markscheiderische Arbeiten und Beobachtungen der Oberfläche ist die Führung eines detaillierten Risswerkes gefordert. Dazu gehört auch die Darstellung der Unterwassersituation bei Restlöchern der Braunkohlentagebaue. In gefährlichen Bereichen (z.B. gekippte Böschungen) kann die Unterwassersituation mit unbemannten ferngesteuerten Booten beobachtet werden. Im Folgenden wird ein ferngesteuertes Messsystem der LMBV vorgestellt (Abb. 1), das von der eta AG zur Vermessung von Restlöchern eingesetzt wurde. [Metzler 2000]

Die Gewässervermessung ist die flächenhafte Erfassung der geomorphologischen Oberfläche des Gewässergrundes. Die Darstellung der Topografie erfolgt über dreidimensionale Koordinaten, die von einem schwimmenden Fahrzeug aus bei ständiger Fortbewegung im WGS 84-System bzw. lokal bestimmt werden. Es handelt sich dabei um kinematische Messungen, die von Strömung, Wind, Wellengang und von Änderungen der physikalischen und chemischen Eigenschaften des Wassers und von der Lufttemperatur und Luftfeuchte beeinflusst werden. Die Positionierung des Messfahrzeuges wird mit einem Tachymeter mit automatischer Zielverfolgung und mit GPS-RTK durchgeführt.

Das Messsystem ist mit einem Ultraschall-Echolot zur Tiefenbestimmung und einer darüber positionierten Vorrichtung für die Positionierung ausgestattet. Die Ortung und Positionsbestimmung kann mit GPS-RTK (hier Geotracer) oder einem zielverfolgenden Tachymeter (hier Geodimeter 600S Pro) erfolgen. Über dem Echolot wird je nach Ortungsverfahren ein Reflektor oder eine GPS-Antenne angebracht. Auf Grund des modularen Aufbaus können je nach Anwendung die Systeme

auch kombiniert werden, dann werden Reflektor und Antenne lotrecht montiert (Abb. 2). Zwei Funkantennen dienen der Kommunikation zwischen Referenzstation und Rover, der Datenübertragung zwischen dem Messsystem auf dem Wasser und dem PC an Land sowie zur Fernsteuerung des Systems. Durch genaue Positionierung des Messsystems können an vorgegebenen Punkten mit einer Messsonde Wasserproben entnommen werden.

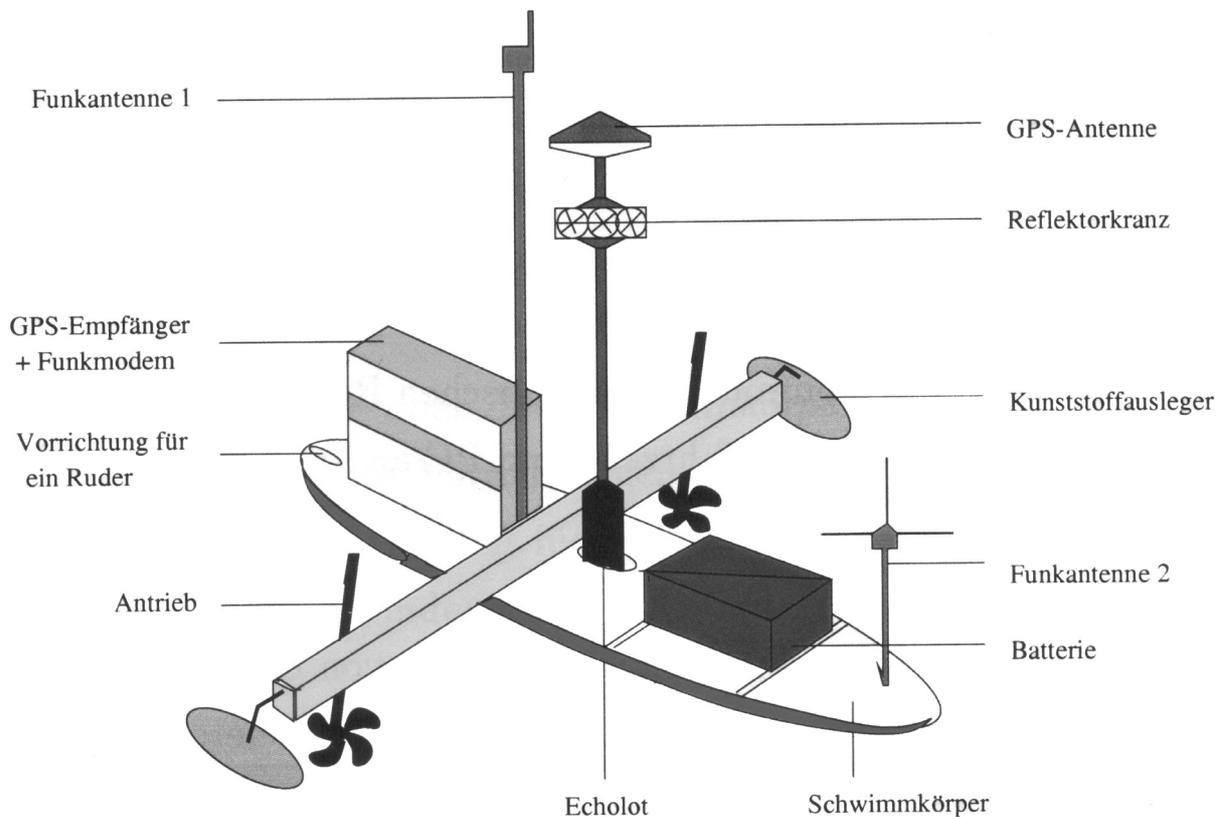


Abb.1 : Tiefenlotmesssystem der eta AG

Die Vermessung von Tagebaurestlöchern mit dem Tiefenlotmesssystem kann nach drei Verfahren durchgeführt werden:

- einmalige flächenhafte, rastermäßige Erfassung im Uferbereich 10 m,
- wiederholte profilhafte Aufmessung,
- wiederholte Positions- und Tiefenmessung an ausgewählten Bereichen des Gewässers.

Die dreidimensionalen Positionsdaten sind in der Auswertung den Tiefenwerten zuzuordnen. Da die Tiefenlotung auf 10 cm genau bestimmt werden kann, ist die Genauigkeit der z-Koordinate durch die Tachymeter- bzw. GPS-Messung unbedenklich. Die Bestimmung der Lagekoordinaten ist bei der kinematischen Messung im Wesentlichen von der Geschwindigkeit des Bootes (2m/s) und der Entfernung abhängig. Positionsfehler ergeben sich aus der Zeitverzögerung zwischen Winkel- und Streckenmessung und der Fahrgeschwindigkeit. Deshalb sind die Messdaten mit einer Zeitmarke in den Positionsdateien abzulegen. Nach [Stempfhuber u.a. 2000] ist für die Zeitverzögerung ein entsprechendes Korrekturmodell anzuwenden.

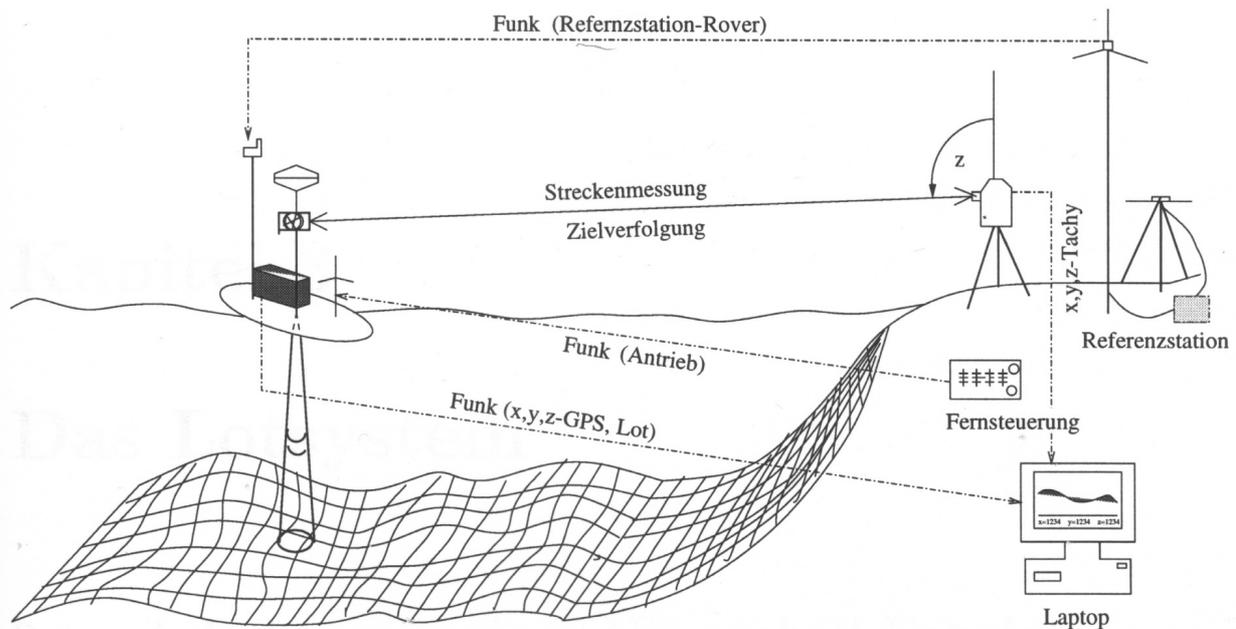


Abb.2 : Prinzip des Tiefenlotmesssystems

3 Lotungsverfahren

Die einfachste Art der Tiefenmessung, die manuelle Lotung, ist für eine wirtschaftliche Erfassung großer Flächen nicht geeignet. Sie soll hier allerdings nicht ganz außer Acht gelassen werden, da dieses Verfahrens in der unmittelbaren Nähe von Wasserbauwerken durchaus noch angewandt wird. Dort sind die im Allgemeinen verwendeten Echolotsysteme nur bedingt einsetzbar, da es aufgrund der spezifischen Signalausbreitung bei unter Wasser befindlichen Bauwerksteilen zu fehlerhaften Ergebnissen kommen kann.

Die in den meisten Fällen für Gewässervermessungen eingesetzten Vermessungsecholote bestehen aus einer Schwingereinrichtung, welche Messsignale aussendet bzw. empfängt und einem Bordgerät, in dem die Signale elektronisch verarbeitet werden. Je nachdem, ob eine punktuelle, linien- oder flächenhafte Erfassung des Geländes gefordert ist, kommen Einzel- bzw. Mehrfachschwingersysteme oder Fächerecholote zum Einsatz. [Behrens 1999]

Echolote basieren auf dem Prinzip der Laufzeitmessung akustischer Wellen. Hierzu sendet ein Schwinger einen Impuls im Ultraschallbereich (20 kHz bis 1 GHz) aus, welcher sich im Medium Wasser in Richtung Gewässerboden radial als Longitudinalwellen fortpflanzt. An der Grenzschicht zu einem Medium mit einer höheren Dichte (zumeist dem Gewässerboden) werden die Schallwellen reflektiert und das somit erzeugte Echosignal wieder vom Schwinger an dem Wasserfahrzeug empfangen. Aus der gemessenen Signallaufzeit kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schallimpulses die Entfernung Schwinger – Gewässerboden berechnet werden.

Die Geschwindigkeit des Schallimpulses im Wasser hängt von der Dichte und dem Salzgehalt des Wassers ab. Dabei wird die Dichte wiederum von zwei Faktoren beeinflusst, nämlich von Temperatur und Druck, wobei der Druck hier nur eine untergeordnete Rolle spielt. Da dieser mit zunehmender Tiefe nur sehr langsam zunimmt, muss der Einfluss des Druckes erst ab Tiefen von 100 Metern berücksichtigt werden. Da in Binnengewässern der Salzgehalt ebenfalls vernachlässigt werden kann, beeinflusst also lediglich die Wassertemperatur die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen. Bei flachen Gewässern, die gut durchmischt werden, liegt oftmals eine konstante Wassertemperatur vor. Bei stehenden Gewässern mit größerer Tiefe hingegen, kommt es nur zu einer geringen Wasserdurchmischung, wodurch sich Temperaturschichten bilden. Inwieweit fehlerhafte Temperaturannahmen die Genauigkeit der berechneten Gewässertiefe beeinflussen, wird

ausführlich in [Behrens 1988] behandelt. Hieraus geht hervor, dass für eine genügend genaue Echolotmessung die Erstellung von Temperaturprofilen in dem zu vermessenden Gewässer unabdingbar ist.

Neben der Ausbreitungsgeschwindigkeit spielt auch der Öffnungswinkel des Schwingers eine entscheidende Rolle für die Genauigkeit der Tiefenwerte. Durch die Wahl eines bestimmten Öffnungswinkels wird der Schallimpuls kegelförmig ausgestrahlt. Die erfasste Fläche eines ebenen Gewässerbodens hat die Form eines Kegelschnitts, wobei die Größe dieser Fläche einerseits von der Gewässertiefe und andererseits von dem Öffnungswinkel abhängig ist. Bei einer streng horizontalen Gewässersohle entspricht die gemessene Tiefe genau der Länge der Mittelachse des Schallkegels und kann damit auch exakt der jeweiligen Bootsposition zugeordnet werden. Da allerdings jeweils der reflektierte Impuls, der den kürzesten Weg zurücklegt, als das entsprechende Tiefensignal interpretiert wird, wird bei unebener oder geneigter Gewässersohle nicht die für die jeweilige Bootsposition repräsentative Tiefe erfasst, sondern immer eine zu geringe. Dieser Umstand hat auch zur Folge, dass der Hang von Uferböschungen stets flacher dargestellt wird, als er in der Örtlichkeit vorliegt (Abb. 3). Die richtige Bestimmung der Hangneigung ist allerdings für ingenieurtechnische Aussagen über die Standfestigkeit von Böschungen sowie für die Erstellung von digitalen Geländemodellen von großer Bedeutung. Aus diesem Grund ist stets die mathematische Berücksichtigung einer Hangneigungskorrektur erforderlich.

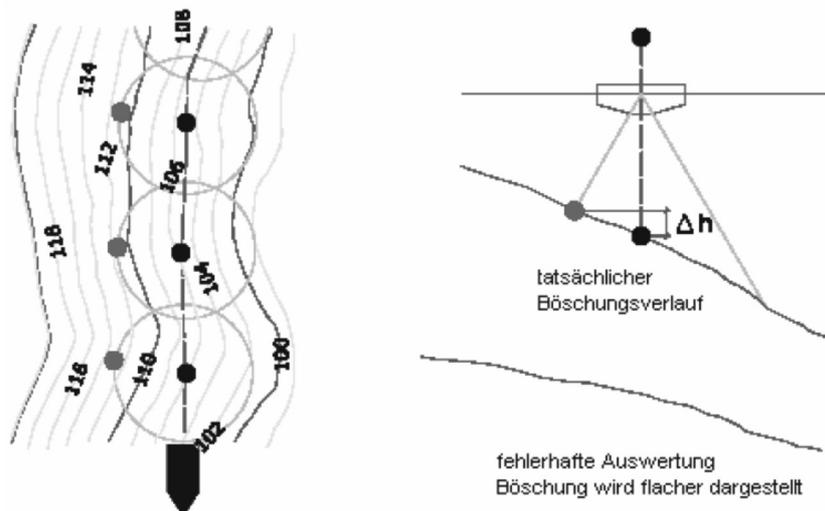


Abb.3 : Höhenfehler bei nicht angebrachter Hangneigungskorrektur [nach Trenkle 2006]

Soll nicht nur der Abstand zum Gewässergrund bestimmt werden, sondern auch dessen Beschaffenheit, müssen die besonderen Eigenschaften unterschiedlicher Frequenzbereiche beachtet werden. Messsignale hoher Frequenzen werden bereits an Grenzschichten mit geringer Dichteänderung (z.B. Schlamm), Signale niederer Frequenzen hingegen erst bei größerer Variation der Dichte (festes Gestein oder Felsen) reflektiert. Somit ist es wichtig, die Frequenz des Echolotes je nach gewünschter Aufnahme der Untergrundsicht zu wählen, da sonst Fehlinterpretationen der Gewässertiefe auftreten können. Bei Verwendung von Zwei-Frequenz-Echoloten, bei denen die Messungen von tiefen und hohen Frequenzen gleichzeitig aufgezeichnet werden, lassen sich selbst Schichtungen des Materials der Gewässersohle erfassen. [Schmidt u.a. 2004]

4 Praktische Messungen an einem Stausee

Im Folgenden sollen anhand eines praktischen Beispiels die Herangehensweise und Ergebnisse bei der Erstellung eines Tiefen-DGM beschrieben werden. Messobjekt ist hierbei der Wägitaler See, ein

Stausee, welcher sich ca. 50 km südöstlich von Zürich befindet. Obwohl die Staumauer des Sees und ihre nähere Umgebung durch ein umfangreiches Messprogramm überwacht werden, liegen über eventuelle Veränderungen des Seegrundes keine Informationen vor. Für den Betreiber der Anlage war es jedoch von Interesse, wie viel Material sich seit der Flutung des inneren Wägitales im Jahre 1926 auf dem Seegrund abgelagert hat, insbesondere im Mündungsbereich des Schlierenbaches. Weiterhin sollte geprüft werden, ob es Ablagerungen im Bereich des Einlasses des Druckstollens gibt und wie sich das Gelände im Bereich der Staumauer verändert hat. Da dieses Objekt Ziel eines jährlich stattfindenden Ingenieurvermessungspraktikums von Studenten der TU Dresden ist, sollte in der Messepoche 2006 ein Höhenmodell eines ausgewählten Bereiches des Stausees mit einer Fläche von ca. 1,5 km² (Abb. 4) angefertigt werden. Um mögliche Geländeänderungen erkennen zu können, wurde aus digitalisierten Höhenlinien einer topographischen Karte ein digitales Geländemodell des Zustandes vor der Flutung erstellt.

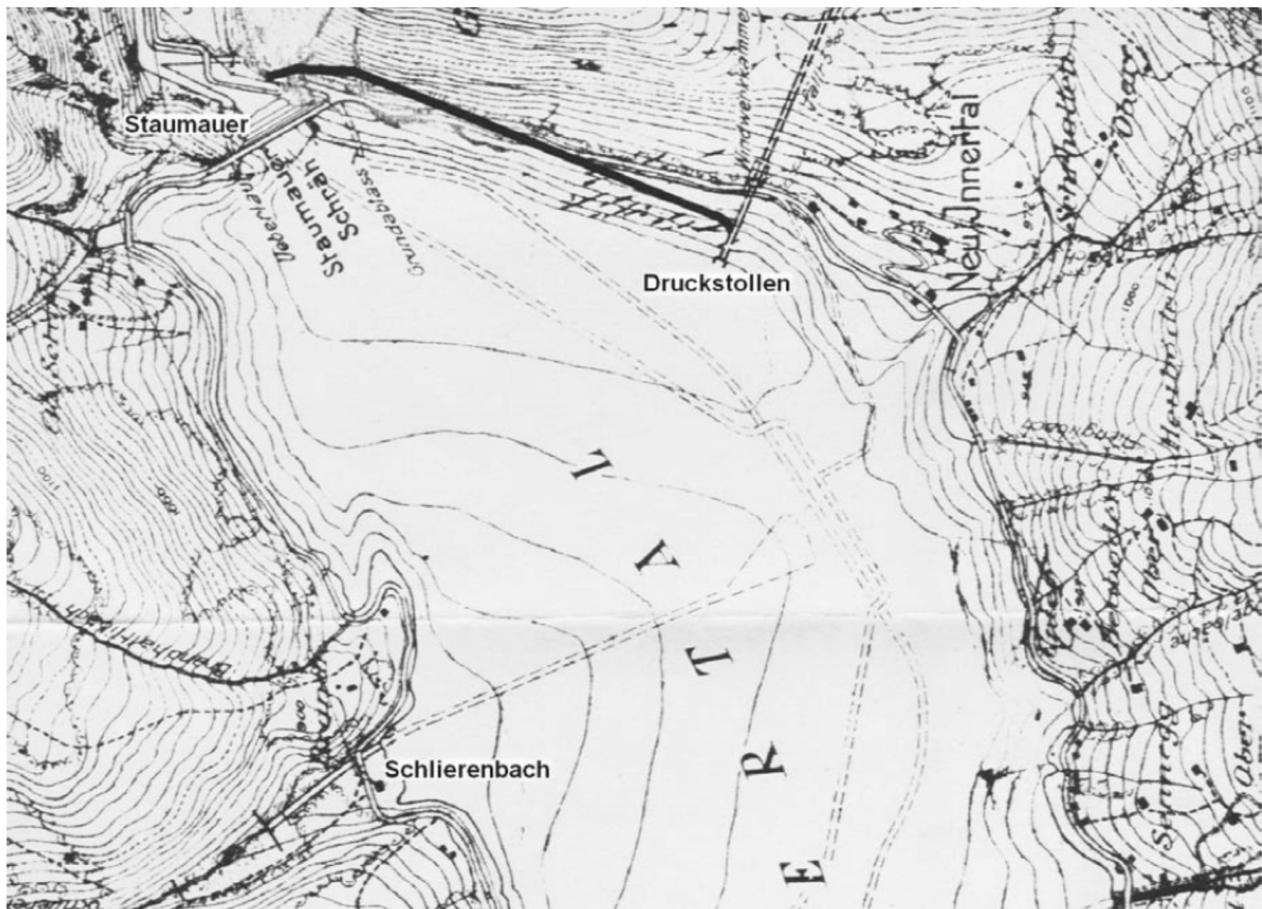


Abb.4 : Karte des Untersuchungsgebietes

Die Positionierung des hierbei eingesetzten Messsystems erfolgte mittels RTK-GPS (System 500 von Leica Geosystems), da der See eine durch geringe Abschattungen der GPS-Signale gekennzeichnete Fläche darstellt. Lediglich in den Uferbereichen können durch steile Böschungen oder starken Bewuchs Beeinträchtigungen auftreten. Zur Bestimmung der Wassertiefe wurde ein Einzelschwingerecholot mit einer Frequenz von 210 kHz eingesetzt. Um den Positionsdaten die zugehörigen Tiefenwerte zuordnen zu können, wurde die GPS-Antenne auf dem Boot senkrecht mit einem festen Abstand über dem Echolot angebracht. Für eine zeitliche Synchronisation der Daten von Positionierung und Tiefenmessung, wurden diese in eine gemeinsame Datei mit Zeitstempel gespeichert.

Vor Beginn der Messungen ist eine Planung der zu befahrenden Bootsspuren wichtige Voraussetzung für ein fehlerfreies Ergebnis. Besonders an den Gewässerrändern, welche meist

steilere Böschungen aufweisen, ist darauf zu achten, dass diese immer senkrecht angefahren werden. Nur in diesem Fall ist es möglich, die bereits weiter oben angesprochene Hangneigungskorrektur durchzuführen und die tatsächliche Tiefe zu ermitteln. Wird dies nicht beachtet, werden den jeweiligen Bootspositionen stets zu kleine Tiefenwerte zugeordnet und die Böschungen dadurch generell zu flach dargestellt.

Auch im Bereich baulicher Anlagen, hier insbesondere der Staumauer, muss ein Mindestabstand zu diesen eingeplant werden, welcher wiederum von der Gewässertiefe und dem Öffnungswinkel des Echolotes anhängig ist. Falls der Abstand zur Mauer zu gering gewählt wird, wird das Echolotsignal nicht am Gewässerboden, sondern bereits an der baulichen Anlage reflektiert und somit ebenfalls eine geringere Tiefe bestimmt. Nach erfolgter Planung kann eine Steuerungsdatei erstellt werden, die für die Navigation des Wasserfahrzeuges hilfreich ist. Abbildung 5 zeigt die für das beschriebene Projekt geplanten Messprofile im Bereich des zu erstellenden Geländemodells.

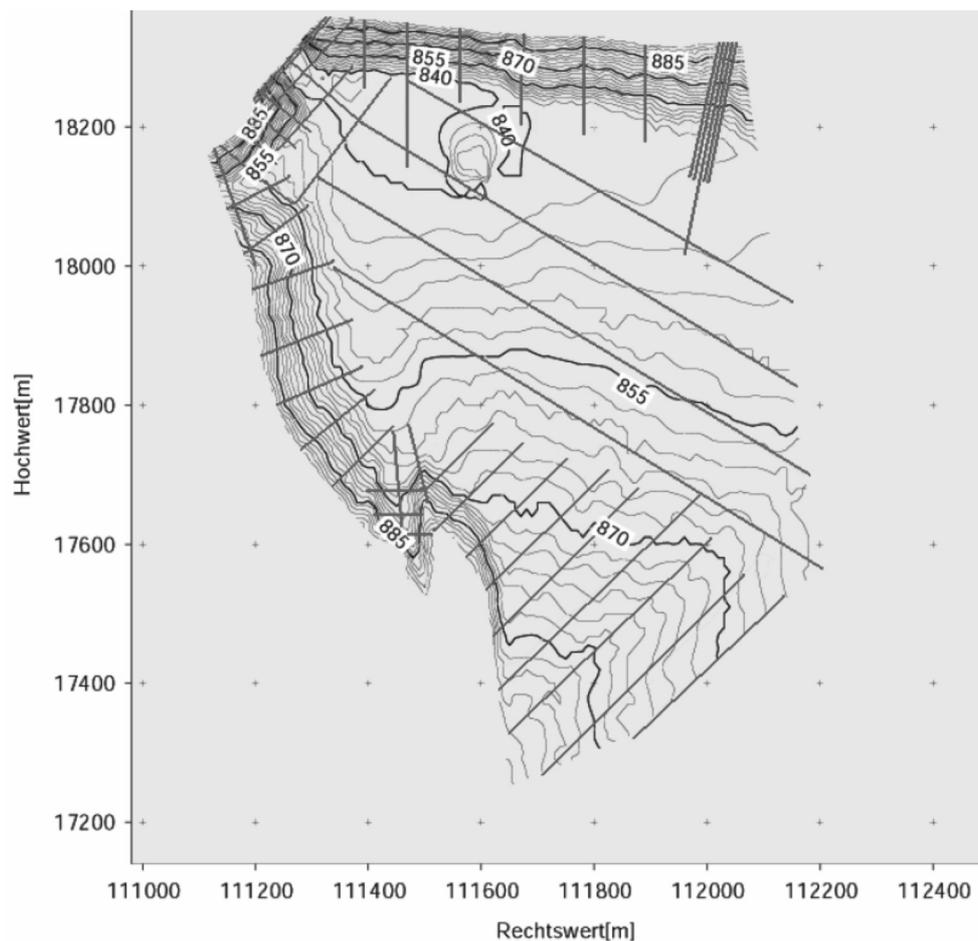


Abb.5 : Geplante Messprofile im Untersuchungsgebiet

Während der Messungen wurde das Wasserfahrzeug mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 m/s vorwärts bewegt. Da die Positionsbestimmung mittels RTK-GPS automatisch jede Sekunde erfolgte, lagen Koordinatentripel (X, Y, Z) der Messprofile im Abstand von ca. 1 m vor. Zusätzlich zu den Messprofilen wurden für die spätere Korrektur der Wasserschallgeschwindigkeit an verschiedenen Stellen des Sees vertikale Temperaturprofile erstellt. Weiterhin sollten die Ergebnisse anhand unabhängiger Messungen kontrolliert werden. Aus diesem Grund wurden an ausgewählten Stellen parallel zur Echolotung manuelle Lotungen durchgeführt.

Im Zuge der Auswertung der Messdaten erfolgte zunächst eine Bestimmung der Schallgeschwindigkeit anhand der gemessenen Temperaturen. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse von

5 gemessenen Temperaturprofilen, die über das ganze Messgebiet und den gesamten Messzeitraum verteilt liegen.

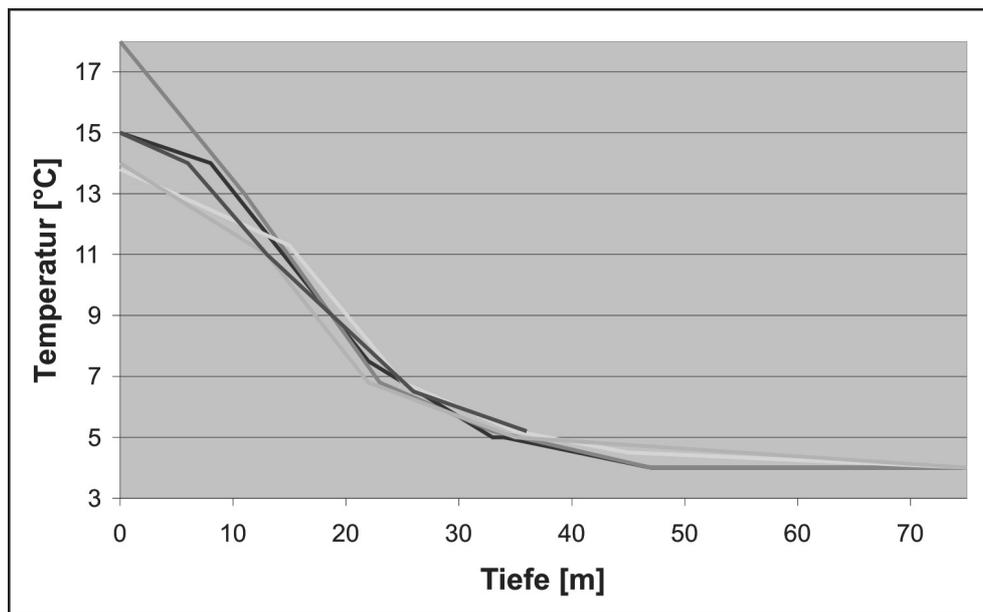


Abb.6 : Darstellung der gemessenen Temperaturprofile

In obiger Abbildung ist zu sehen, dass es in diesem stehenden Gewässer größerer Tiefe zu keiner oder nur vernachlässigbarer Durchmischung der Wassermassen kommt. Zwischen den einzelnen Profilen zeigten sich bei gleichen Tiefen keine größeren Temperaturvariationen. Lediglich die oberen Schichten des Sees wurden im Tagesverlauf durch eventuelle Sonneneinstrahlung erwärmt. Außerdem zeigte sich, dass die Temperatur lediglich bis in eine Tiefe von 40 – 50 m auf minimal 4 °C absinkt. Anhand dieser Ergebnisse wurde ein mittleres Temperaturprofil erstellt, aus welchem nun die Schallgeschwindigkeit in der jeweiligen Tiefe berechnet werden kann.

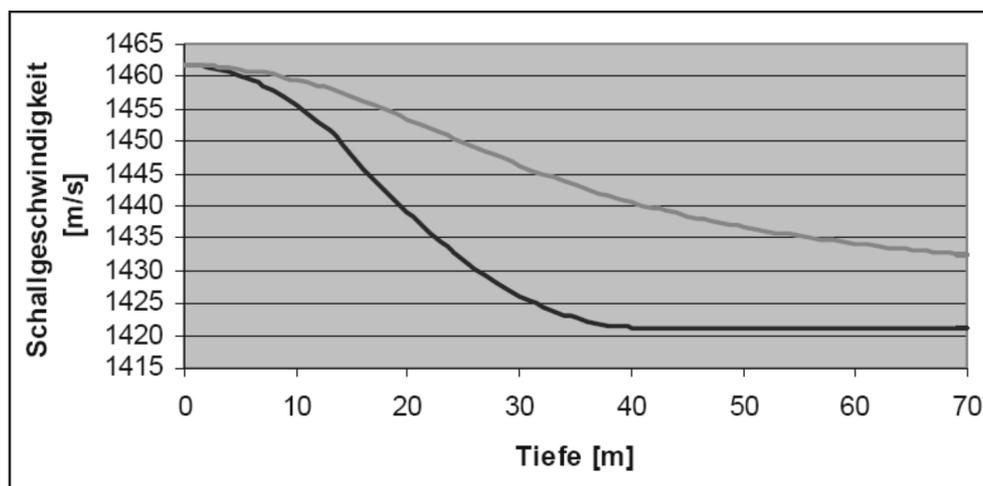


Abb.7 : Schallgeschwindigkeit und mittlere Schallgeschwindigkeit der jeweiligen Seetiefe

Da das Signal des Echolotes nun aber mehrere Temperaturschichten durchläuft, müssen diese je nach Tiefe des Gewässers auch berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wurde für die jeweilige Seetiefe eine mittlere Schallgeschwindigkeit unter Berücksichtigung des Signalweges berechnet. In Abbildung 7 ist sowohl die Kurve der Schallgeschwindigkeit für die jeweilige Tiefe (untere Linie) als auch die Kurve der mittleren Schallgeschwindigkeit eines Signals, welches in dieser Tiefe

reflektiert wurde (obere Linie) dargestellt. Mittels der so berechneten Funktionen wurden die ursprünglichen Tiefen korrigiert.

Ein weiterer Schritt der Auswertung betrifft die Berechnung der bereits oben beschriebenen Hangneigungskorrektur für alle Punkte im Uferbereich. Wie bereits erwähnt, wird am Hang nicht die Tiefe zu dem vertikal unter dem Boot liegenden Geländepunkt gemessen, sondern eine Schrägstrecke zu einem hangaufwärts vor der tatsächlichen Position liegenden Punkt. Aus dem bekannten Öffnungswinkel des Echolotschwingers, dem Hangneigungswinkel und der gemessenen Schrägstrecke kann der Hangneigungsfehler berechnet und als Korrektur an den Messwert angebracht werden (Abb. 8).

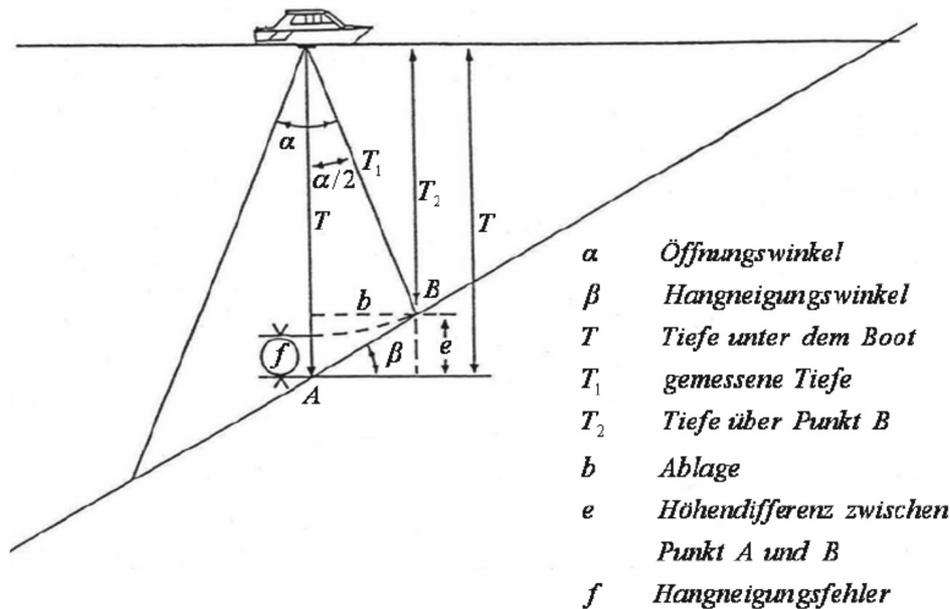


Abb.8 : Schematische Darstellung der Hangneigungskorrektur [nach Trenkle 1995]

Nachdem alle relevanten Fehlereinflüsse berücksichtigt und korrigiert sind, werden die Absoluthöhen des Gewässerbodens durch Subtraktion der Tiefenwerte von den mittels GPS bestimmten Positionshöhen ermittelt. Der konstruktiv bedingte, konstante Offset zwischen GPS-Antenne und Echolot ist hierbei ebenfalls zu berücksichtigen. Aus den so ermittelten dreidimensionalen Koordinaten des Gewässerbodens lässt sich nun ein Digitales Geländemodell erstellen.

In dem hier beschriebenen Beispiel sollte eine mögliche Geländeänderung des Seegrundes während der letzten 80 Jahre untersucht werden. Es mussten also für einen Vergleich zwei Modelle der zu untersuchenden Epochen erstellt werden. Die Situation vor der Flutung des Wägitales wurde aus einer topographischen Karte entnommen. Hier erfolgte eine Digitalisierung der Höhenlinien. Aus dem sehr engen Punktraster konnte ein detailliertes Geländemodell erstellt werden (Abb. 9). Die Genauigkeit dieses Modells lässt sich allerdings nur schwer abschätzen, da hier viele verschiedene Faktoren, wie Genauigkeit der topographischen Aufnahme, Interpolation der Höhenlinien oder Digitalisierung der Pläne eine Rolle spielen. Die Genauigkeit einzelner Punkte dieses Modells kann daher nur abgeschätzt und für Lage und Höhe mit einer Standardabweichung von 1 – 2 m angegeben werden.

Das Modell aus der hydrographischen Aufnahme weist leider nicht die hohe Punktdichte auf, da die Abstände der einzelnen Fahrspuren im ebenen Talgrund 100 m und im Hangbereich 40 m betragen (Abb. 10). Die Genauigkeit der Punkte wird hier allerdings höher sein. Anhand der an ausgewählten Positionen parallel zur Echolotung durchgeführten manuellen Lotung und dem Höhenvergleich mehrfach befahrener Positionen ergibt sich für die kombinierte

Koordinatenbestimmung aus GPS und Echolotmessung eine Standardabweichung der Höhe von 0,2 m im Talgrund bis 0,5 m in den Böschungsbereichen.

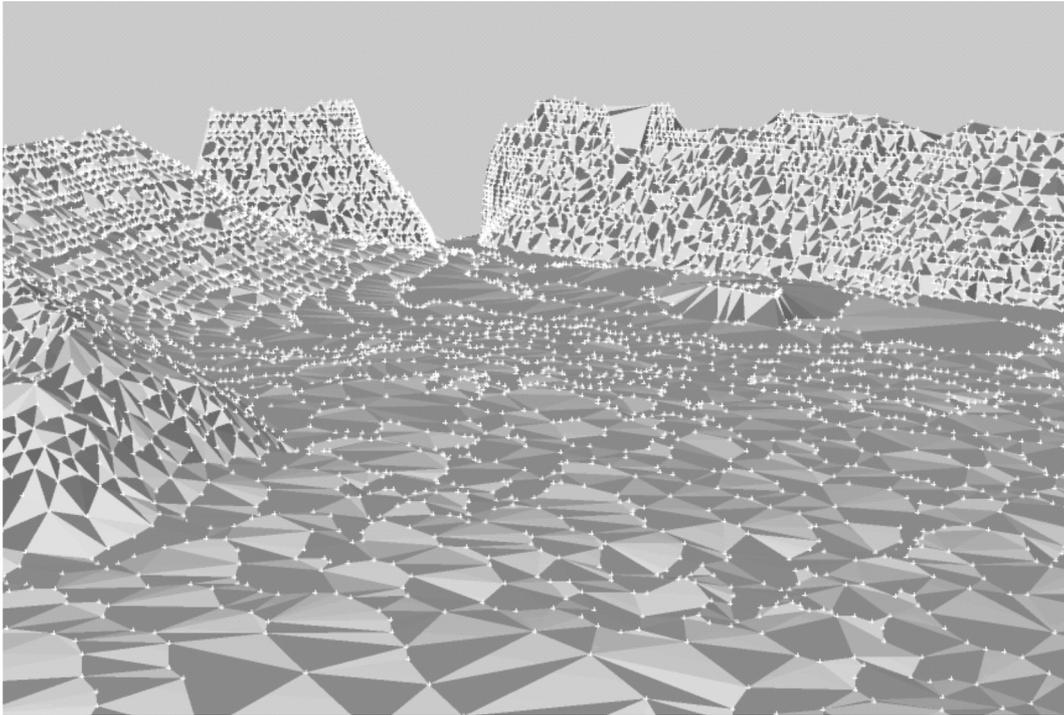


Abb.9 : Digitales Geländemodell aus Höhenlinienplänen

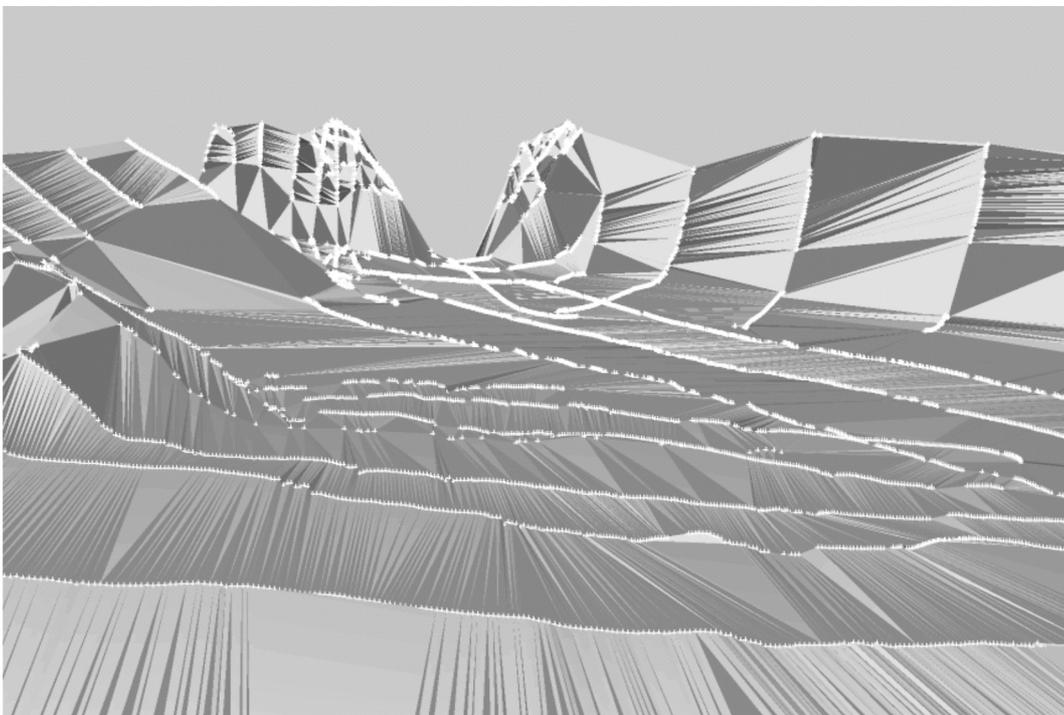


Abb.10 : Digitales Geländemodell aus Echolotprofilen

Um eine Aussage über eventuelle Geländeänderungen machen zu können, müssen nun beide Modelle miteinander verschnitten werden. Als problematisch hat sich hierbei allerdings die unterschiedliche Punktdichte der beiden Modelle herausgestellt, da die Höhen zwischen den jeweiligen Fahrspuren interpoliert werden. Hier kann es durch unterschiedliche Rechenansätze zu

stark variierenden Lösungen kommen. Bei einer Differenzbildung zwischen beiden Modellen würden dann nicht nur Geländeänderungen, sondern auch eventuelle Modellierungsfehler in das Ergebnis einfließen. Um dennoch relevante Aussagen machen zu können, sind lediglich die Höhenwerte der einzelnen Fahrspuren mit dem Geländemodell des Urzustandes verglichen worden. Mit diesem Vorgehen konnte gezeigt werden, dass in der Nähe der baulichen Anlagen keine signifikanten Geländeänderungen stattgefunden haben. Im Bereich des Zuflusses des Schlierenbaches hingegen konnten Ablagerungen von bis zu 6 m Mächtigkeit und bis zu 160 m entfernt von der Mündung des Baches nachgewiesen werden.

5 Literatur

- [Behrens 1988] BEHRENS, J.: Zur Genauigkeit von Peilungen in der Gewässervermessung. Dissertation, Universität Hannover, 1988
- [Behrens 1999] BEHRENS, J.: Echolote – Historie und Überblick. In: Gewässervermessung und Hydrographische Informationssysteme. 49. DVW-Seminar an der Technischen Universität Dresden, Schriftenreihe Band 37; S. 54-72, Wittwer, Stuttgart, 1999
- [Metzler 2000] METZLER, B.: Untersuchungen zur Arbeitsweise und Genauigkeit eines automatischen Tiefenlotsystems. Diplomarbeit, TU Dresden, unveröffentlicht, 2000
- [Schmidt u.a. 2004] SCHMIDT, A., PEREGOVITZ, J., TRENKLE, J.: Hydrographische Messungen im Eggbergbecken zur Ermittlung von Sedimentmächtigkeiten. Ingenieur Blatt, Heft 2 S. 58-63, Bund Deutscher Baumeister, Architekten und Ingenieure Baden-Württemberg, 2004
- [Stempfhuber u.a. 2000] STEMPFHUBER, W., SCHNÄDELBACH, K. S., MAURER, W.: Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern. In: Ingenieurvermessung 2000 – XIII. International Course on Engineering Surveying, Wittwer, Stuttgart, 2000
- [Trenkle 1995] TRENKLE, J.: Präzise hydrographische Vermessungen am Hochrhein und ihre Auswertung. In: Deutscher Verein für Vermessungswesen, Schriftenreihe Band 14, S. 182-197, Wittwer, Stuttgart, 1995
- [Trenkle 2006] TRENKLE, J.: GPS – gestützte Vermessung von Binnengewässern, In: DVW e.V. Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Schriftenreihe Band 49, S. 111-123, Wißner, Augsburg, 2006