

**Hochschule Weihenstephan - Triesdorf**

**Fakultät Umweltingenieurwesen**

**Studiengang Umweltsicherung**

**B A C H E L O R A R B E I T**

**Akustische Konzentrationsmessung mit einer  
ADV – Sonde**

eingereicht von:

Laura Eberlein

Erstkorrektor:

Prof. Dr. Andreas Hoffmann

Zweitkorrektor:

Dr. Ivo Baselt

Tag der Abgabe:

05. September 2018

## Inhalt

1	Einführung und Problemstellung .....	1
2	Literaturübersicht .....	4
2.1	Akustische Grundlagen.....	4
2.2	Sonar - Theorie .....	5
2.3	Signal - Rausch - Verhältnis .....	7
3	Versuch.....	8
3.1	Versuchsaufbau .....	8
3.2	Messsonde .....	10
3.2.1	Aufbau & Funktion .....	10
3.2.2	Doppler - Effekt .....	12
3.3	Sediment .....	13
3.3.1	Materialentnahme .....	13
3.3.2	Schlickaufbereitung.....	16
3.3.3	Sedimenteigenschaften.....	19
3.4	Versuchsdurchführung.....	21
4	Ergebnisse .....	24
4.1	Korndichte .....	24
4.2	Korngrößenverteilung.....	24
4.2.1	Altmühlsee .....	26
4.2.2	Eixendorfer Stausee.....	27
4.2.3	Ems.....	28
4.3	Überprüfung der Bedingungen der Rayleigh - Streuung.....	29
	Die SNR als Funktion der Konzentration.....	30
4.4	Anpassung der Gleichungs-Parameter an die Sonar – Gleichung.....	32
4.4.1	Altmühlsee .....	32
4.4.2	Eixendorfer Stausee.....	33
4.4.3	Ems.....	35
4.5	Parameter der Sonar - Theorie.....	36
5	Diskussion .....	39
5.1	Diskussion der Ergebnisse.....	39
5.2	Auswertung mit dem Tangens hyperbolicus .....	40
5.3	Vergleich der verschiedenen Materialien .....	45
5.4	Mögliche Fehlerquellen .....	47

### III

6	Zusammenfassung .....	49
7	Fazit .....	50
8	Literaturverzeichnis .....	51
9	Abbilungsverzeichnis .....	53
10	Tabellenverzeichnis .....	55
11	Anhang .....	56

## **1 Einführung und Problemstellung**

„Hochwasser: Der Schlamm muss raus“. So lautet die Überschrift eines Artikels des Münchner Merkur. Im Bericht geht es um die an der Isen gelegene Stadt Dorfen. Da das Flussbett stark verschlammt ist, kommt es vor einer Wehranlage zu einem verringerten Abfluss. Dies kann im Falle eines Hochwassers verheerende Folgen haben, da durch die Aufstauung des Sediments das Volumen des Retentionsraums deutlich verkleinert wird. Sind die Wassermengen zu groß, um von der Wehranlage zurückgehalten werden zu können, kann es zu Überschwemmungen kommen (Weingartner, 2018). Angesichts des Klimawandels und den damit verbundenen, immer häufiger auftretenden Extremwetterereignissen, muss der Verschlammung entgegengewirkt werden und der Retentionsraum für eventuell bevorstehende Hochwasser sichergestellt werden.

Ein weiteres Beispiel, welches die Problematik der Verlandung veranschaulicht, ist der Altmühlsee. Der Flachsee weist eine maximale Tiefe von 2,5 m auf. Das große, hauptsächlich landwirtschaftlich genutzte Einzugsgebiet, trägt große Mengen an erodierten Sedimentpartikeln ein. Dies führt bei solch einer geringen Wassertiefe zu einem raschen Anstieg der Schlickablagerungen im See (Krauß, 2017). In der Oberpfalz, am Eixendorfer Stausee, konnte im September 2016 bereits eine verheerende Auswirkung der Verlandung beobachtet werden. Beim Spülen der Vorsperre des Sees wurden enorme Mengen Sediment eingetragen, was dazu führte, dass viele Fische aufgrund von Sauerstoffmangel verendeten (Mardanow, 2016). Die Sedimentpartikel wurden wie auch beim Altmühlsee, aus dem landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebiet angespült. Fernab der bayerischen Gewässer kämpft auch die Ems gegen die Verschlickung an. Der Fluss entspringt in Nordrhein - Westfalen und mündet nach 371 km in die Nordsee. Die Ems wird von der Schifffahrt dominiert, was in der Vergangenheit zu zahlreichen Ausbaumaßnahmen und Fahrrinnenvertiefungen führte. Das Ebbe - Flut - Gleichgewicht, welches den Fluss prägte, wurde massiv gestört. Heute ist der Flutstrom deutlich stärker als der Ebbstrom. Aufgrund dessen, kommt es zu einer stetig steigenden Zufuhr an Schlickpartikeln (Szyska, 2017).

Wie unzählige Schlagzeilen verdeutlichen, sind viele weitere Gewässer oder Küstenbereiche von der Verlandungsproblematik betroffen.

Sediment oder organisches Material sammelt sich an und beeinträchtigt das natürliche Abflussregime, oder wie oben bereits genannt, technische Bauwerke. Um die Problematik einzudämmen, ist es von Nöten, die Sedimentkonzentrationen in betroffenen Gewässern regelmäßig zu kontrollieren und rechtzeitig geeignete Maßnahmen zu ergreifen. In der Praxis werden derartige Messungen in der Regel mit sogenannten ADCP - Sonden durchgeführt. Das Messverfahren dient zur Ermittlung von Durchflüssen in freifließenden Gewässern. Zur Messung wird ein Ultraschall - Doppler - Profil - Strömungsmesser (engl.: Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)) verwendet. Die Messsonde befindet sich auf einem Schwimmkörper, der über das Gewässer bewegt wird. Für die Fortbewegung wird der Schwimmkörper beispielsweise an einem Boot oder an einem Trageil befestigt, welches über den Gewässerkörper gespannt ist und mittels Schleppseil bewegt werden kann. Durch diese Querbewegung des akustischen Messgerätes über das Gewässer, können neben der Fließgeschwindigkeit auch die Wassertiefe und Wassertemperatur gemessen werden (Morgenschweis, 2010). Da die Geräte nicht in der Lage sind, zusätzlich die Konzentrationen der Partikel zu messen, werden hierfür zusätzliche Messgeräte benötigt. Wie am Beispiel der Ems deutlich wird, stehen Geschwindigkeit und Konzentration im Zusammenhang und können sich gegenseitig beeinflussen. Deren Zusammenspiel wird bei diesen Messungen nicht berücksichtigt. Da dieses aber von großem Interesse ist, werden hierfür zusätzliche, teilweise auch akustische Messgeräte eingesetzt.

Am Altmühlsee wurde die Sedimentmächtigkeit, beispielsweise im Rahmen einer Echolotbefahrung, untersucht. Durch Auswertung der Echolotdaten, konnte eine Übersichtskarte des Sees erstellt werden, auf der die Sedimentmächtigkeit dargestellt wurde (Krauß, 2018). Sehr häufig werden auch optische Messgeräte der Laser - Technik zur Konzentrationsbestimmung eingesetzt. Die Fließgeschwindigkeit kann mit diesen Geräten nicht erfasst werden (Sequoia Scientific, 2018).

Vorteilhaft wäre es, wenn mit nur einem Gerät gemessen werden müsste, um neben dem Durchfluss und den Turbulenzen auch auf die Sedimentkonzentration im Gewässer schließen zu können. Aus diesem Grund wurden im Rahmen einer Doktorarbeit bereits Versuche mit einer ADV - Sonde durchgeführt, um einen Zusammenhang der akustischen Parameter und der Partikelkonzentration herzustellen. Als Sediment wurde Quarzmehl verwendet. Durch die kontrollierte Zugabe von Quarzmehl in Wasser, war die Konzentration des Sediments bekannt.

Mit Hilfe der ADV - Sonde wurde unter anderem die Signal - to - noise - ratio (SNR) (siehe Kapitel 2.3), die eine Funktion der Konzentration ist, gemessen. Durch die Auswertung der Messergebnisse konnte eine Funktion erstellt werden, welche es ermöglicht, die Konzentration mittels SNR messbar zu machen. So kann auf ein zweites Messgerät zur Konzentrationsmessung verzichtet werden. Zusätzlich kann orts- und zeitgleich gemessen werden. Ein weiterer positiver Aspekt ist die hohe Messfrequenz der ADV - Sonden, mit deren Hilfe auch Fluktuationen der Konzentration gemessen werden können.

Ziel meiner Arbeit ist es, den Versuch mit Sedimenten aus dem Altmühlsee, dem Eixendorfer Stausee und der Unteren Ems zu wiederholen, auszuwerten und die Ergebnisse mit der Quarzmehl - Auswertung zu vergleichen, um die praktische Anwendbarkeit dieses Verfahrens zu überprüfen.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Akustische Grundlagen

Die Grundlage der verwendeten Messergeräte bildet die Akustik. Sie umfasst neben der Lehre des Schalls und dessen Ausbreitung auch viele andere, damit zusammenhängende Gesichtspunkte. Hierzu zählen beispielsweise die Entstehung, die Wahrnehmung oder die Auswirkung des Schalls auf verschiedenste Medien (Kuchling, 2011).

Für eine detaillierte Beschreibung der akustischen Herleitung sei auf *Hoitink und Hoekstra (2005)* verwiesen.

Das Prinzip der ADV - Sonde basiert auf der Rayleigh - Streuung. Diese tritt ein, wenn der Durchmesser der im Wasser enthaltenen Partikel kleiner ist, als die Wellenlänge des ausgesendeten Signals. Die ausgestrahlte Frequenz der Sonde beträgt 10 MHz.

Die Rückstrahlintensität  $S_v$  steigt mit der reflektierten Partikelmenge  $n_b$  innerhalb des Messvolumens und dessen Streuquerschnitts. Zur Berechnung von  $S_v$  wird zunächst ein Materialparameter  $\Upsilon$  nach *Medwin und Clay (1997)* bestimmt.

$$\Upsilon = \left(\frac{\Delta E - 1}{3\Delta E}\right)^2 + \frac{1}{3}\left(\frac{\Delta\rho - 1}{2\Delta\rho + 1}\right)^2 \quad (1)$$

$\Delta\rho$  beschreibt das Dichteverhältnis von Partikel und Wasser, wohingegen  $\Delta E$  das Elastizitätsverhältnis darstellt. Des Weiteren sind für die Rückstrahlintensität neben der Konzentration  $C$  auch die Wellenzahl des Senders  $k_\omega$ , der Partikelradius  $r$  und die Partikeldichte  $\rho_s$  von Bedeutung.

Die Konzentration ergibt sich durch Multiplikation der Masse  $M$  und der Partikelmenge  $n_b$ .

$$C = M * n_b \quad (2)$$

Mit Hilfe der oben genannten Werte, kann die Rückstrahlintensität  $S_v$  als Funktion der Konzentration ausgedrückt werden.  $S_v$  darf nicht mit der Intensität des Sonden - Empfängers verwechselt werden (Hoitink, 2005).

$$S_v = 10 \log_{10} \left( \frac{3r^3 k \omega^4 \Upsilon}{\rho_s} C \right) \quad (3)$$

## 2.2 Sonar - Theorie

Die ADV - Sonde sendet während der Messung ein akustisches Signal aus, welches von den Partikeln im Wasser reflektiert, aber nur zum Teil vom Empfänger der Sonde empfangen wird. Dieser Prozess wird in der folgenden Abbildung dargestellt.

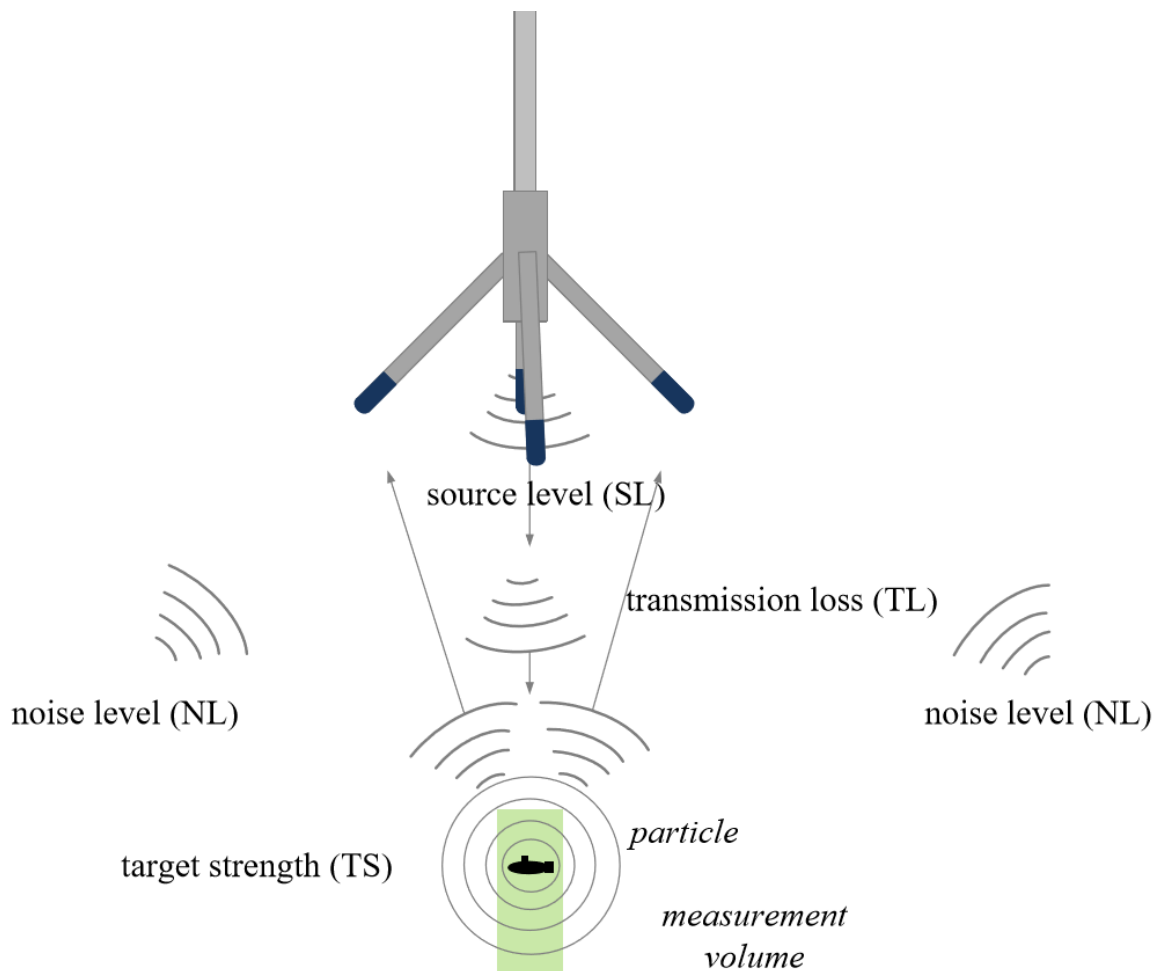


Abbildung 1: Darstellung der Übertragsverluste der ADV - Sonde, Quelle: Oliver Chmiel, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München



Wie in Abbildung 1 deutlich wird, ist die emittierte Intensität des Signals (SL), sowohl vor dem Auftreffen auf die Partikel, als auch nach der Reflexion, Übertragungsverlusten (TS) ausgesetzt.

Das reflektierte Signal wird durch das spezifische Verhalten des Teilchens beeinflusst (TS). Als „noise level“ (NL) bezeichnet man ein Rauschen im Hintergrund, welches durch einen Richtungsindex reduziert wird. Um das reflektierte Signal zu erkennen, muss die Rückstreuintensität die Intensität des Rauschens überwinden.

$$SL - 2TL + TS > NL - DI \quad (4)$$

Von *Lerch (2009)* wurde das Überschusssignal (SE) eingeführt. Wird ein Teilchen von der akustischen Vorrichtung erkannt, muss das Signal SE einen positiven Wert annehmen. Die Sonargleichung wurde unter anderem von *Strom (2011)* angewandt.

$$SE = SL - 2TL + TS - (NL - DI) \quad (5)$$

In der Gleichung (5) wird das Rauschen mit der empfangene Rückstreuintensität nicht berücksichtigt (Urlick, 1983).

*Hoitink und Hoekstra (2005)* beschreiben die Sonargleichung in ähnlicher Form:

$$K_c(N_E - N_{Er}) = S_v - 40 \log_{10}(R) - 2\alpha R + C_{ADV} \quad (6)$$

$K_c(N_E - N_{Er})$  ist das empfangene Rückstreusignal (SE + NL) im Messgerät, welches auch Signal - to - Noise - ratio (SNR) genannt wird.  $N_E$  beschreibt die Rückstrahlintensität in Zählritten pro Sekunde (engl. counts per second), während  $N_{Er}$  die Geräuschintensität darstellt.  $K_c$  ist ein gerätespezifischer Transformationsfaktor [dB /Counts].

TS (siehe (4)) wird hier durch  $S_v$  ersetzt.  $C_{ADV}$  drückt den Einfluss geräte- und materialspezifischer Einstellungen aus. Durch den Term  $40 \log_{10}(R) - 2\alpha R$  werden die Übertragungsverluste für beide Richtungen berücksichtigt (2TL), wobei R für die Entfernung zwischen Sender und Messvolumen steht (Lerch, 2009).

Durch  $\alpha$  wird auch der Absorptionseffekt in der Gleichung berücksichtigt. Dieser wird aus der Summe der Energieabsorptionsverluste im Wasser  $\alpha_w$  und an Partikeln  $\alpha_p$  gebildet.

### 2.3 Signal - Rausch - Verhältnis

Die Rückstrahlintensität, die von der ADV - Sonde empfangen wird, ist von der Partikelkonzentration abhängig. Zwei Effekte müssen gleichzeitig berücksichtigt werden. Zum einen hat eine zunehmende Partikelkonzentration eine Zunahme des Streuquerschnitts zufolge, wenn eine homogene Partikelverteilung über das Messvolumen gewährleistet ist. Das führt zu einem steigenden Signal - Rausch - Verhältnis. Zum anderen verursacht Schalldämpfung eine Verringerung der SNR.

Durch Kombination der Gleichungen 3 und 6 ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\log_{10}(A C) = 4\log_{10}(R) + \frac{1}{10} \Pi_1 SNR - \frac{C_{ADV}}{10} + \frac{1}{5} \alpha_w R + \frac{2R}{10} \alpha_p \quad (7)$$

mit

$$A = \frac{3r^3 k \omega^4 \gamma}{\rho_s} \quad (8)$$

und

$$\Pi_1 SNR = K_c (N_E - N_{Er}) \quad (9)$$

Für die Versuche im Rahmen der Bachelorarbeit ist das Signal - Rausch - Verhältnis von großer Bedeutung, da ausgehend von diesen Messergebnissen Funktionen erstellt wurden, mit deren Hilfe die Sedimentkonzentration im untersuchten Gewässer berechnet werden kann.

### 3 Versuch

#### 3.1 Versuchsaufbau

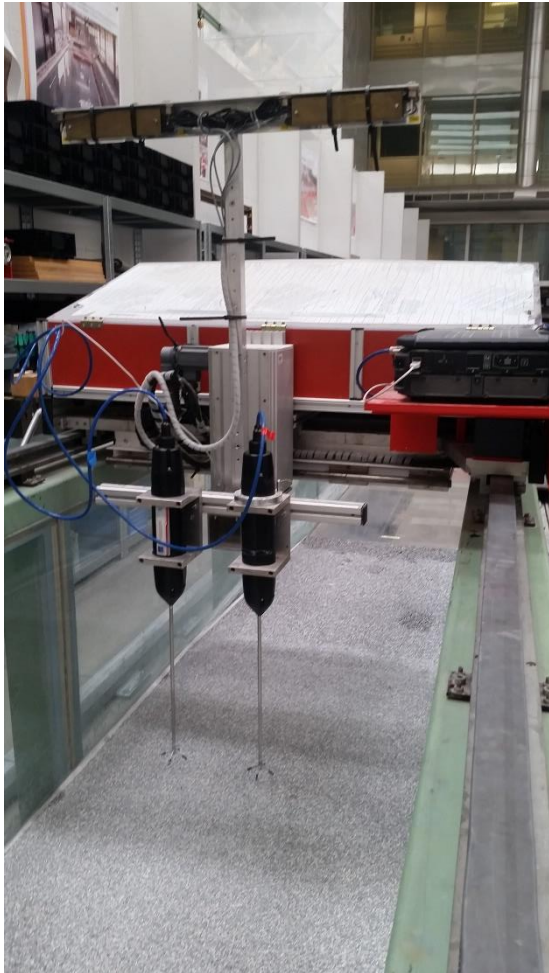


Abbildung 2: Messwagen mit zwei Messsonden  
(links Vetrino Profiler), Quelle: Eigene Aufnahme

Der Versuch wurde in einer festen Rinne aufgebaut. Auf Schienen, welche auf der Rinne befestigt sind, ist ein Messwagen angebracht. Um die Messungen aufzeichnen zu können, ist zusätzlich zu den Sonden auch ein Computer befestigt.

Gemessen wurde während des Versuchs nur mit der linken Messsonde (siehe Abb. 2). Dabei handelt es sich um ein akustisches Messgerät, den Vetrino Profiler. Die Funktionsweise der Sonde wird in Kapitel 3.2 beschrieben. Ein weiterer Computer steuert sowohl die Position des Messwagens in X - und Y- Richtung, als auch die Position der Messgeräte in X -, Y-, und Z- Richtung. Somit können pro Messung exakt die gleichen Messpositionen angefahren und die Ergebnisse direkt verglichen werden.

Für das zu untersuchende Wasser - Sediment - Gemisch wurde ein transparenter Kunststoffzylinder mit einem Durchmesser von  $D = 0,29$  m in der Rinne platziert und mit Leitungswasser gefüllt.

Um die zugegebenen Partikel in Schwebelage zu halten und ein homogenes Mischverhältnis zu erzielen, wurde ein Rührer angebracht (Abbildung 3). Das Rührgerät ist an einer Metallstange befestigt, die am Boden in einer Kunststoffplatte endet. Um das Umkippen des Rührers zu verhindern, wurde die Kunststoffplatte zusätzlich mit einem Wassereimer beschwert.

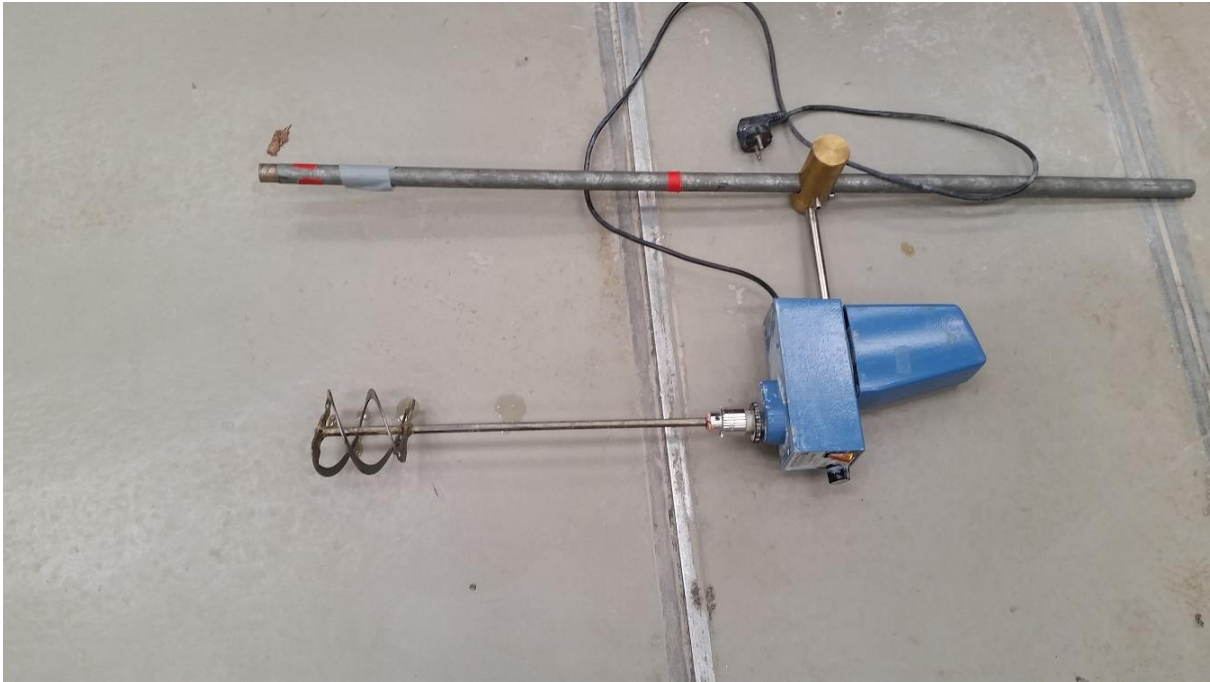


Abbildung 3: Rührgerät zur Durchmischung des Sediment - Wasser - Gemisches, Quelle: Eigene Aufnahme

Der Vectrino Profiler wurde daraufhin mit dem Steuerungs - Computer im Zylinder platziert und auf zwei unterschiedliche Messhöhen eingestellt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 dargestellt. Gemessen wurde auf den Höhen  $z_{25}$  und  $z_{29}$ . Auf der Position  $z_{25}$  befindet sich die Sonde 0,15 m über dem Zylinderboden. Die Höhe  $z_{29}$  befindet sich 4 cm tiefer, also 0,11 m über dem Boden. Nach der Befüllung des Zylinders, wurde das Volumen  $V$  bestimmt.

Dafür wurde folgende Formel verwendet:

$$V_{Zylinder} = \pi * r^2 * h \quad (10)$$



Abbildung 4: Versuchsaufbau mit Messzylinder, Rührer und ADV - Sonde, Quelle: Eigene Aufnahme

## 3.2 Messsonde

### 3.2.1 Aufbau & Funktion

Für den Versuch wurde der Vectrino Profiler der Firma Nortek verwendet.



Abbildung 5: Messgerät Vectrino Profiler, Quelle: [www.nortekgroup.de](http://www.nortekgroup.de)

Wie das oben dargestellte Bild 5 zeigt, besitzt die Messsonde vier Empfänger, sogenannte „Beams“, die im  $30^\circ$  - Winkel an die Sonde angebracht sind. In der Mitte der Empfänger befindet sich der zentrale Sender, von dessen Position aus akustische Signale ausgesendet werden.

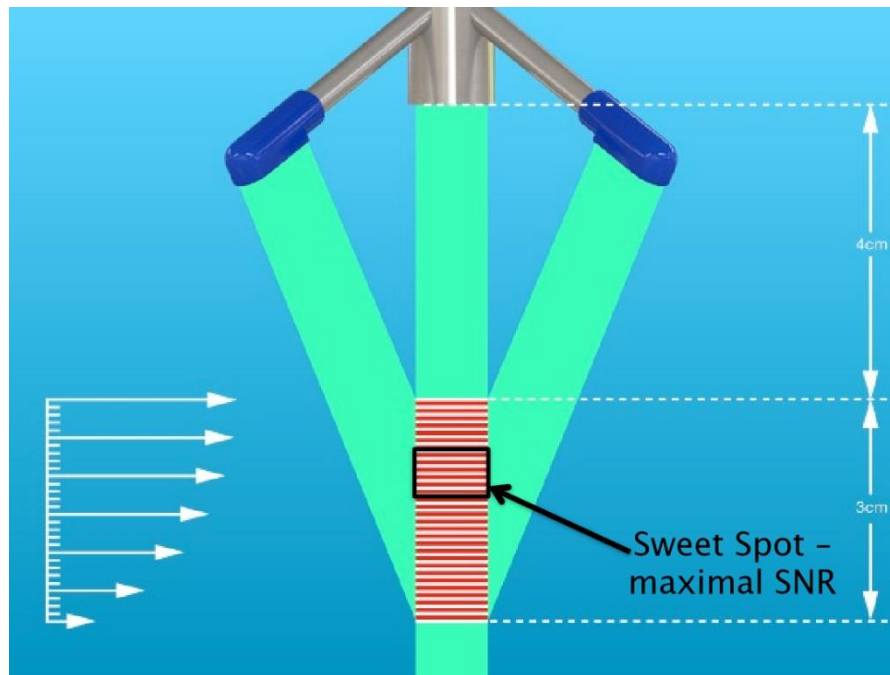


Abbildung 6: Messbereich der Sonde, Quelle: Broschüre Vectrino Profiler

Die Signale werden in einem bestimmten Bereich, dem sogenannten Messbereich, von Sedimentpartikeln reflektiert und daraufhin von den vier Empfängern empfangen. Der Bereich, in dem die Messung bzw. Reflektion stattfindet, beginnt 4,0 cm unterhalb des Senders und ist 3,0 cm lang (siehe Abb. 6). Unterteilt wird der Messbereich in 30 Abschnitte, die jeweils 1 mm mächtig sind ( $\Delta z = 1 \text{ mm}$ ). Aufgrund der Unterteilung werden 30 Messergebnisse erfasst. Die maximale SNR kann im beschriebenen Bereich, dem Sweet Spot, gemessen werden.

Mit Hilfe der ADV - Sonde können Geschwindigkeitsfluktuationen und zeitgleich auch das Signal - Rausch - Verhältnis gemessen werden (NortekUSA, 2012).



### 3.2.2 Doppler - Effekt

Vergrößert oder verkleinert sich der gegenseitige Abstand einer Schallquelle und eines Schallempfängers, nimmt der Empfänger E andere Frequenzen wahr, als der Sender S ausgestrahlt hat. Dieses Phänomen wird als Doppler - Effekt bezeichnet.

Die von der Schallquelle ausgesendete Frequenz wird mit  $f_S$  abgekürzt und berechnet sich aus der Schallgeschwindigkeit  $c$  und der abgestrahlten Wellenlänge  $\lambda$ .

$$f_S = \frac{c}{\lambda} \quad (11)$$

Vom Empfänger wird die Frequenz  $f_E$  aufgenommen und folgendermaßen berechnet:

$$f_E = f_S \frac{c - v_E}{c - v_S} \quad (12)$$

Wobei  $v_E$  für die Geschwindigkeit des Empfängers und  $v_S$  für die Geschwindigkeit des Senders steht (Kuchling, 2011).

Sehr häufig ist  $v_S$  bzw.  $v_E$  deutlich kleiner als die Schallgeschwindigkeit  $c$ . In diesem Fall kann die Formel zur Berechnung von  $f_E$  vereinfacht werden:

$$f_E = f_S \left( 1 + \frac{\Delta v}{c} \right) \quad (13)$$

$\Delta v$  ist die Relativgeschwindigkeit, die zwischen E und S besteht.

$$\Delta v = v_S - v_E \quad (14)$$

Entfernt sich der Empfänger vom Sender, verkleinert sich die Relativgeschwindigkeit  $\Delta v$  zwischen Schallwelle und Empfänger. Bewegt sich der Sender auf den Empfänger zu, wirkt sich dies auf die Wellenlänge  $\lambda$  aus. Diese verkürzt sich um den Weg, den der Sender während einer Schwingung zurücklegt (Kuchling, 2011).

### 3.3 Sediment

Zur Versuchsdurchführung wurde Sediment aus drei verschiedenen Gewässern entnommen, welches nach der Auswertung mit den Quarzmehlmessungen verglichen wurde. Die erste Messung wurde mit Sediment aus dem Altmühlsee durchgeführt. Zusätzlich wurde mit Schlick aus dem Eixendorfer Stausee und der Ems gemessen. Um eventuelle Messfehler ausschließen zu können, wurden mit jedem Sediment zwei Messungen auf jeweils den selben Höhen durchgeführt.

Die Sedimente wurden nicht im Rahmen dieser Arbeit entnommen, sondern vom Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr für die Versuche zur Verfügung gestellt.

#### 3.3.1 Materialentnahme

##### 3.3.1.1 Altmühlsee

Die Proben am Altmühlsee wurden an verschiedenen Positionen entnommen und fortlaufend nummeriert. Zusätzlich wurde jede einzelne Position mit einem GPS - Gerät markiert (Chmiel, 2017). An welchen Stellen das Sediment aus dem Altmühlsee entnommen wurde, ist in Abbildung 8 dargestellt.

Beprobt wurde der Flachsee mit einem Van - Veen - Bodengreifer (siehe Abb. 7). Hierfür wurden auf dem See verschiedene Positionen angefahren. Dort wurde der Greifer, befestigt an einem Seil, an den verschiedenen Stellen auf den Gewässergrund hinabgelassen. Durch das Zusammenziehen der beiden Greiferschaufeln konnte Sediment entnommen werden.





Abbildung 7: Van - Veen - Bodengreifer, Quelle: Eigene Aufnahme



Abbildung 8: Probenahmestellen am Altmühlsee, Quelle: Oliver Chmiel, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München

### 3.3.1.2 Eixendorfer Stausee

Weitere Messungen wurden mit Schlick aus dem Eixendorfer Stausee durchgeführt. Da der Stausee zur Zeit der Entnahme abgelassen war, wurden die Proben dort mit Schaufeln entnommen und direkt in die Transportgefäße gefüllt. Auch hier wurde ein GPS - Gerät verwendet, um die Entnahmestellen des Sediments aufzunehmen. Die genauen Stellen sind der Abbildung 9 zu entnehmen.



Abbildung 9: Probenahmestellen am Eixendorfer Stausee, Quelle: Oliver Chmiel, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München



### 3.3.1.3 Ems

Abgeschlossen wurden die Messungen mit Sediment aus der Ems. Dort wurde von Fluss - km 4 bis 13 beprobt. Die Proben wurden bei Ebbeniedrigwasser entnommen. Hierfür wurde, wie auch beim Eixendorfer Stausee, eine Schaufel zur Sedimententnahme aus dem Fluss benutzt. Die genauen Stellen der Probeentnahme sind in der Abbildung 10 dargestellt.

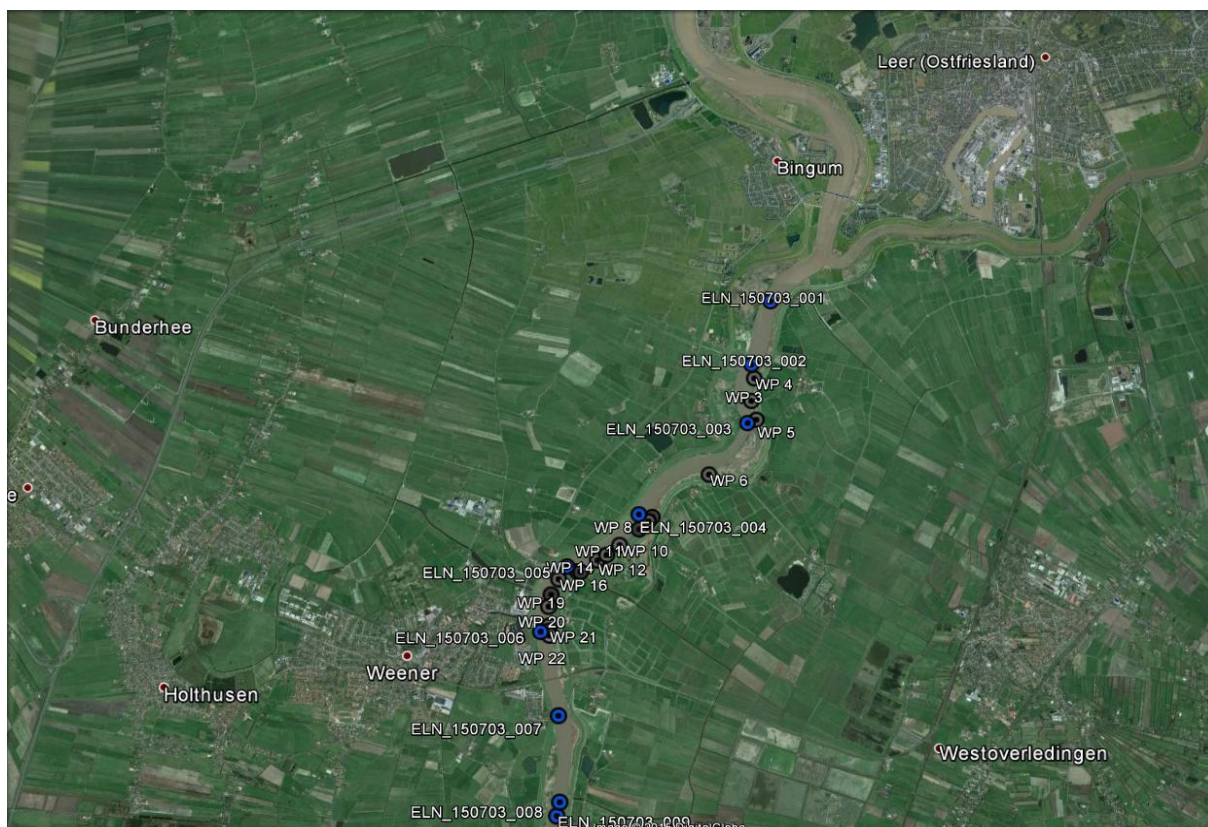


Abbildung 10: Probenahmestellen an der Ems, Quelle: Oliver Chmiel, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München

### 3.3.2 Schlickaufbereitung

Die Schlickproben wurden nach der Entnahme luftdicht, in kleinen Kunststoffeimern verschlossen, im Kühlschrank bei  $T = 6\text{ °C}$  gekühlt und aufbewahrt. Eine unbearbeitete Sedimentprobe ist in Abbildung 11 dargestellt.

Da für den Versuch ausschließlich die trockenen Sedimentpartikel benötigt wurden, wurde das entnommene Sediment bei  $105\text{ °C}$  im Muffelofen bis zur Massenkonstanz getrocknet.



Abbildung 11: Schlickproben vor der Aufbereitung, *Quelle: Eigene Aufnahme*



Abbildung 12: Backenbrecher der Firma Retsch, *Quelle: Eigene Aufnahme*

Aufgrund des hohen Tongehalts im Schlick, verklumpte das Sediment während der Trocknung und des Wasserentzugs sehr stark, sodass es mit Hilfe eines Backenbrechers der Marke Retsch zerkleinert wurde (Abbildung 12).

Verwendet wurde das Modell BB50. Durch einen Trichter gelangt das Aufgabegut in den Mahlraum des Einschwingenbrechers. Das Brechen bzw. Zerkleinern des Sediments findet in einem Schacht statt, der keilförmig zuläuft. Hier befindet sich neben einem festen, auch ein durch eine Exzenterwelle bewegter Brecharm. Die Brecharme bewegen sich elliptisch, wodurch das aufgebene Gut zerdrückt wird. Ist das bearbeitete Sediment kleiner als die Brechspaltverstellung, fällt es nach unten in einen Auffangbehälter. Von dort können die feinen Partikel entnommen werden (Pankratz, 2018).

Wie fein das Sediment nach der Zerkleinerung im Backenbrecher ist, kann der Abbildung 13 entnommen werden.



Abbildung 13: Sediment nach der Zerkleinerung im Backenbrecher, Quelle: Eigene Aufnahme

Im letzten Schritt der Sedimentaufbereitung wurden die trockenen Partikel durch eine Vibrations - Siebmaschine auf eine Größe von  $< 0,25$  mm gesiebt. Hier wurde ein Gerät der Firma Fritsch verwendet. Ein elektromagnetischer Antrieb versetzt die Siebe in Vertikalschwingung. Das Siebgut wird durch die Schwingungsbewegung in die Luft geworfen und passiert im Fall die Maschen der aufeinander gestapelten Analysensiebe. Die Siebe werden von der größten Maschenweite zur kleinsten gestapelt. Unter den Sieben befindet sich eine Auffangschale, worin sich die kleinsten Partikel sammeln (Fritsch, 2018).

Durch die Siebung wird die Homogenität der verwendeten Probe sichergestellt. Des Weiteren sind die Partikel klein genug, um im Versuchsaufbau in Schwebe gehalten werden zu können und sich nicht in strömungsberuhigte Randzonen abzusetzen.

Um die Sedimentkonzentration so genau wie möglich bestimmen zu können, wird das zuzugebende Sediment auf drei Nachkommastellen genau abgewogen (siehe 3.4). Auch hierfür spielt die Homogenität und die Größe der Sedimentpartikel eine große Rolle, denn je kleiner die Partikel sind, desto genauer kann das Sediment abgewogen werden. Größere Sedimentklumpen würden das Abwiegen unnötig erschweren.



### 3.3.3 Sedimenteigenschaften

Anhand der Trockenmassen wurden die maßgeblichen Sedimenteigenschaften untersucht.

#### 3.3.3.1 Korndichte

Die Korndichte wurde mittels Helium - Pyknometer bestimmt. Verwendet wurde ein Gerät der Firma Porotec, Typ Pycnomatic ATC (siehe Abb. 14). Das Sediment wird in eine Probekammer gegeben. Dessen Volumen wird durch ein Magnetventil mit zwei Kammern, welche Referenzvolumina enthalten, verbunden. Die Kammern werden mit Helium von Luft bzw. anderen Gasen gereinigt. Messgas wird in beide Referenzkammern eingeleitet, bis der Druck den Atmosphärendruck überschreitet und bei ca. 2 bar liegt. Sind Gastemperatur und Gasdruck konstant, wird der Druckwert gespeichert. Daraufhin wird das Gas in die Kammer des Probenvolumens transportiert. Auch dort wird ein Druckwert notiert, nachdem Druck und Temperatur im Gleichgewicht stehen. Zusätzlich wird der Atmosphärendruck gespeichert. Das Volumen der Probe wird über die allgemeine Gasgleichung berechnet. Die Probenmasse kann anschließend anhand der Partikeldichte bestimmt werden (Porotec).



Abbildung 14: Helium - Pyknometer der Fa. Porotec, Quelle: Eigene Aufnahme

### 3.3.3.2 Korngrößenverteilung

Zusätzlich zur Korndichte, wurden die Korngrößenverteilungen der Proben mit Hilfe des Particle Sizers der Marke Horiba ermittelt (Abbildung 16). Das Funktionsschema ist in der folgenden Abbildung 15 dargestellt.

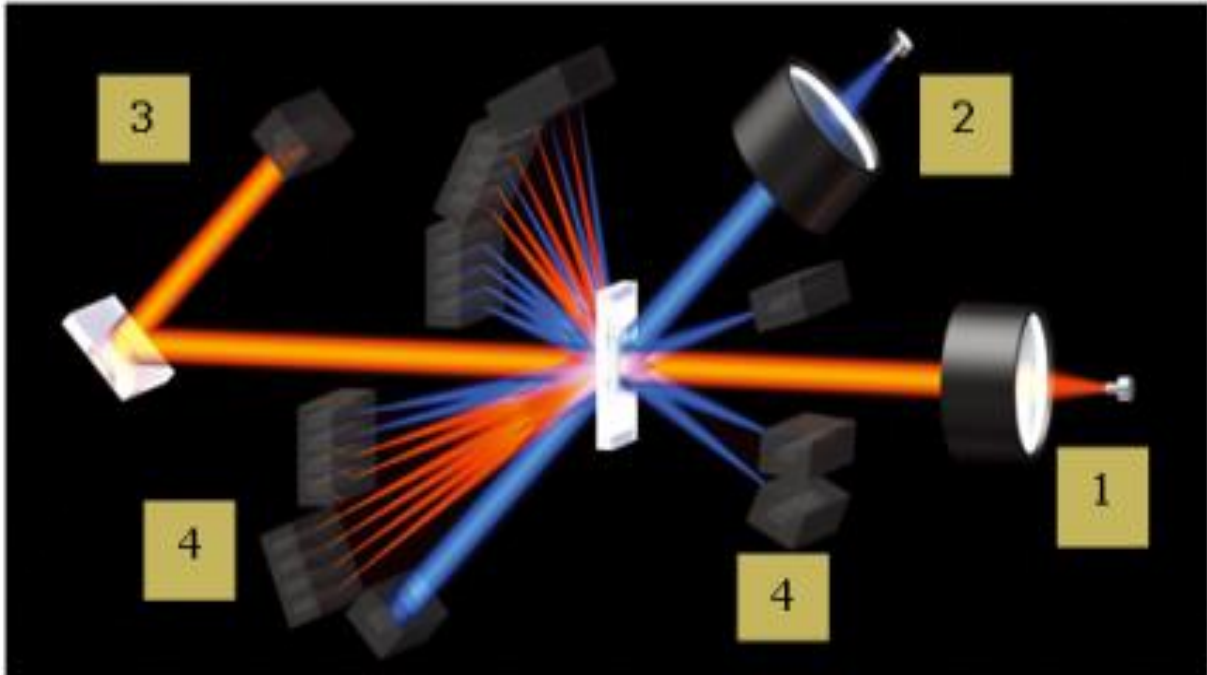


Abbildung 15: Funktionsschema der Laserbeugung im Particle Sizer, Quelle: [www.horiba.de](http://www.horiba.de)

Hintergrund der Laserbeugung ist, dass die Partikel je nach Größe in bestimmten Winkeln Licht streuen. Dabei streuen kleine Teilchen in Weitwinkeln und große Partikel in kleinen Winkeln. Durch die Ansammlung von Partikeln wird ein Streulichtmuster erzeugt, welches durch Intensität und Winkel definiert ist. Das Streulichtmuster kann in ein Partikelgrößen - Verteilungsergebnis umgewandelt werden. Zur Analyse der Korngrößenverteilung wird das Streulicht auf Detektoren gesammelt (Horiba, 2006).



Abbildung 16: Particle Sizer der Fa. Horiba, Quelle: Eigene Aufnahme

### 3.4 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Versuchs wurde mit jedem Sediment eine Nullmessung durchgeführt. Vor der Befüllung des Zylinders mit Wasser, wurde dieser mehrmals ausgewaschen und ausgespült. Trotz allem lässt es sich nicht vermeiden, dass sich noch feine Partikel im Gefäß befinden, welche die Messergebnisse verfälschen. Aus diesem Grund ist es bei Laborarbeiten üblich, Nullmessungen vor jedem Versuch durchzuführen. Diese können als Referenzzustand herangezogen werden. Während der folgenden Messungen wurden die Sedimentkonzentrationen schrittweise erhöht. Dies geschah während der ersten Messung der Sedimente des Altmühlsees und des Eixendorfer Stausees in 37 Schritten. Dabei wurde eine Konzentration von 20 g/L erreicht. Während des zweiten Messdurchganges wurden die Konzentrationen so lange erhöht, bis das jeweilige Sediment aufgebraucht war. So wurde bei der zweiten Altmühlsee Messung nach 44 Schritten eine Konzentration von 85 g/L erreicht, während bei der zweiten Messung des Eixendorfer Stausees das Sediment nach 40 Sedimentzugaben und einer Konzentration von 40 g/L aufgebraucht war. Die Sedimente der Ems, wurden jeweils in 40 Schritten auf eine Konzentration von 40 g/L erhöht bzw. aufgebraucht, da beide Messungen im Zuge des zweiten Messdurchgangs durchgeführt wurden und es sich um zwei Proben aus verschiedenen Jahrgängen handelt.



## Versuch

Zu diesem Zweck wurde die jeweilige Sedimentzugabemenge  $z$  anhand der Ziel - und Ist - Konzentrationen, sowie des bekannten Wasservolumens  $V$  berechnet und auf drei Nachkommastellen genau abgewogen. Es wurde eine Präzisionswaage der Firma Sartorius verwendet. Diese ist in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: Einwiegen der Sedimentzugaben mit der Präzisionswaage der Fa. Sartorius, Quelle: Eigene Aufnahme

Die Schritte der Ziel - Konzentrationen  $Z$  wurden von vornherein festgelegt, wohingegen die Ist - Konzentration  $I$  aus der Summe der bisherigen Schlickzugaben und dem Wasservolumen  $V$  berechnet werden kann.

$$I = \frac{\sum z}{V} \quad (15)$$

$$z = (Z - I) * V \quad (16)$$

Wie die Bezeichnung schon vermuten lässt, beschreibt die Ziel - Konzentration die Konzentration an Schlickpartikeln, die im Sediment - Wasser - Gemisch enthalten sein sollte. Im Gegensatz dazu gibt die Ist - Konzentration die konkrete Konzentration zum momentanen Zeitpunkt im Gemisch an.

Auf Grund von Messunsicherheiten, wie beispielsweise die Abwaage des Sediments auf drei Nachkommastellen oder die Partikelrückstände des Sediments im Zugabefäß, kommt es zu einer sehr geringen Differenz von Ziel - und Ist - Konzentration.

Um die Bildung von Sedimentklumpen zu vermeiden, wurde das Gemisch nach der Sedimentzugabe vom angebrachten Rührer durchmischt.

Während dieser Phase wurde das Rührgerät auf 1400 U/min eingestellt. Wie bereits erwähnt, wurden pro Konzentration zwei Messungen auf verschiedenen Höhen durchgeführt. Hierfür wurde die Umdrehungszahl des Rührers auf 350 U/min gedrosselt.

Gemessen wurde einerseits auf der Position  $z = 25$ , wobei dies einer Höhe von 0,15 m über dem Gefäßboden entspricht. Außerdem wurde auf der Position  $z = 29$  gemessen. Dies entspricht einer Höhe von 0,11 m über dem Zylinderboden.

Sind die Messungen einer Konzentration abgeschlossen, wurde die Umdrehungszahl des Rührers erhöht, die folgende Zugabemenge abgewogen, hinzugegeben und kräftig durchmischt. Daraufhin wurde die Umdrehungszahl des Rührers gedrosselt und die Messungen wieder an den oben genannten Stellen durchgeführt. Nun wiederholten sich die Arbeitsschritte so lange, bis das jeweilige Sediment aufgebraucht war.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Korndichte

Die durch das Heliumpyknometer bestimmten Korndichten werden in der folgenden Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 1: Korndichten der beprobten Gewässer. Eigene Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen mit dem Heliumpyknometer (Fa. Porotec).*

<b>Gewässer</b>	<b>Dichte [g/cm<sup>3</sup>]</b>
<b>Altmühlsee</b>	<b>2,492</b>
<b>Eixendorfer Stausee</b>	<b>2,447</b>
<b>Ems</b>	<b>2,565</b>

Die gemessenen Korndichten können für die gängigen Sedimente keiner Dichte der Literatur zugeordnet werden. In der Literatur wird für die Dichte von Sand ein Wert von 2,65 g/cm<sup>3</sup> aufgeführt. Die Dichte von Schluff liegt im Bereich von 2,68 g/cm<sup>3</sup> bis 2,70 g/cm<sup>3</sup> und Ton wird mit einer Dichte von 2,70 g/cm<sup>3</sup> beschrieben (Prinz, 2012).

Wie der Tabelle entnommen werden kann, liegen die gemessenen Werte unter den Literaturwerten. Dies kann auf einen hohen Anteil an Organik in den entnommenen Proben zurückgeführt werden.

### 4.2 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung dient zur Klassifizierung von Böden und wird durch die Darstellung der Massenanteile je Korngröße veranschaulicht.

Die aufgeführten Grafiken zeigen neben den Sieblinien der Sedimente auch den Siebdurchgang der entsprechenden Schlickproben. Aus den Graphen werden zusätzlich die Kennzahlen U und C<sub>c</sub> abgeleitet, mit deren Hilfe Aussagen zur Sieblinie getroffen werden können.

U, welches als Unförmigkeitszahl betitelt wird, ist eine dimensionslose Kennzahl. Der Wert gibt Auskunft darüber, wie steil die Körnungslinie verläuft. Betrachtet werden hierbei die Bereiche  $d_{60}$  und  $d_{10}$ , welche ins Verhältnis gesetzt werden. Wobei  $d_x$  für die Summenmassenanteile bei x % der entsprechenden Korngröße steht.

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (17)$$

Die Krümmung der Sieblinie wird anhand der Krümmungszahl  $C_c$  beschrieben. Auch hierfür werden die Bereiche  $d_{10}$  und  $d_{60}$  betrachtet. Zusätzlich fließt bei der Krümmungszahl auch der Bereich  $d_{30}$  mit in die Berechnung ein. Daraus ergibt sich folgende Formel:

$$C_c = \frac{(d_{30})^2}{d_{60} d_{10}} \quad (18)$$

Die Unförmigkeitszahl und die Krümmungszahl werden zur Klassifizierung von Sediment bzw. Böden herangezogen. So kann die Korngrößenverteilung mittels dieser Kennwerte in drei verschiedene Stufen eingeteilt werden. Unterschieden wird an dieser Stelle in „enggestuft“, „weitgestuft“ und „intermittierend gestuft“ (Pyka, 2017). Die Einteilung kann der anschließenden Tabelle entnommen werden.

*Tabelle 2: Einteilung der Sieblinie in die Gruppen „enggestuft“, „weitgestuft“ und „intermittierend gestuft“ anhand der Parameter U und  $C_c$ . Bearbeitet nach Pyka (Vorlesungsskript Bodentechnologie, 2017).*

<b>Benennung</b>	<b>Kurzzeichen</b>	<b>U</b>	<b><math>C_c</math></b>
<b>enggestuft</b>	E	$< 6$	beliebig
<b>weitgestuft</b>	W	$\geq 6$	1 - 3
<b>intermittierend gestuft</b>	I	$\geq 6$	$< 1$ oder $> 3$

Ergänzend zu  $U$  und  $C_c$  wurde auch der Zentralwert der Sedimentpartikel bestimmt. Unter dem sogenannten Median wird der in der Mitte stehende Wert, der nach der Größe geordnete Werte einer Stichprobe verstanden (Bossek, 2005). In den folgenden Abbildungen wird der Median mit „ $d_{50}$ “ abgekürzt.

### 4.2.1 Altmühlsee

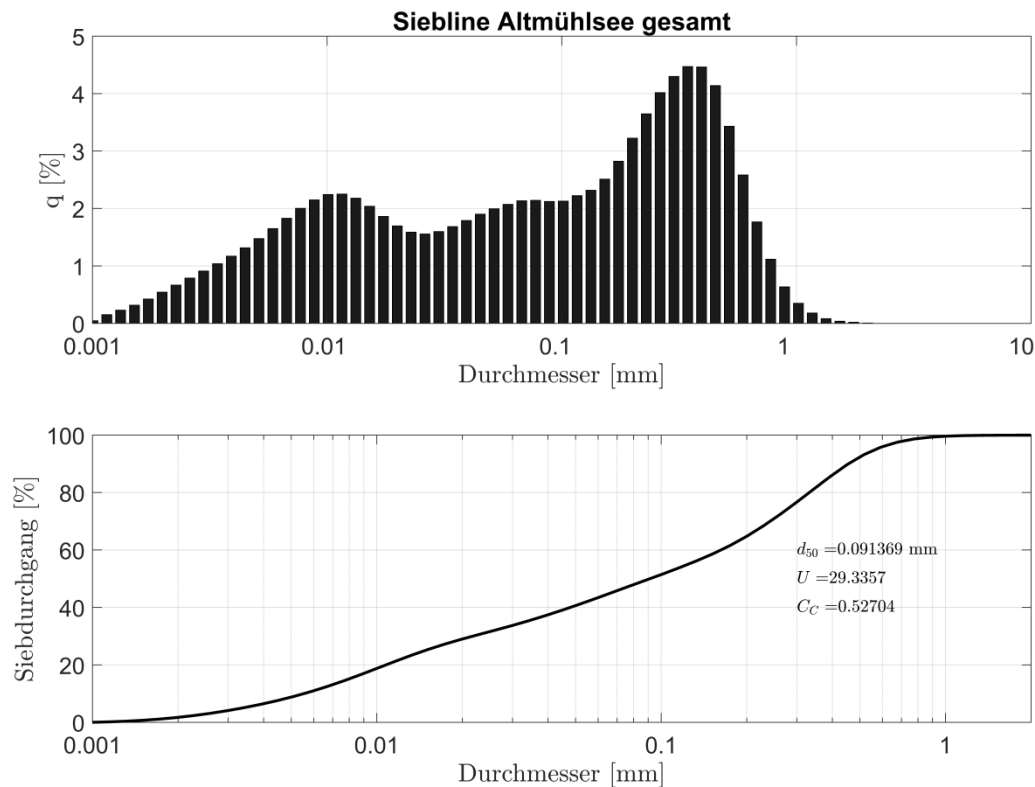


Abbildung 18: Sieblinie zur Darstellung der Korngrößenverteilung aller Altmühlsee – Proben, Quelle: Eigene Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen mit dem Particle Sizer der Firma Horiba

Wie der Graphik 18 entnommen werden kann, liegt der Großteil der Korndurchmesser der Altmühlsee - Probe bei bis zu 1 mm. Nur ein geringer Bruchteil, unter 0,5 %, der Partikel liegen im Bereich zwischen 1 mm und 3 mm. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Häufigkeit der Sedimentpartikel mit steigendem Korndurchmesser zunimmt. Hier wird zwischen Primär - und Sekundärpartikeln unterschieden. Unter den Primärpartikeln versteht man die Kornanhäufung im Bereich niedriger Korndurchmesser.

Während der Messung im Particle Sizer kann es zu einem Zusammenschluss der vorhandenen Partikel kommen. Dieser Vorgang wird auch als Flockung oder Koagulation bezeichnet (Blume, 2010).

Veranschaulicht wird die Flockung durch die Anhäufung der Partikel im Bereich größerer Korndurchmesser. Die Sekundärpartikel liegen bei den Altmühlsee - Proben im Bereich zwischen 0,3 mm und 0,7 mm.

Die Ungleichförmigkeitszahl  $U$  liegt mit 29,34 deutlich über dem Wert 6, welcher zur Bewertung herangezogen wird. Des Weiteren ist auch die Krümmungszahl mit dem Wert 0,53 sehr niedrig und kann als  $< 1$  eingestuft werden. Anhand dieser Ergebnisse, kann die Sieblinie als „intermittierend gestuft“ und mit dem Kurzzeichen I beschrieben werden.

### 4.2.2 Eixendorfer Stausee

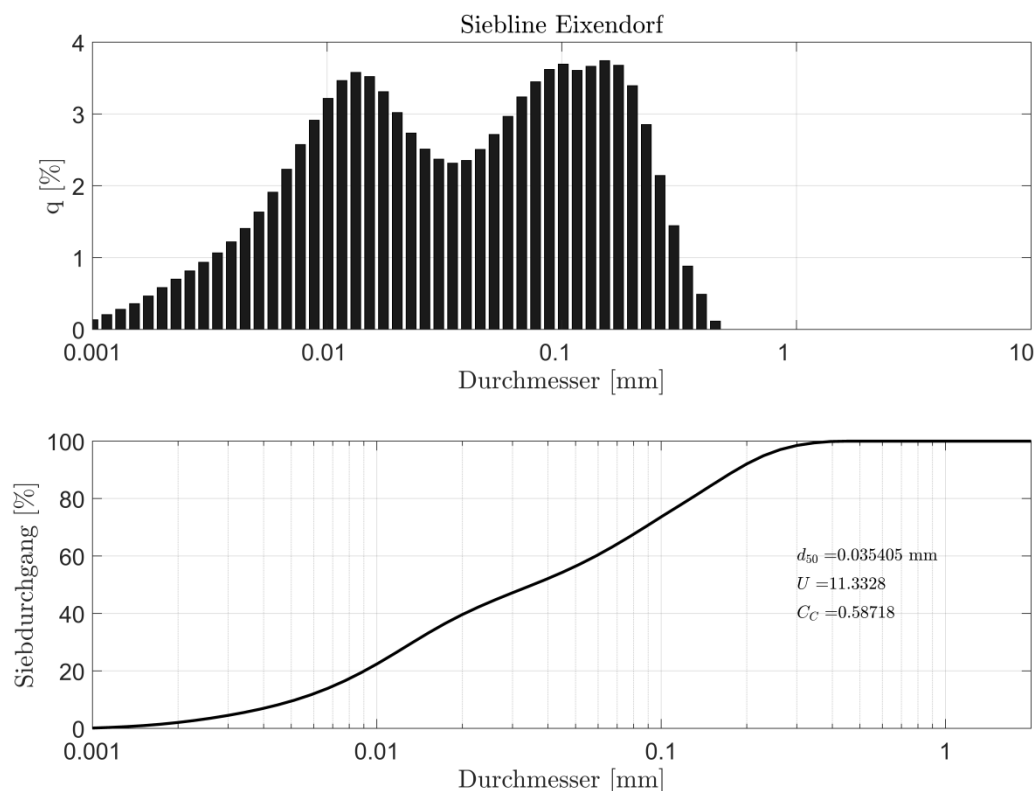


Abbildung 19: Sieblinie zur Darstellung der Korngrößenverteilung des Eixendorfer Stausees, Quelle: Eigene Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen mit dem Particle Sizer der Firma Horiba

Am Eixendorfer Stausee sind Körner mit Durchmessern zwischen 0,001 mm und ca. 0,6 mm zu finden. Es dominieren Korngrößen zwischen 0,02 mm und 0,03 mm. Diese können den Primärpartikeln zugeordnet werden. Die Korndurchmesser der Sekundärpartikel liegen im Bereich zwischen 0,08 mm und 0,5 mm (siehe Abb. 19).

Da  $U = 11,33 > 6$  und  $C_c = 0,58718 < 1$  ist, kann die Sieblinie des Eixendorfer Stausees als „intermittierend gestuft“ eingruppiert werden. Der Median des Stausees liegt mit  $d_{50} = 0,035$  mm, deutlich unter dem Median des Altmühlsees.

### 4.2.3 Ems

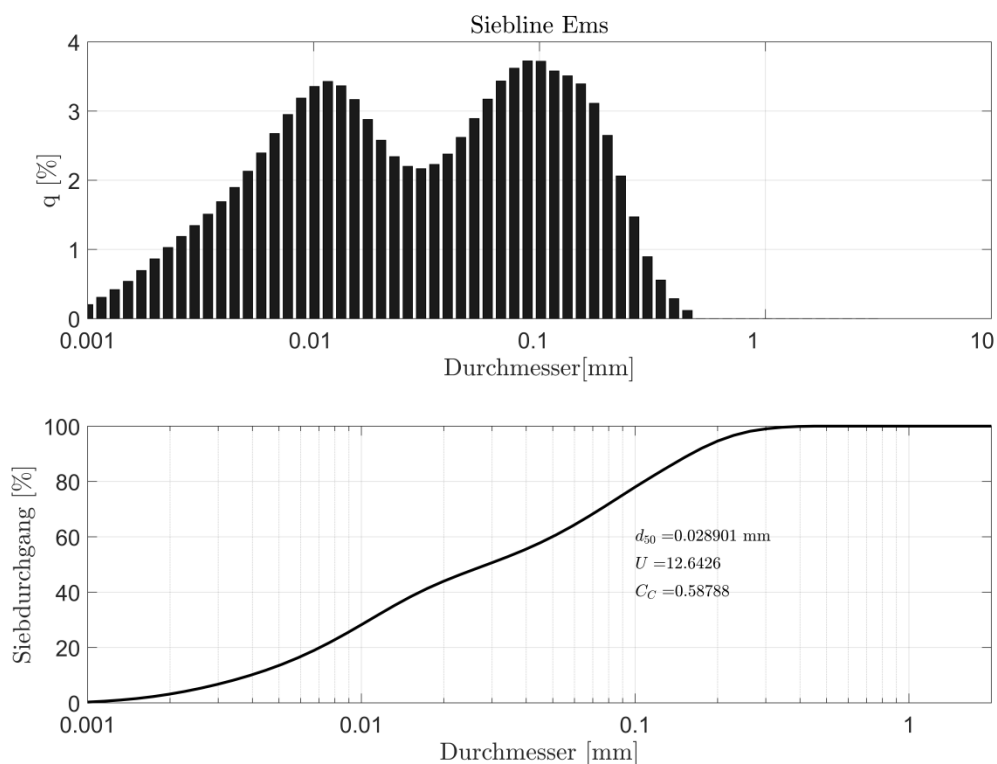


Abbildung 20: Sieblinie zur Darstellung der Korngrößenverteilung der Ems. Quelle: Quelle: Eigene Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen mit dem Particle Sizer der Firma Horiba

Die Durchmesser der Sedimentkörner der Ems liegen im ähnlichen Bereich wie die des Eixendorfer Stausees (Abbildung 20). Dem Bereich zwischen 0,006 mm bis 0,03 mm können die Primärpartikel zugeordnet werden. Im Gegensatz dazu liegen die Sekundärpartikel der Ems zwischen 0,07 mm und 0,4 mm.

Betrachtet man die Ungleichförmigkeitszahl mit  $U = 12,64$  und die Krümmungszahl mit  $C_c = 0,59$ , kann auch die Sieblinie der Ems als "intermittierend gestuft" eingeordnet werden.

### 4.3 Überprüfung der Bedingungen der Rayleigh - Streuung

Wie in Kapitel 2 bereits erwähnt, beruht das Prinzip der Messsonde auf der Rayleigh - Streuung. Für dessen Anwendung muss nach *Decrop et. al (2015)* folgende Bedingung erfüllt sein:

$$k_w r < 1 \quad (19)$$

mit

$$k_w = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (20)$$

Die Wellenlänge  $\lambda$  ist das Produkt der Senderfrequenz  $f$  (10 MHz) und der Schallgeschwindigkeit  $c$ . Da  $c$  temperaturabhängig ist, wurde ein Tabellenwert von 1483 m/s zur Berechnung herangezogen. Gültig ist dieser für eine Wassertemperatur von 20 °C (Kuchling, 2011) Für  $r$  wurde  $\frac{d_{50}}{2}$  der jeweiligen Gewässer eingesetzt. Im einzelnen haben sich die in der Tabelle 3 ersichtlichen Werte ergeben. Wie in der Tabelle deutlich wird, erfüllte jede Messung die Bedingungen der Rayleigh - Streuung.

*Tabelle 3: Ergebnisse der Überprüfung, ob die Bedingung für die Rayleigh - Streuung erfüllt ist. Erstellt auf Grundlage des Tabellenwertes für die Schallgeschwindigkeit, der Senderfrequenz von 10 MHz und der aus der Particle Sizer – Auswertung stammenden Zentralwerte.*

	<b>Radius r [mm]</b>	<b><math>k_w r</math> [m<sup>2</sup>/s]</b>	<b>Ist die Bedingung erfüllt?</b>
<b>Altmühlsee</b>	0,05	$2,12 \cdot 10^{-7}$	Ja
<b>Eixendorfer Stausee</b>	0,02	$8,47 \cdot 10^{-8}$	Ja
<b>Ems</b>	0,02	$8,47 \cdot 10^{-8}$	Ja



#### 4.4 Die SNR als Funktion der Konzentration

Der Versuch wurde mit dem Software - Programm Matlab ausgewertet. Die SNR wurde über 6 Sekunden gemessen und die Signale von den Empfängern erfasst. Alle vier Empfänger sollten in der Theorie die gleichen Messergebnisse empfangen, da unter idealen Bedingungen gemessen wurde. Dennoch kommt es in der Praxis zu geringen Abweichungen zwischen den Empfängern, die auf Abweichungen in der Geometrie zurückzuführen sind. Trotzdem verhalten sich die vier Beams sehr ähnlich, weshalb für weitere Auswertungen deren Mittelwert betrachtet werden kann.

Zur Veranschaulichung wird die Verteilung der Messwerte auf die vier Empfänger am Beispiel der ersten Altmühlsee - Messung dargestellt (siehe Abb. 21 und 22).

Entlang der Abszissenachse wird in logarithmischer Aufteilung die Konzentration  $C$  in g/L aufgeführt. Das Signal - Rausch - Verhältnis wird entlang der Ordinatenachse aufgetragen und in der Einheit Dezibel angegeben.

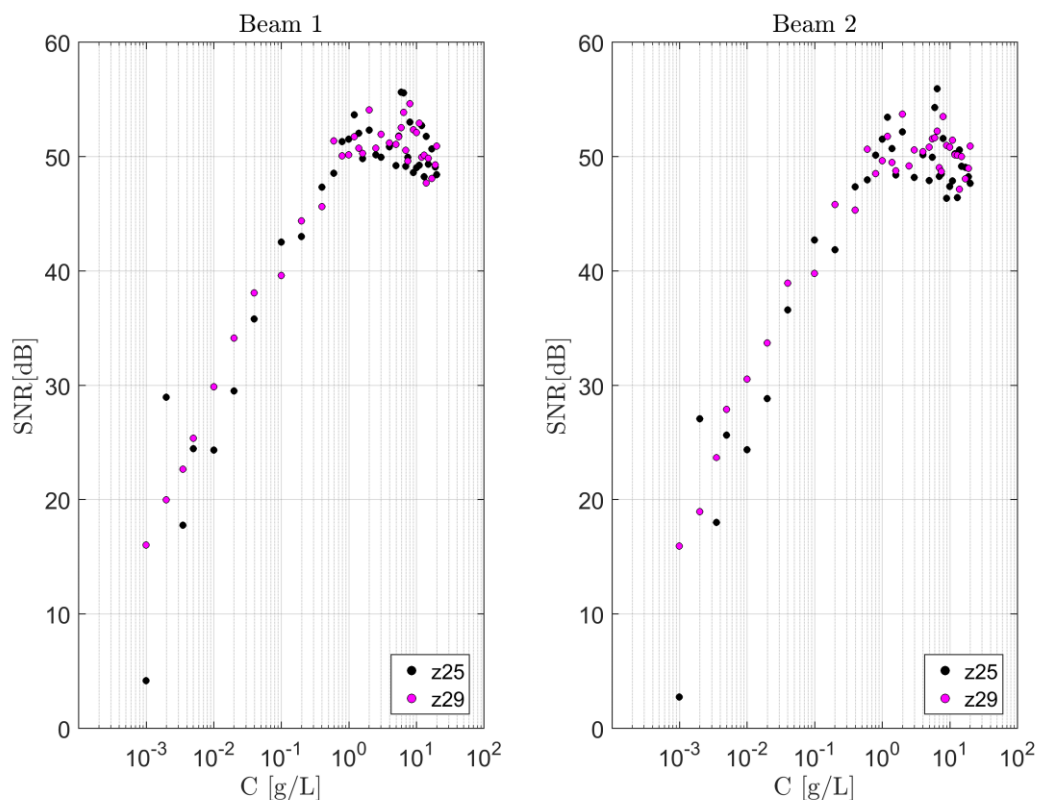


Abbildung 21: Messergebnisse der Empfänger 1 und 2 der ersten Altmühlsee - Messung auf den Höhen  $z_{25}$  und  $z_{29}$ , Quelle: Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Messungen mit dem Vectrino Profiler

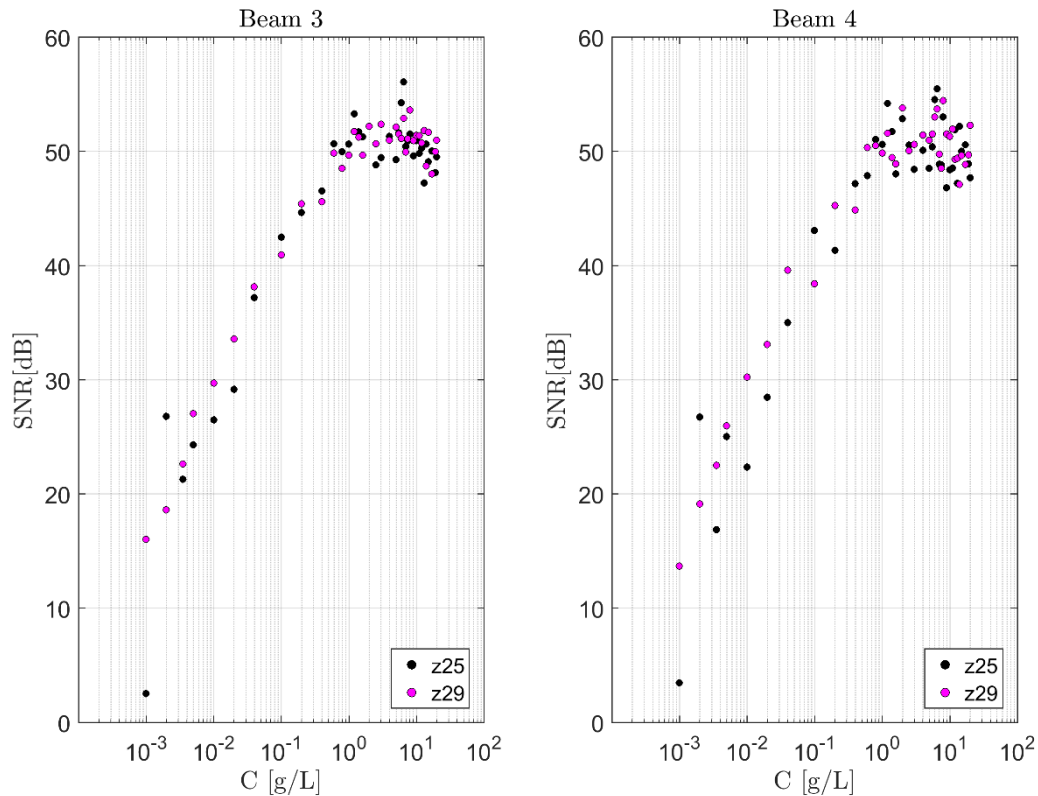


Abbildung 22: Messergebnisse der Empfänger 3 und 4 der ersten Altmühlsee - Messung auf den Höhen z25 und z29, Quelle: Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Messungen mit dem Vectrino Profiler

Es wird deutlich, dass die Messwerte der Beams im gleichen Bereich liegen und kaum Abweichungen auftreten. Bei der Messung wurde eine SNR von bis zu 55 dB erreicht. Außerdem kann den Diagrammen entnommen werden, dass sich die Messwerte beider Höhen ab einer Konzentration von 1 g/L stark bündeln. Aufgrund dessen, kann die Sedimentkonzentration im Bereich zwischen 1 g/L und 20 g/L nur schwer abgelesen werden, da auf einen Konzentrationswert mehrere Werte der Signal - to - Noise - ratio zutreffend sind.

Alle Weiteren Darstellungen der Messwerte pro Empfänger können dem Anhang entnommen werden, da es auch bei den anderen Messungen kaum zu Differenzen zwischen den einzelnen Empfängern kam.

## 4.5 Anpassung der Gleichungs-Parameter an die Sonar – Gleichung

Pro Empfänger wird ein Mittelwert der gemessenen SNR gebildet. Im Anschluss werden die vier Mittelwerte noch einmal gemittelt. Ziel ist es, diesen Mittelwert in einem Diagramm gegen die Sedimentkonzentration aufzutragen. Mit Hilfe der Sonar - Theorie, kann im nächsten Schritt der Auswertung eine Kurve an die gemessenen Werte angelegt werden

### 4.5.1 Altmühlsee

Dargestellt werden sowohl die erste, als auch die zweite Messung der Altmühlsee - Proben. Bei der ersten Messung (Abbildung 23), wurde bis zu einer Konzentration von 20 g/L gemessen. Im Vergleich dazu, wurde während der zweiten Messung (Abbildung 24) die gesamte Probe des Altmühlsees aufgebraucht. Erreicht wurde hierbei eine Konzentration von 85 g/L.

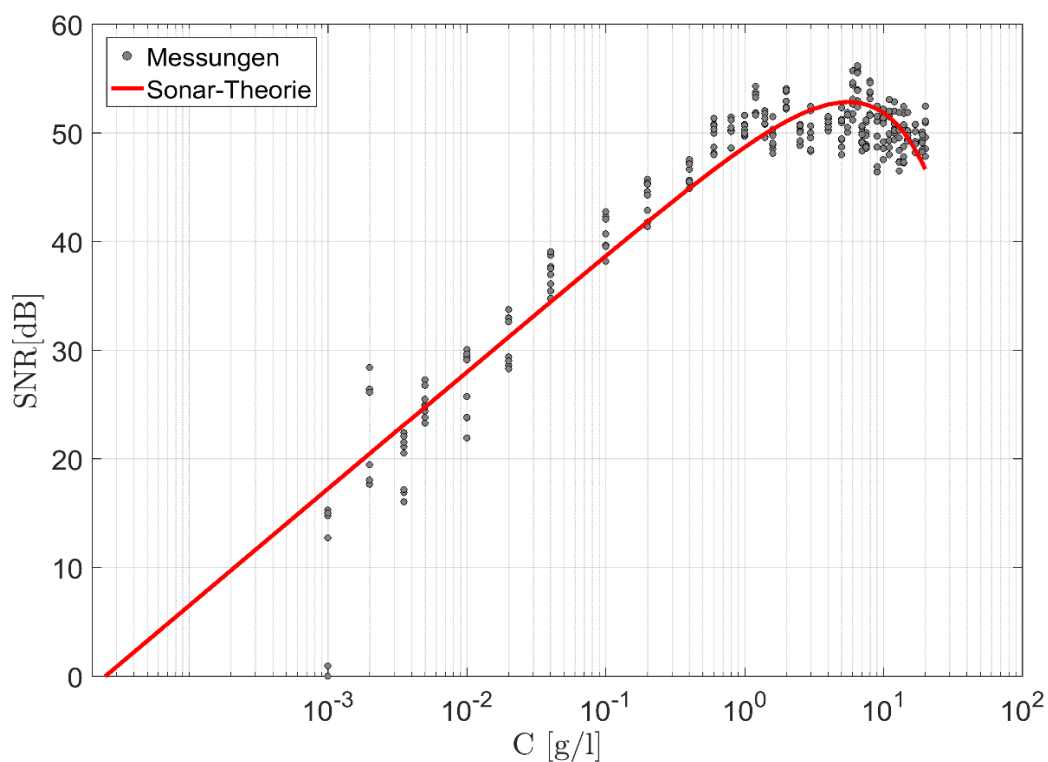


Abbildung 23: Auswertung der ersten Altmühlsee - Messung durch die Sonar – Theorie, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vetrino Profilers

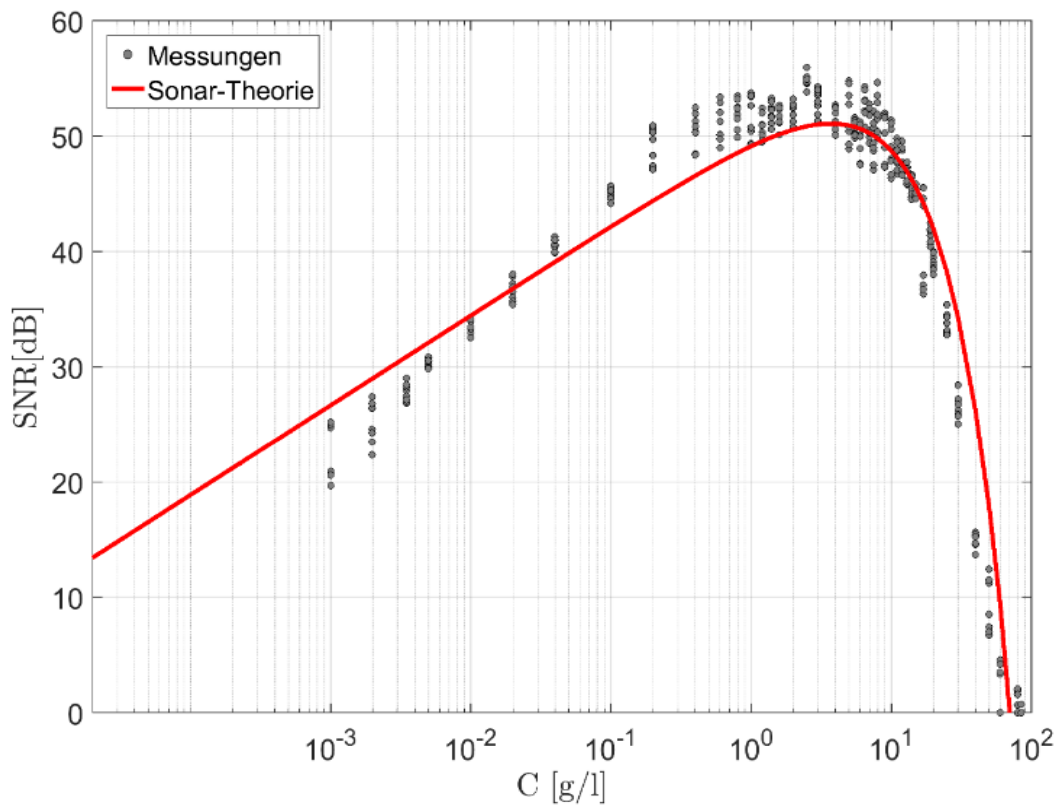


Abbildung 24: Auswertung der zweiten Altmühlsee - Messung durch die Sonar - Theorie,  
 Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers

#### 4.5.2 Eixendorfer Stausee

Wie auch beim Altmühlsee, wurde das vorhandene Sediment des Eixendorfer Stausees im Rahmen des zweiten Messdurchlaufes aufgebraucht. Demzufolge wird nur das Diagramm der zweiten Messung aufgeführt (Abbildung 25).

Da weniger Sediment aus dem Stausee als aus dem Altmühlsee entnommen wurde, konnte lediglich eine Konzentration von 40 g/L erreicht werden. Die Abbildung der ersten Messung kann dem Anhang entnommen werden.

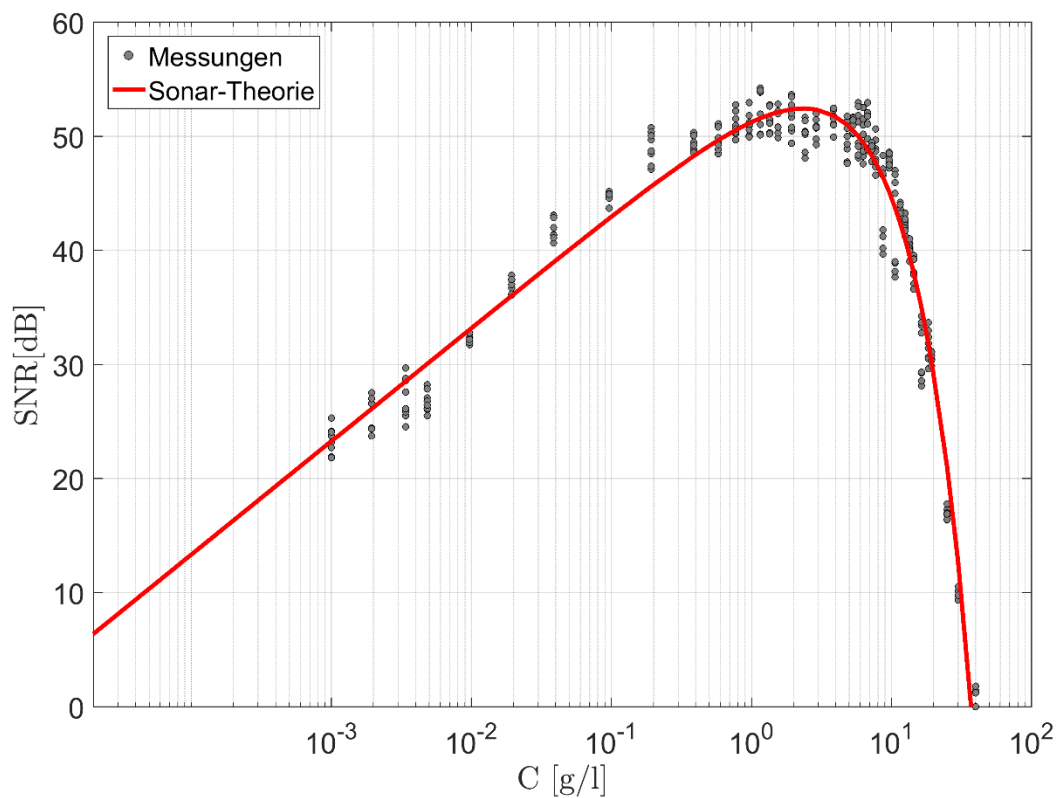


Abbildung 25: Auswertung der zweiten Messung der Eixendorfer Stauesees durch die Sonar - Theorie, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers

### 4.5.3 Ems

Die Ems - Messungen unterscheiden sich zu den Messungen vom Altmühlsee und Eixendorfer Stausee, da hier Sediment aus verschiedenen Jahren beprobt wurde. Bei beiden Messungen wurde ein Sedimentgemisch erstellt, welches eine Partikelkonzentration von 40 g/L enthält. Das abgebildete Diagramm (Abb. 26) stellt die Messung des Sedimentes aus dem Jahr 2015 dar.

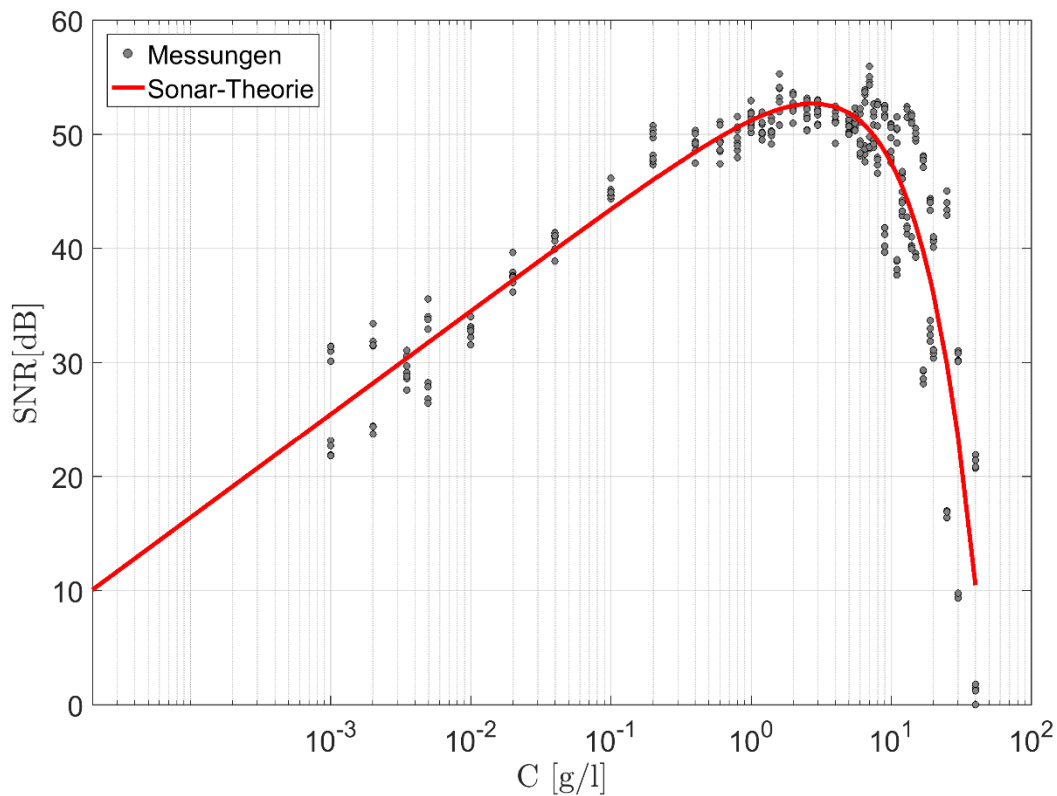


Abbildung 26: Auswertung der Ems 2015 - Messung durch die Sonar - Theorie , Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers

Des Weiteren wurde eine Messung mit Sediment aus dem Jahr 2012 durchgeführt. Das zugehörige Diagramm wird dem Anhang beigelegt.

## 4.6 Parameter der Sonar - Theorie

Durch Umstellung der Formel (7), kann die Signal - to - Noise - ratio folgendermaßen beschreiben werden:

$$SNR = \frac{10}{\pi_1} (\log_{10}(A C) - 4 \log_{10} R) + \frac{C_{ADV}}{10} - \frac{1}{5} R \alpha_\omega - \frac{2R}{10} \alpha_\rho \quad (21)$$

mit

$$\alpha_\rho = \underbrace{\left( \frac{k_\omega^4 r^3}{96 \rho_s} + \frac{k_\omega s (\Delta \rho - 1)^2}{2 \rho_s (s^2 + (\Delta \rho + \delta))} \right)}_{U_r} \frac{20}{\ln 10} C \quad (22)$$

und

$$s = \frac{9}{2\beta r} \left( 1 + \frac{2}{\beta r} \right) \quad (23)$$

und

$$\delta = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{9}{\beta r} \right) \quad (24)$$

und

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi F}{v_m}} \quad (25)$$

Wie der Formel 21 bzw. 22 entnommen werden kann, liegen drei Unbekannte:  $\Pi_1$ ,  $C_{ADV}$  und  $U_{r_{sonar}}$  vor.

$\Pi_1$  ist ein Transformationskoeffizient der SNR. Da dieser Wert dimensionslos ist, wird keine Einheit angegeben.  $C_{ADV}$  wird in dB gemessen.

Der Urlick - Koeffizient ( $Ur_{sonar}$ ) ist eine Materialkonstante, welche sowohl vom Sediment, als auch vom jeweiligen Messgerät abhängt. Angegeben wird  $Ur_{sonar}$  in  $m^3 / (m * kg)$ . Mit Hilfe der Formel (26) kann der Wert ermittelt werden.

$$Ur_{sonar} = \left( \frac{k_w^4 r^3}{96\rho_s} + \frac{k_w s (\Delta\rho - 1)^2}{2\rho_s (s^2 + (\Delta\rho + \delta))} \right) \frac{20}{\ln(10)} \quad (26)$$

mit

$$s = \frac{9}{2\beta r} \left( 1 + \frac{2}{\beta r} \right) \quad (27)$$

und

$$\delta = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{9}{\beta r} \right) \quad (28)$$

und

$$\beta = \sqrt{\frac{\pi F}{v_m}} \quad (29)$$

Diese Parameter können durch das „Fitting“ der Gleichung 21 in das jeweilige Diagramm bestimmt werden. In Tabelle 4 werden die Parameter der einzelnen Messungen dargestellt. Es wird deutlich, dass vor allem die  $C_{ADV}$  - Werte deutlichen Schwankungen unterliegen.



## Ergebnisse

Tabelle 4: Ergebnisse der Parameter der Sonar - Theorie. Erstellt auf Grundlage der Messwerte des Vectrino Profilers und der Sonar - Theorie.

	$\Pi_1$	$Ur_{sonar}$ [ $m^3/(m * kg)$ ]	$C_{ADV}$ [dB]
<b>Altmühlsee 1. Messung</b>	0,930	1,707	$7,237 \cdot 10^{-9}$
<b>Altmühlsee 2. Messung</b>	1,284	3,295	14,694
<b>Eixendorfer Stausee 1. Messung</b>	1,070	5,524	3,314
<b>Eixendorfer Stausee 2. Messung</b>	1,007	4,883	4,927
<b>Ems 2012</b>	1,441	4,602	1,563
<b>Ems 2015</b>	1,104	2,327	16,829

## **5 Diskussion**

### **5.1 Diskussion der Ergebnisse**

Die Messungen aller verwendeten Geräte liefern sinnvolle Ergebnisse. Die Korndichten können mittels Pyknometer eindeutig bestimmt werden. Es wurde bereits erwähnt, dass die gemessenen Dichten keinen gängigen Literaturwerten zugeordnet werden können. So ist keine eindeutige Einordnung der Sedimente möglich. Die gemessenen Dichten liefern niedrigere Ergebnisse als die in der Literatur angegebenen Werte. Deshalb liegt die Vermutung nahe, dass es sich bei den entnommenen Proben um Sedimente mit hohen organischen Anteilen handelt (Bachmann, 2014). Für eine genauere Bestimmung müsste der Glühverlust bestimmt werden. Dies wurde im Rahmen der Bachelorarbeit nicht gemacht.

Auch die Anwendung des Particle Sizers ist einfach und liefert schnelle Ergebnisse. Wie in den Abbildungen 18, 19 und 20 deutlich zu erkennen ist, bilden sich innerhalb jeder Messung Sekundärpartikel. Diese können das Messergebnis eventuell verfälschen. Aus diesem Grund ist ein kräftiges Durchmischen der Partikel erforderlich um die Klumpenbildung zu unterbinden oder gegebenenfalls bereits entstandene Klumpen wieder in die einzelnen Partikel aufzulösen.

Darüber hinaus fällt auch die Betrachtung der Messergebnisse der Sonde durchweg positiv aus. Wie den Diagrammen zu entnehmen ist, werden an allen vier Empfängern der Sonde nahezu gleiche Messergebnisse aufgezeichnet. Dies gilt sowohl für die Höhe z25, als auch für die Höhe z29. Somit kann neben der Funktionsfähigkeit der ADV - Sonde, auch eine gute Durchmischung des Gemenges, sichergestellt werden.

Durch das Anpassen der Parameter entsteht ein Modell zur Bestimmung der Konzentration. In den oben aufgeführten Abbildungen (Nr. 23 - 26) ist klar zu erkennen, dass die Kurven ab einer bestimmten Konzentration den Scheitelpunkt überwinden und abfallen. Durch das Abfallen können die Konzentrationen nicht mehr eindeutig aus dem Diagramm abgelesen werden, da für einen SNR - Wert zwei Konzentrationswerte in Frage kommen. Getrennt werden die beiden Werte durch den Scheitelpunkt der Kurve in zwei Bereiche. Durch ein weiteres Messgerät wäre es möglich, die Partikelkonzentration im Wasser zu bestimmen. Ausgehend davon, könnte nun der betroffene Bereich vor bzw. nach dem Scheitelpunkt zugeteilt werden.

Würde nun nur einer der Bereiche betrachtet werden, könnte die SNR exakt einer Sedimentkonzentration zugeordnet werden.

## 5.2 Auswertung mit dem Tangens hyperbolicus

Neben der Sonar - Theorie gibt es ein weiteres Modell, das zur Auswertung herangezogen wurde. Dieses Modell wird derzeit am Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr untersucht. Verwendet wurde hier der Tangens hyperbolicus, welcher die SNR als eine Funktion der Konzentration darstellt.

$$SNR = \phi_A(1 + \tanh(\phi_C \log_{10}(C) + \phi_D)) \quad (30)$$

Der Parameter  $\phi_A$  ist von der Sonde abhängig, da damit der SNR - Bereich beschrieben wird. Wohingegen die Parameter  $\phi_C$  und  $\phi_D$  den Einfluss der Streuung an den Partikel präsentieren. Wie auch für die Sonar - Theorie, wurden die einzelnen Parameter für jede Messung bestimmt. Diese werden in Tabelle 5 dargestellt.

*Tabelle 5: Ergebnisse der Parameter nach dem Tangens hyperbolicus Ansatz. Erstellt auf Grundlage der Messwerte des Vectrino Profilers und der Sonar - Theorie.*

	$\phi_A$	$\phi_C$	$\phi_D$
<b>Altmühlsee 1. Messung</b>	25,901	0,67802	1,4418
<b>Altmühlsee 2. Messung</b>	21,098	1,0364	3,003
<b>Eixendorfer Stausee 1. Messung</b>	23,931	0,78544	2,2149
<b>Eixendorfer Stausee 2. Messung</b>	21,534	0,96049	2,7413
<b>Ems 2012</b>	24,709	0,63602	2,0892
<b>Ems 2015</b>	22,830	0,79892	2,3556

Wie die folgende Abbildung 27 der ersten Altmühlsee - Messung zeigt, kann sich auch die Kurve des Tangens - hyperbolicus - Ansatzes (tanh) gut an die Messergebnisse der ersten Altmühlsee - Messung anpassen.

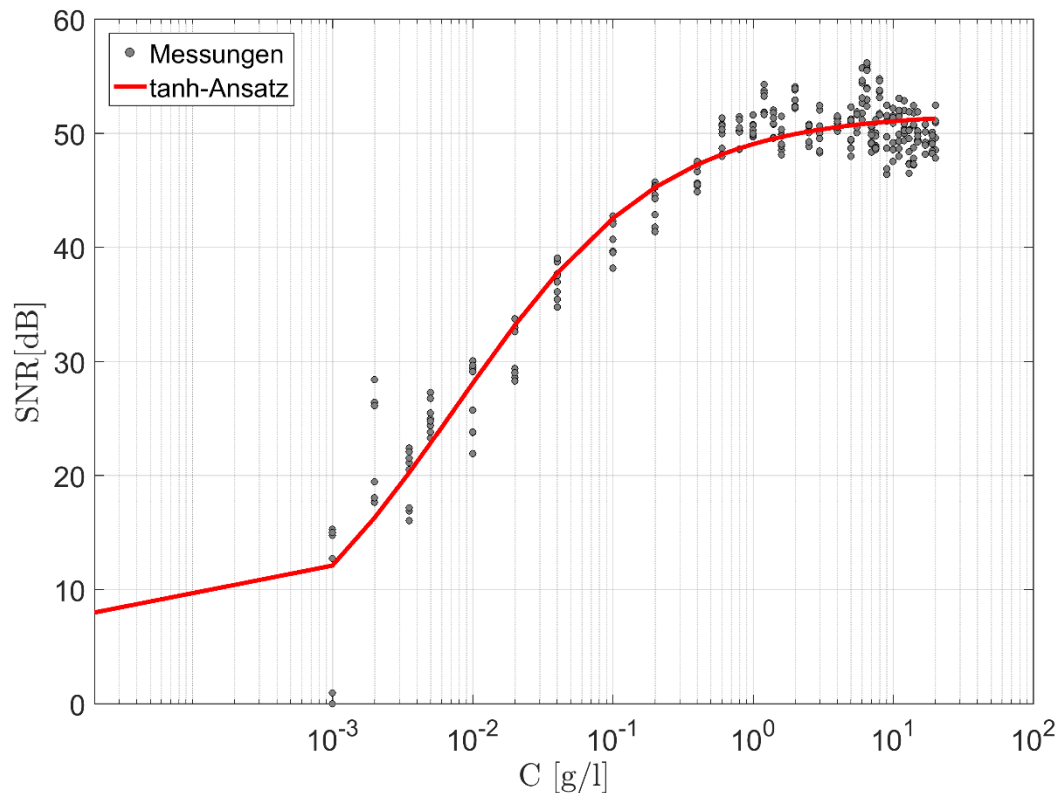


Abbildung 27: Auswertung der ersten Altmühlsee - Messung mit dem tanh - Ansatz, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vetrino Profilers

Deutlich wird hier, dass die Kurve nicht abfällt, sondern am Maximum der SNR - Werte aufhört. In diesem Fall ist es durchaus möglich, den tanh - Ansatz zur Auswertung zu wählen.

Wie die Diagramme der Auswertung nach der Sonar - Theorie verdeutlichen, fällt jede weitere Kurve im Bereich höherer Konzentrationen ab. Deshalb ist die Anwendbarkeit des tanh - Ansatzes zur Auswertung der ersten Altmühlsee - Messung als Ausnahme einzuordnen.

Wird nun die zweite Altmühlsee - Messung betrachtet, verläuft die Kurve wie vermutet anders, da die Signal - to - Noise - ratio im Bereich höherer Konzentrationen abfällt.

Folglich müsste die Kurve, wie bereits erwähnt, in diesem Bereich abfallen, um die gemessenen Werte abzubilden. Allerdings bleibt die Kurve durch die Anwendung des Tangens hyperbolicus - Ansatzes konstant und fällt nicht, wie gewünscht, ab (Abbildung 28).

Unter diesen Bedingungen weist die Kurve enorme Abweichungen zu den Messwerten auf. Ziel ist es jedoch, die Abweichungen so gering wie möglich zu halten.

Wie bereits in Abbildung 24 deutlich wurde, werden die Messwerte durch die Sonar - Theorie deutlich besser abgebildet. Infolgedessen kommt es zu bedeutend geringeren Abweichungen.

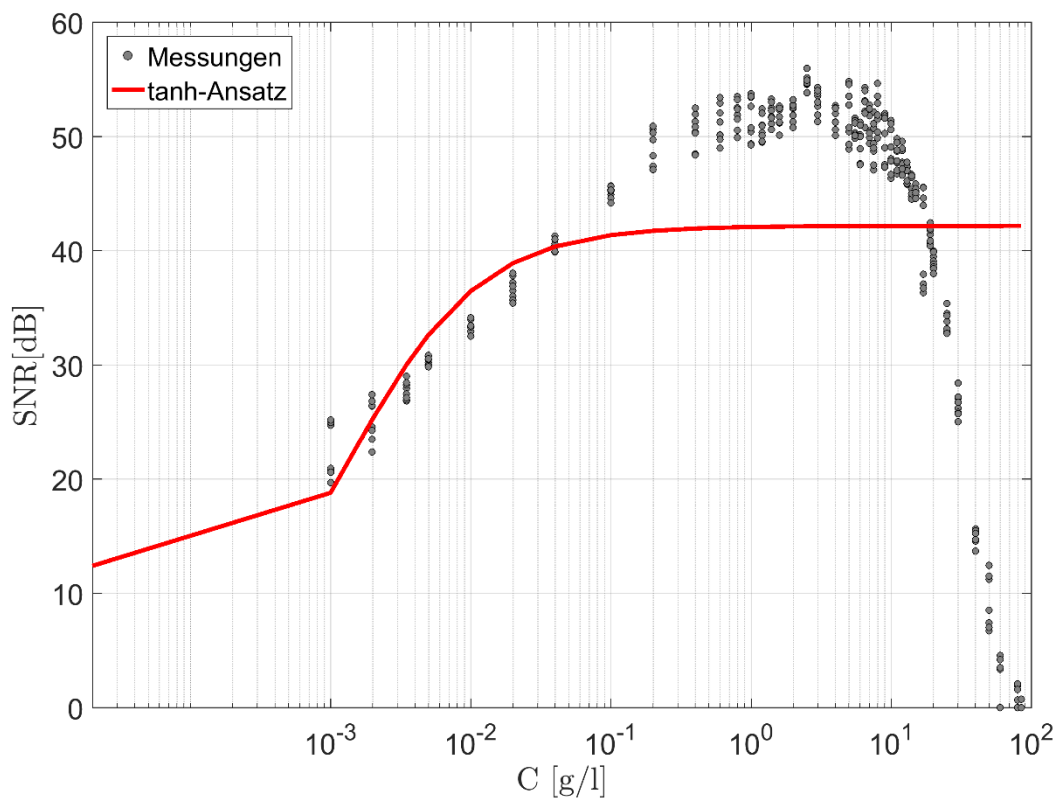


Abbildung 28: Auswertung der zweiten Altmühlsee - Messung durch den tanh - Ansatz, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vetrino Profilers

Um die Unterschiedlichkeit der Kurvenverläufe der Sonar - Theorie bzw. des tanh - Ansatzes zu verdeutlichen, werden die beiden Auswertungskurven im anschließenden Diagramm aufgeführt.

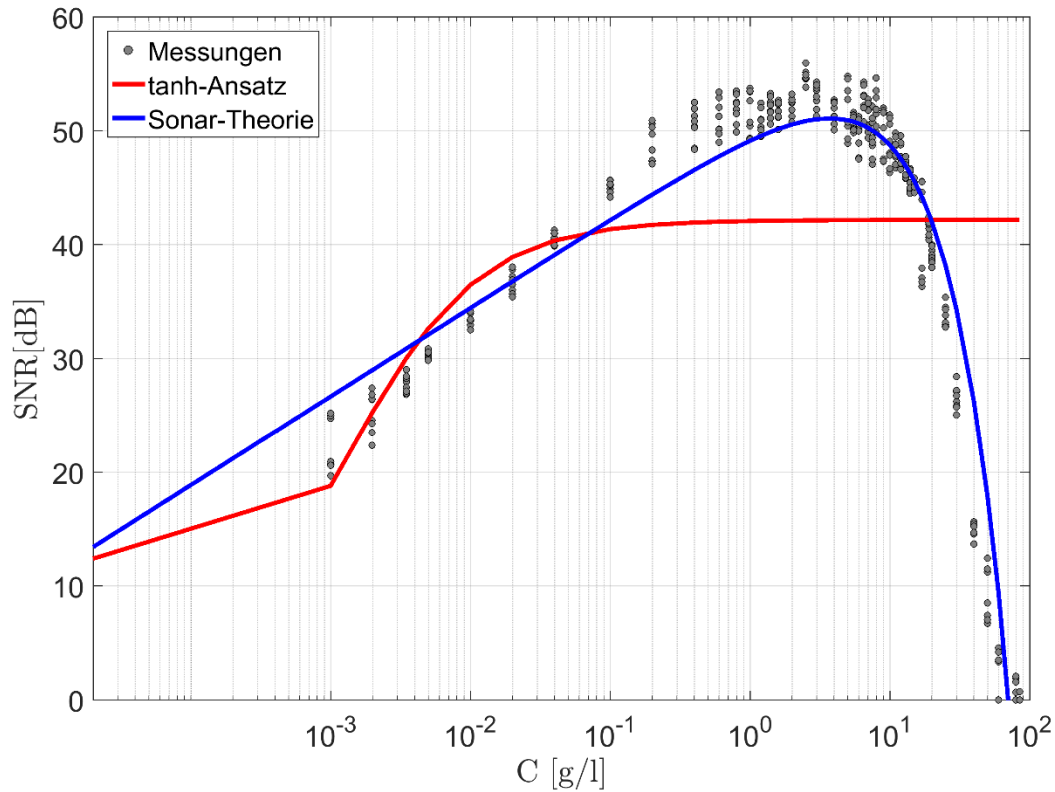


Abbildung 29: Gegenüberstellung der Kurven des tanh - Ansatzes und der Sonar - Theorie der zweiten Altmühlsee - Messung, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers

Der in Graphik 29 dargestellte Altmühlsee ist ein Süßwasser - Gewässer. Um einen Einfluss von Süß - bzw. Salzwasser ausschließen zu können, wird vergleichsweise die Ems betrachtet. Da sowohl bei der ersten, als auch bei der zweiten Messung eine Konzentration von 40 g/L erreicht wurde, wird sich auf die Ergebnisse des Sedimentes aus dem Jahr 2015 beschränkt.

Die Ergebnisse aller weiteren Auswertungen der Ems nach dem Ansatz des Tangens hyperbolicus werden im Anhang aufgeführt.

Durch das Einfügen der Kurve nach der Sonar - Theorie, wie es im folgenden Diagramm (Abbildung 30) ersichtlich ist, wird auch bei der Auswertung der Ems deutlich, dass sich diese im Vergleich zur Kurve des tanh - Ansatzes besser anpasst und es nur, wie angestrebt, zu sehr geringen Abweichungen kommt.

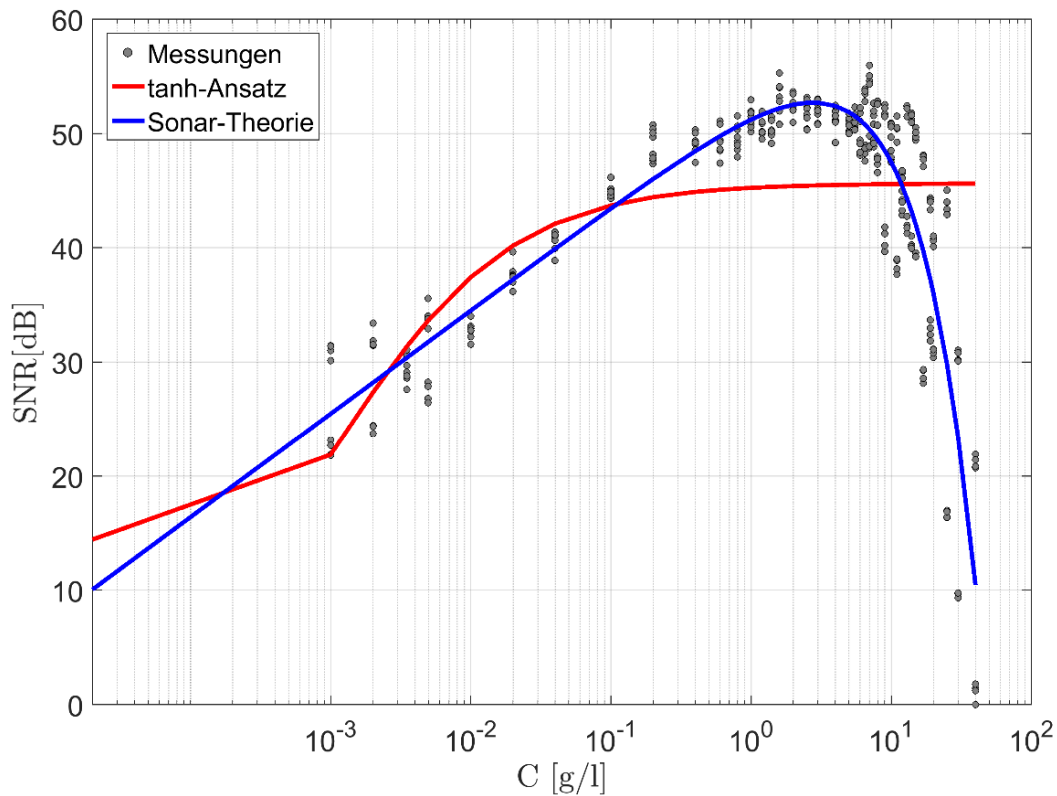


Abbildung 30: Gegenüberstellung der Kurve des tanh - Ansatzes und der Sonar - Theorie der Ems 2015 - Messung, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vetrino Profilers

Auch bei der Betrachtung der weiteren Gewässer und Messungen verlaufen die Kurven ähnlich. Die Kurven der Sonar - Theorie geben die gemessenen Werte ohne nennenswerte Differenzen wieder. Im Gegensatz dazu, kann der tanh - Ansatz nur bei der ersten Altmühlsee - Messung angewandt werden. Aus diesem Grund ist dieser Ansatz zur Auswertung nicht zu empfehlen.

### 5.3 Vergleich der verschiedenen Materialien

Wie in der Einleitung bereits erläutert, wurden die für die Auswertung relevanten Zusammenhänge im Rahmen einer Doktorarbeit entwickelt. Im Gegensatz zu den Messungen der Bachelorarbeit, die in einem Kunststoffzylinder durchgeführt wurden, kam für die Messungen der Doktorarbeit die gesamte Rinne zum Einsatz, auf welcher der Messwagen angebracht ist. Des Weiteren wurde auch erwähnt, dass es sich bei dem verwendeten Material um Quarzmehl handelt.

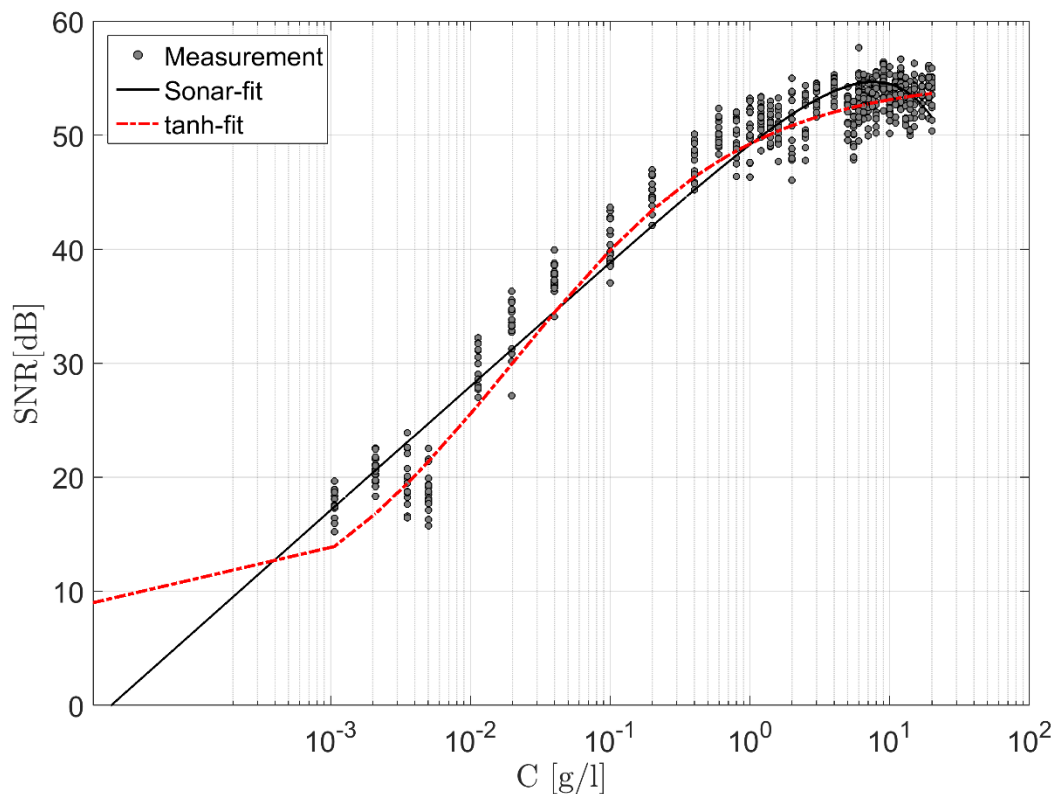


Abbildung 31: Messergebnisse der Quarzmehl - Untersuchung, Quelle: Oliver Chmiel, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München

Die Kurve des Tangens hyperbolicus (Abbildung 31) passt sich den Quarzmehl - Messwerten gut an. Da die Kurve nicht abfällt, können die Werte eindeutig zugeordnet und abgelesen werden. Verglichen mit den Kurvenverläufen der Ems (Abb. 30), und der zweiten Altmühlsee - Messung (Abb. 28), wäre es denkbar, den tanh - Ansatz hier anzuwenden, da nur bis zu einer Konzentration bis zu 20 g/L gemessen wurde.



Auch durch die Kurve, welche mit Hilfe der Sonar - Theorie erstellt wurde, werden die Messwerte repräsentiert. Da sich bei der Messung auf geringe Quarzmehlkonzentrationen beschränkt wurde, fällt die Kurve nur in einem kleinen Bereich ab. Aufgrund dessen, kommt es kaum zu einer Überschneidung der zugeordneten Werte.

Die Sonar - Theorie bietet eine zuverlässige Möglichkeit, die Messergebnisse auszuwerten. Deutlich wird dies an den Diagrammen, die in Kapitel 4.4 aufgeführt sind.

Da für jede Messung die Parameter der Sonar - Theorie bestimmt wurden, können auch diese mit den Ergebnissen der Quarzmehl - Auswertung verglichen werden. Die Ergebnisse aller Materialien sind der Tabelle 6 zu entnehmen.

*Tabelle 6: Parameter der Sonar - Theorie aller Messungen im Vergleich zu den Ergebnissen der Quarzmehl - Untersuchung. Erstellt auf Grundlage der Messwerte des Vectrino Profilers und des Tangen - hyperbolicus - Ansatzes.*

	$\Pi_1$	$U_{r_{sonar}}$ [m <sup>3</sup> /(m kg)]	$C_{ADV}$ [dB]
<b>Altmühlsee 1. Messung</b>	0,930	1,707	7,237 10 <sup>-9</sup>
<b>Altmühlsee 2. Messung</b>	1,284	3,295	14,694
<b>Eixendorfer Stausee 1. Messung</b>	1,070	5,524	3,314
<b>Eixendorfer Stausee 2. Messung</b>	1,007	4,883	4,927
<b>Ems 2012</b>	1,441	4,602	1,563
<b>Ems 2015</b>	1,104	2,327	16,829
<b>Qarzmehl – Messung</b>	0,918	5,685	1,180

Die gemessenen Werte des Quarzmehls liegen im Bereich der Werte, die während der Bachelorarbeit bestimmt wurden. Die Werte für  $\Pi_1$  liegen im Bereich zwischen 0,9 und 1,4. Der niedrigste Wert kann mit 0,918 der Quarzmehl - Untersuchung zugeordnet werden, während der höchste Wert mit 1,441 aus der Ems 2012 - Messung stammt. Der Transformationskoeffizient der Signal - to - Noise - ratio unterliegt, verglichen mit den anderen Parametern, keinen großen Abweichungen.

Die Ergebnisse des Materialparameters  $Ur_{sonar}$  weisen deutlichen Schwankungen zwischen  $1,7 \text{ m}^3/(m * kg)$  und  $5,7 \text{ m}^3/(m * kg)$  auf. Im Gegensatz zu den Werten für  $\Pi_1$ , ist die Quarzmehl - Messung im oberen Bereich der Werte einzuordnen. Der niedrigste Wert ( $Ur_{sonar} = 1,707 \text{ m}^3/(m * kg)$ ) kann auch hier der ersten Altmühlsee - Messung zugeordnet werden.

Auffällig ist, dass auch der Wert für  $C_{ADV}$  der ersten Altmühlsee - Untersuchung deutlich unter den restlichen Ergebnissen liegt. Die Werte für  $C_{ADV}$  unterliegen mit Abstand den größten Schwankungen, im Bereich von  $7,2 \cdot 10^{-9} \text{ dB}$  bis  $16,8 \text{ dB}$ . Der Parameter der Quarzmehl - Messung reiht sich hier mit  $1,180 \text{ dB}$  im unteren Bereich der Ergebnisse ein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass besonders die erste Messung der Altmühlsee - Proben, auf Grund der niedrigen Werte ins Auge sticht. Des Weiteren fällt auf, dass die  $C_{ADV}$  - Werte, wie bereits in Kapitel 4.5 erwähnt, erheblichen Abweichungen unterliegen. Ursachen hierfür sind nicht bekannt.

### 5.4 Mögliche Fehlerquellen

Da der Versuch im Labor durchgeführt wurde, konnte unter idealen Bedingungen gemessen werden. Zusätzlich wurde auch das entnommene Sediment aufbereitet. Dies kann zu erheblichen Abweichungen bei Messungen in der Praxis führen.

Doch auch im Labor sind einige Fehlerquellen zu beachten, die das Messergebnis verfälschen können. Wie bereits erwähnt, bildeten sich bei der Anwendung des Particle Sizers Sekundärpartikel. Der daraus resultierende Median kann also durch die Flockenbildung einen größeren Wert annehmen.

Um eine Verklumpung der einzelnen Partikel im Particle Sizer zu verhindern, könnte beispielsweise die Umdrehungszahl des angebrachten Rührers erhöht werden. Hierdurch kann sowohl eine bessere Durchmischung garantiert, als auch der Zusammenschluss des Materials verhindert werden.

Zudem wäre es ebenso denkbar, neben dem Median auch weitere Durchmesser, wie zum Beispiel  $d_{30}$  und  $d_{60}$ , in die Betrachtung mit einzubeziehen um ein genaueres Ergebnis zu erhalten.

Auch nach der Aufbereitung der Sedimente können, beispielsweise durch das Abwiegen der Konzentrationszugaben, Ungenauigkeiten auftreten. Obwohl eine Präzisionswaage verwendet wurde, kann diese die Partikel lediglich auf drei Nachkommastellen genau abwiegen. Zu beachten ist auch, dass die natürliche Korngröße durch die Aufbereitung verändert und das Material durch den Backenbrecher verformt werden kann. Demnach ist es möglich, dass die im Versuch verwendeten Partikel nicht den im Gewässer vorkommenden Sedimenten entsprechen.

Des Weiteren kommt es durch die Zugabe des Sedimentes in den Messzylinder auch zu Übertragsverlusten. Dies liegt daran, dass beim Umfüllen stets Sedimentrückstände am Einwaagegefäß haften bleiben und nicht dem Sediment - Wasser - Gemisch zugeführt werden, jedoch in die Berechnung der jeweiligen Konzentration mit einfließen. Da die Partikel eine Größe von  $< 0,25$  mm besitzen, kommt es bei der Zugabe von Sediment zu einer leichten Staubaufwirbelung. Auch dies führt zu geringen Sedimentverlusten.

Werden die Messungen in der Praxis durchgeführt, ist die Inhomogenität des Sediments zu beachten. Da dieses nicht aufbereitet wird, ist damit zu rechnen, dass sich Klumpen in unterschiedlichen Größen bilden können. Aufgrund dessen beschleunigt sich auch die Sinkgeschwindigkeit der Partikel.

Zudem werden die Turbulenzen im Wasser, im Gegensatz zu den Messungen im Labor, nicht durch einen Rührer konstant gehalten. Dadurch können auch strömungsberuhigte Bereiche entstehen.

Weiterhin ist zu beachten, dass für jedes Gewässer eine eigene Kalibrierkurve erstellt werden muss. Diese ist zudem auch abhängig vom verwendeten Messgerät.

### 6 Zusammenfassung

Viele Gewässer leiden unter Verlandungsproblemen. Aufgrund der Sedimentanhäufung werden das natürliche Abflussregime oder technische Bauwerke beeinflusst. Durch die Ablagerung der Partikel wird der Retentionsraum, der bei Hochwasser katastrophale Ausuferungen und Schäden vermeiden soll, deutlich verkleinert. Welche Auswirkungen damit einhergehen konnte in der Vergangenheit mehrfach den Medien entnommen werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, rechtzeitige Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Da der Markt momentan kein Messgerät zur Verfügung stellt, mit dem neben der Geschwindigkeit und den Turbulenzen auch die Sedimentkonzentration in der Wassersäule messbar ist, wurde im Rahmen einer Doktorarbeit ein Zusammenhang zwischen dem messbaren Signal - Rausch - Verhältnis und der Sedimentkonzentration hergestellt. Dies ist mit Hilfe der Sonar - Theorie möglich. Verwendet wurde für diese Untersuchungen Quarzmehl. Als Messgerät wurde eine ADV - Sonde gewählt. Zur Messung wurde ein Sediment - Wasser - Gemisch angesetzt und die Sedimentkonzentration Stück für Stück erhöht. Gemessen wurde jeweils auf zwei verschiedenen Höhen innerhalb der Wassersäule.

Ziel der Bachelorarbeit war es, die Anwendbarkeit anhand natürlicher Sedimente aus unterschiedlichen Gewässern zu überprüfen. Durchgeführt wurde der Versuch mittels Sedimentproben aus dem Altmühlsee und dem Eixendorfer Stausee. Zusätzlich wurde die Ems beprobt, welche im Vergleich zu den anderen beiden Gewässern Salzwasser führt. Die gemessene SNR wurde in einem Diagramm gegen die Sedimentkonzentration aufgetragen. Anschließend wurden die einzelnen Parameter angepasst. Anhand dieser kann die im Gewässer vorhandene Sedimentkonzentration abgelesen und modelliert werden, da die Signal - to - Noise - ratio durch die Messung der Sonde bekannt ist.

Die Auswertung durch die Sonar - Theorie funktioniert sehr gut. Für die Anwendung in der Praxis muss jedoch für jedes Gewässer eine Kalibrierkurve erstellt werden. Dennoch ist auffällig, dass die Werte der erstellten Kurven, trotz Unterscheidung in Küsten - und Binnengewässer, sehr ähnliche Werte aufweisen. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Methode universal einsetzbar ist.

## **7 Fazit**

Besonders geeignet ist das Verfahren für langfristige Beobachtungen der Verlandungssituation eines Gewässers. Nach der einmaligen Erstellung der Kalibrierkurve, kann die Sedimentkonzentration beliebig oft abgelesen werden. Hierfür ist lediglich eine Messung der Signal - to - Noise - ratio nötig. So kann eine Verlandung sowohl im Küstenbereich, als auch in Binnengewässern rechtzeitig durch Gegenmaßnahmen verhindert werden.

Zur Auswertung der Messwerte bietet sich die Sonar - Theorie an. Neben dieser wurde auch die Auswertung mit Hilfe des Tangens hyperbolicus durchgeführt. Da sich die Kurve nur im Bereich geringer Konzentrationen an die im Diagramm aufgeführten Messwerte anpasst, ist diese Variante jedoch nicht zu empfehlen.

## 8 Literaturverzeichnis

- Chmiel, O. (2017). *Schlickentnahme Altmühlsee - 29.6.17*. München.
- Clay, M. (1997). *Fundamentals of acoustical oceanography*. Academic Press.
- Daniel Ehrbar, L. S. (2016). *Messung von Sedimentflüssen in perglazialen Stauseen mit Wasserproben, LISST und ADCP*.
- Decrop, B. (2015). New methods for adv measurements of turbulent sediment fluxes-application to a fine sediment plume. *Journal of Hydraulic Research*.
- Douglas A. Skoog, F. J. (2013). *Instrumentelle Analytik*. Springer Spektrum .
- Dr. Hubert Bossek, E. a. (2005). *Duden Mathematik*. Berlin, Mannheim: Bibliographisches Institut & F.A. Brockhaus AG.
- Fritsch, F. (18. April 2018). *Fritsch Mahlen und Messen*. Von [www.fritsch.de](http://www.fritsch.de) zuletzt am 16.06.2018 abgerufen
- H.-P. Blume, G. B.-K.-M. (2010). *Lehrbuch der Bodenkunde*. Heidelberg: Spektrum.
- Helmut Prinz, R. S. (2012). *Ingenieurgeologie*. Springer - Verlag.
- Hoitink A., H. P. (2005). Observations of Suspended Sediment from ADCP and OBS Measurement in a Mud - dominated Environment. *Coastal Engineering*.
- Horiba, F. (2006). *Distribution Analyzer* . Kyoto, Japan.
- Jörg Bachmann, R. H. (2014). *Einführung in die Bodenphysik*. Stuttgart: Schweizerbart.
- Krauß, D. D. (2017). *Skript Seen und Seensanierung*. Ansbach.
- Krauß, D. D. (20. April 2018). *Exkursion Brombachsee*.
- Kuchling, H. (2011). *Taschenbuch der Physik*. München: Carl Hanser Verlag .
- Lerch, R. (2009). *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Springer - Verlag.
- Mardanow, P. (2016). Absenken der Vorsperre am Eixendorfer Stausee sorgt für Empörung - Schlamm spült großen Ärger an.
- Morgenschweis, G. (2010). *Hydrometrie*. Berlin,Heidelberg: Springer - Verlag.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, E. u. (2015). *Vertrag "Masterplan Ems 2050"*.

- Nortek. (keine Jahresangabe möglich). Broschüre Vectrino Profiler .
- NortekUSA. (15. März 2012). Vectrino II - A profiling bi-static acoustic velocimeter. USA.
- Pankratz, F. R. (18. April 2018). *Retsch- Milling,Sieving,Assisting*. Von [www.retsch.de](http://www.retsch.de) zuletzt am 11.06.2018 abgerufen
- Porotec, F. (keine Jahresangabe möglich). *Bedienungsanleitung des Pycnomatic ATC*.
- Pyka, P. D. (2017). *Skript Bodentechnologie 2017/2018*. Triesdorf.
- Reinhard Lerch, G. S. (2009). *Technische Akustik - Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer - Verlag.
- Sequoia Scientific. (2018). *Sequoia - Products and Research for Environmental Science*. Von [www.sequoiasci.com](http://www.sequoiasci.com), zuletzt am 03.08.2018 abgerufen
- Storm, S. a. (2011). Using Velocimeter Signal to Noise Ratio as a Surrogate Measure of Suspended Mud Concentration. *Continental Shelf Reasearch*.
- Szyska, H. (2017). *Projekt des "Masterplan 2050" - Drei Modelle für Tidesteuerung in der Ems entwickelt*.
- Urick, R. (1983). *Principles of underwater sound*. New York: McGraw- Hill Book Company.
- Weingartner, H. (2018). Hochwasser: Der Schlamm muss raus. *Münchner Merkur* .

## 9 Abbilungsverzeichnis

Abbildung 1: Darstellung der Übertragsverluste der ADV - Sonde, Quelle: Oliver Chmiel, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München .....	5
Abbildung 2: Messwagen mit zwei Messsonden (links Vectrino Profiler), Quelle: Eigene Aufnahme .....	8
Abbildung 3: Rührgerät zur Durchmischung des Sediment - Wasser - Gemisches, Quelle: Eigene Aufnahme .....	9
Abbildung 4: Versuchsaufbau mit Messzylinder, Rührer und ADV - Sonde, Quelle: Eigene Aufnahme .....	10
Abbildung 5: Messgerät Vectrino Profiler, Quelle: <a href="http://www.nortekgroup.de">www.nortekgroup.de</a> .....	10
Abbildung 6: Messbereich der Sonde, Quelle: Broschüre Vectrino Profiler .....	11
Abbildung 7: Van - Veen - Bodengreifer, Quelle: Eigene Aufnahme .....	14
Abbildung 8: Probenahmestellen am Altmühlsee, Quelle: Oliver Chmiel, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München .....	14
Abbildung 9: Probenahmestellen am Eixendorfer Stausee, Quelle: Oliver Chmiel, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München .....	15
Abbildung 10: Probenahmestellen an der Ems, Quelle: Oliver Chmiel, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München .....	16
Abbildung 11: Schlickproben vor der Aufbereitung, Quelle: Eigene Aufnahme .....	17
Abbildung 12: Backenbrecher der Firma Retsch, Quelle: Eigene Aufnahme .....	17
Abbildung 13: Sediment nach der Zerkleinerung im Backenbrecher, Quelle: Eigene Aufnahme .....	18
Abbildung 14: Helium - Pyknometer der Fa. Porotec, Quelle: Eigene Aufnahme .....	19
Abbildung 15: Funktionsschema der Laserbeugung im Particle Sizer, Quelle: <a href="http://www.horiba.de">www.horiba.de</a> .....	20
Abbildung 16: Particle Sizer der Fa. Horiba, Quelle: Eigene Aufnahme .....	21
Abbildung 17: Einwiegen der Sedimentzugaben mit der Präzisionswaage der Fa. Sartorius, Quelle: Eigene Aufnahme .....	22
Abbildung 18: Sieblinie zur Darstellung der Korngrößenverteilung aller Altmühlsee – Proben, Quelle: Eigene Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen mit dem Particle Sizer der Firma Horiba.....	26
Abbildung 19: Sieblinie zu Darstellung der Korngrößenverteilung des Eixendorfer Stausees, Quelle: Eigene Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen mit dem Particle Sizer der Firma Horiba.....	27
Abbildung 20: Sieblinie zur Darstellung der Korngrößenverteilung der Ems, Quelle: Quelle: Eigene Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen mit dem Particle Sizer der Firma Horiba .....	28



Abbildung 21: Messergebnisse der Empfänger 1 und 2 der ersten Altmühlsee - Messung auf den Höhen z25 und z29, Quelle: Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Messungen mit dem Vectrino Profiler..... 30

Abbildung 22: Messergebnisse der Empfänger 3 und 4 der ersten Altmühlsee - Messung auf den Höhen z25 und z29, Quelle: Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Messungen mit dem Vectrino Profiler..... 31

Abbildung 23: Auswertung der ersten Altmühlsee - Messung durch die Sonar – Theorie, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers..... 32

Abbildung 24: Auswertung der zweiten Altmühlsee - Messung durch die Sonar - Theorie, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers..... 33

Abbildung 25: Auswertung der zweiten Messung der Eixendorfer Stausees durch die Sonar - Theorie, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers 34

Abbildung 26: Auswertung der Ems 2015 - Messung durch die Sonar - Theorie , Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers ..... 35

Abbildung 27: Auswertung der ersten Altmühlsee - Messung mit dem tanh - Ansatz, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers ..... 41

Abbildung 28: Auswertung der zweiten Altmühlsee - Messung durch den tanh - Ansatz, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers..... 42

Abbildung 29: Gegenüberstellung der Kurven des tanh - Ansatzes und der Sonar - Theorie der zweiten Altmühlsee - Messung, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers..... 43

Abbildung 30: Gegenüberstellung der Kurve des tanh - Ansatzes und der Sonar - Theorie der Ems 2015 - Messung, Quelle: Erstellt nach eigenen Auswertungen der Messwerte des Vectrino Profilers ..... 44

Abbildung 31: Messergebnisse der Quarzmehl - Untersuchung, Quelle: Oliver Chmiel, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr, München ..... 45

## 10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Korndichten der beprobten Gewässer. Eigene Erstellung auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen mit dem Heliumpyknometer (Fa. Porotec). .....	24
Tabelle 2: Einteilung der Sieblinie in die Gruppen „enggestuft“, „weitgestuft“ und „intermittierend gestuft“ anhand der Parameter U und Cc. Bearbeitet nach Pyka (Vorlesungsskript Bodentechnologie,2017). .....	25
Tabelle 3: Ergebnisse der Überprüfung, ob die Bedingung für die Rayleigh - Streuung erfüllt ist. Erstellt auf Grundlage des Tabellenwertes für die Schallgeschwindigkeit, der Senderfrequenz von 10 MHz und der aus der Particle Sizer – Auswertung stammenden Zentralwerte. ....	29
Tabelle 4: Ergebnisse der Parameter der Sonar - Theorie. Erstellt auf Grundlage der Messwerte des Vectrino Profilers und der Sonar - Theorie. ....	38
Tabelle 5: Ergebnisse der Parameter nach dem Tangens hyperbolicus Ansatz. Erstellt auf Grundlage der Messwerte des Vectrino Profilers und der Sonar - Theorie. ....	40
Tabelle 6: Parameter der Sonar - Theorie aller Messungen im Vergleich zu den Ergebnissen der Quarzmehl - Untersuchung. Erstellt auf Grundlage der Messwerte des Vectrino Profilers und des Tangen - hyperbolicus - Ansatzes. ....	46

## 11 Anhang

Alle im Anhang aufgeführten Abbildungen, bzw. die nachfolgende Tabelle, wurden auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen erstellt.

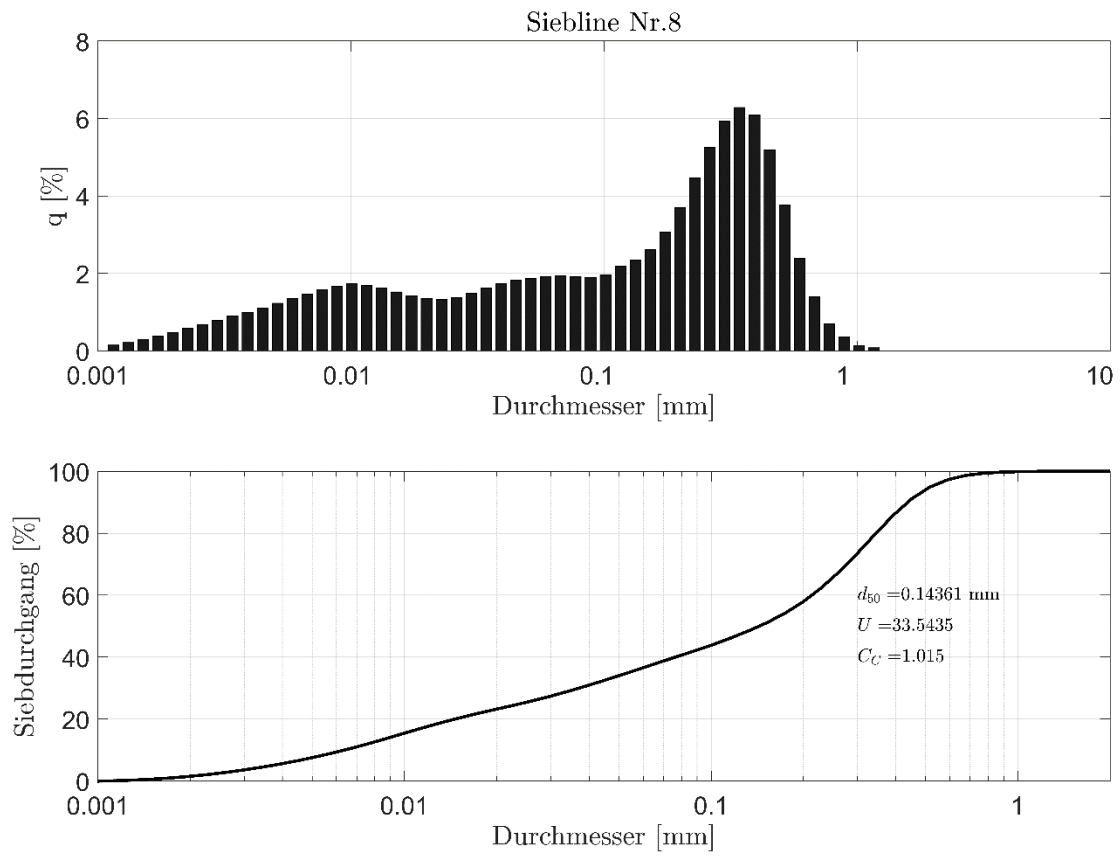
**Anhang 1:** Das Sediment der ersten Altmühlsee - Messung stammt aus neun einzelnen Proben. Die Korndichte und die Korngrößenverteilung wurden für jede einzelne Probe bestimmt. Im Folgenden werden die Ergebnisse dargestellt.

### Korndichte:

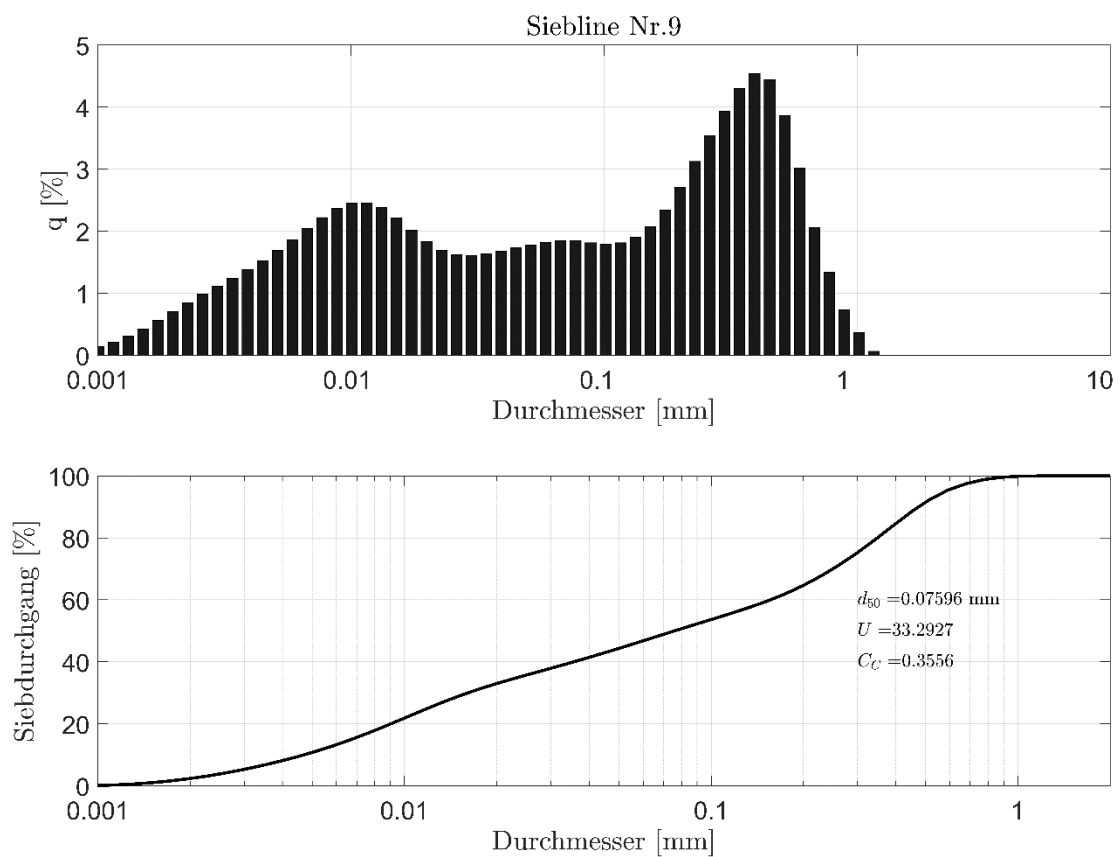
Nummer Altmühlsee Proben	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
8	2,488
9	2,473
10	2,481
11	2,480
13	2,509
14	2,518
15	2,546
18	2,465
19	2,470
Mittelwert	2,482

**Korngrößenverteilung:**

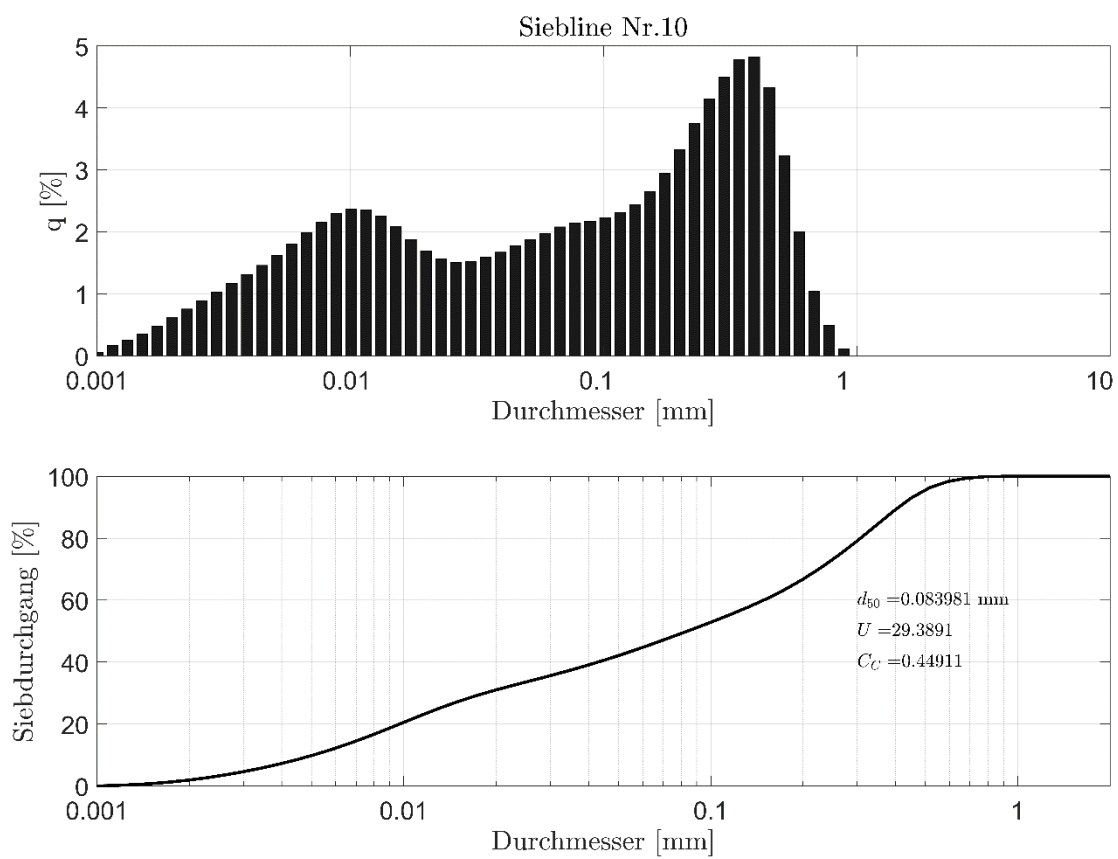
Probe Nr. 8:



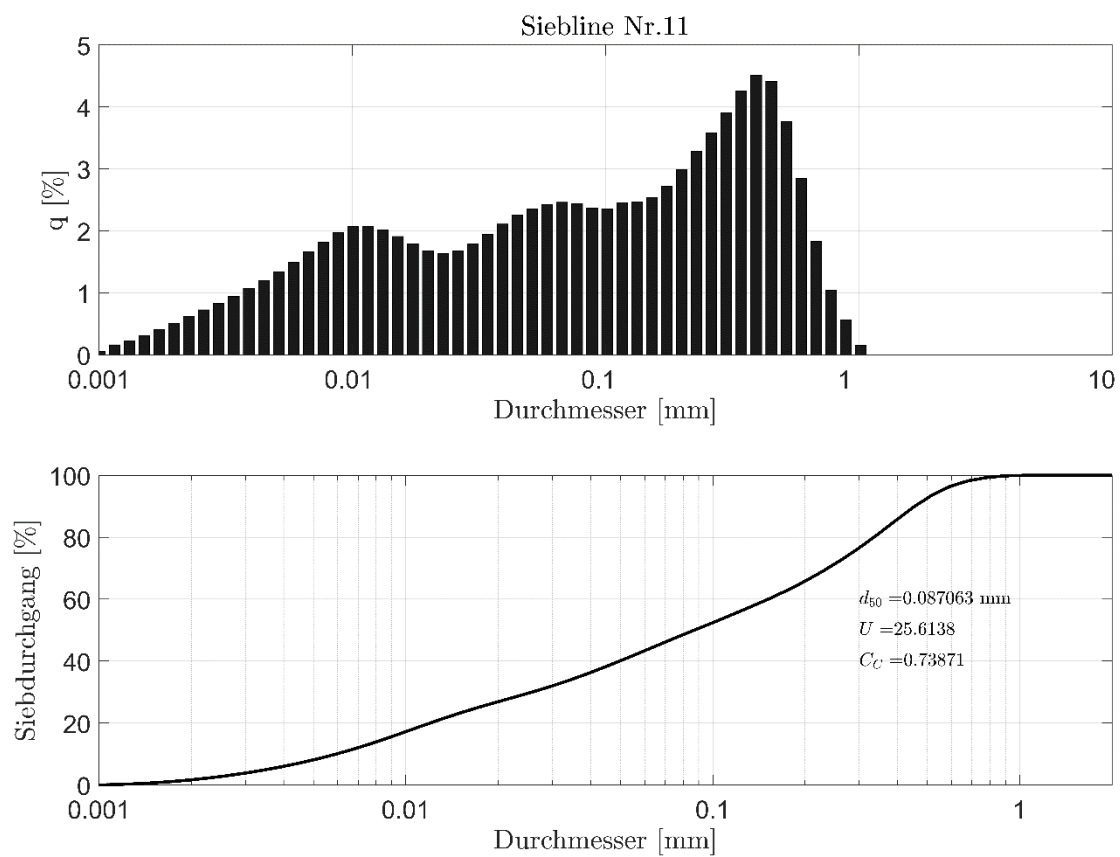
Probe Nr. 9:



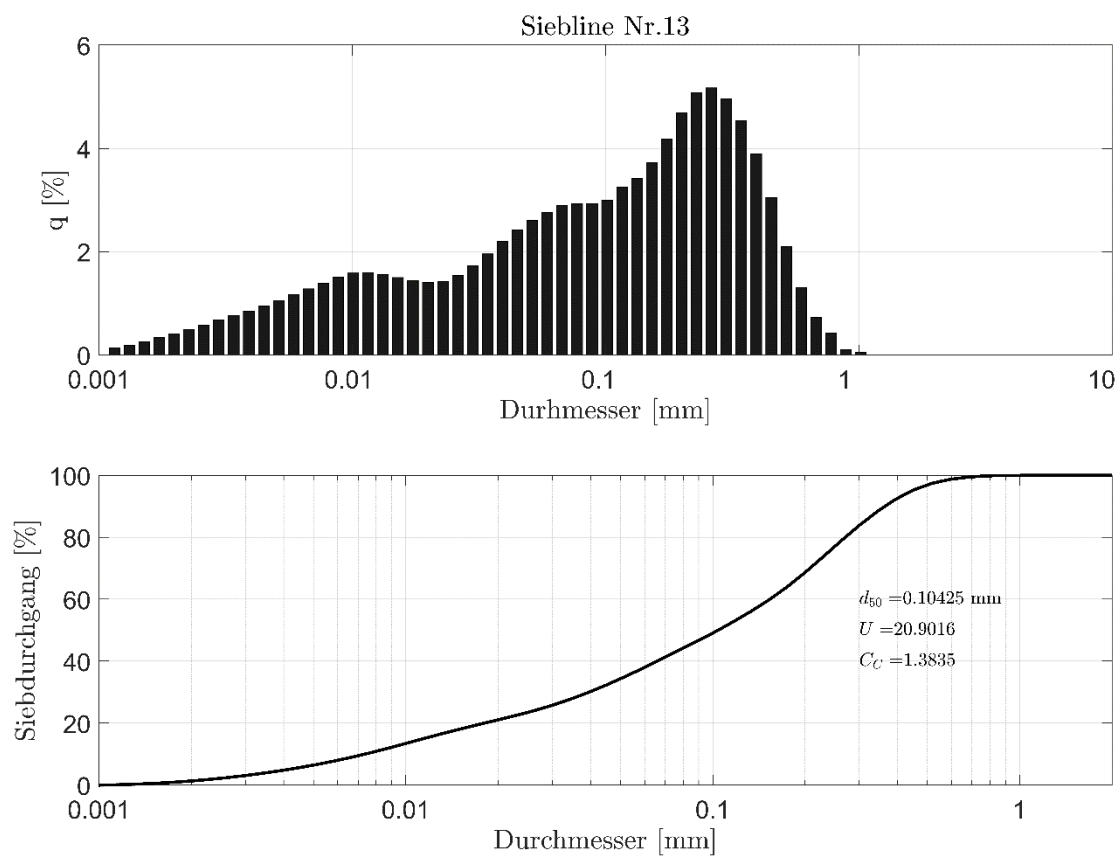
Probe Nr. 10:



Probe Nr. 11:

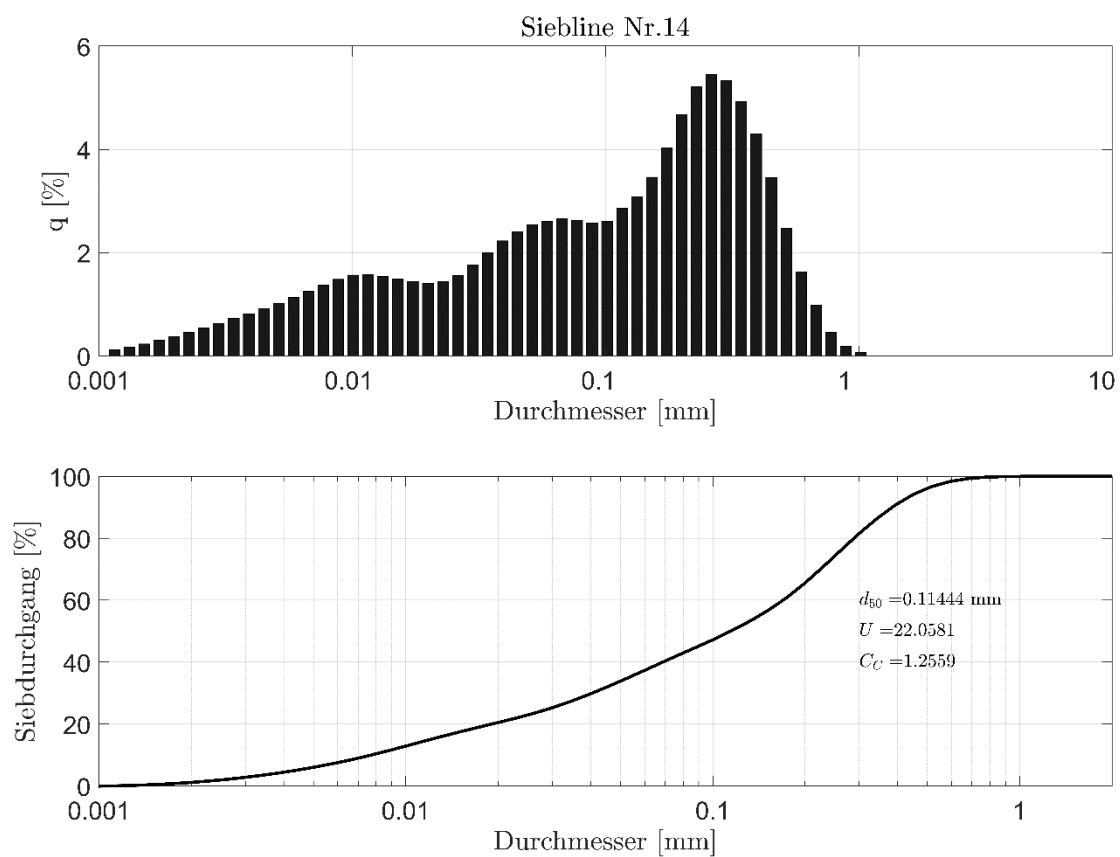


Probe Nr. 13:

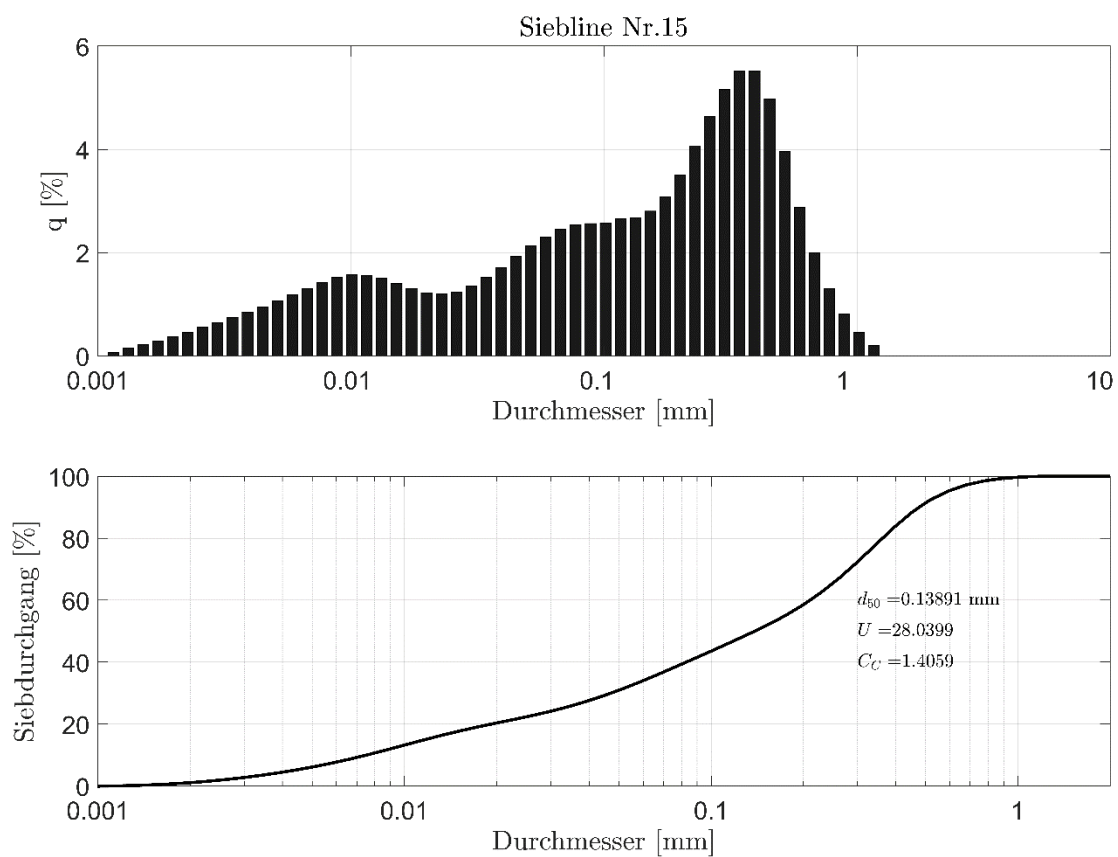




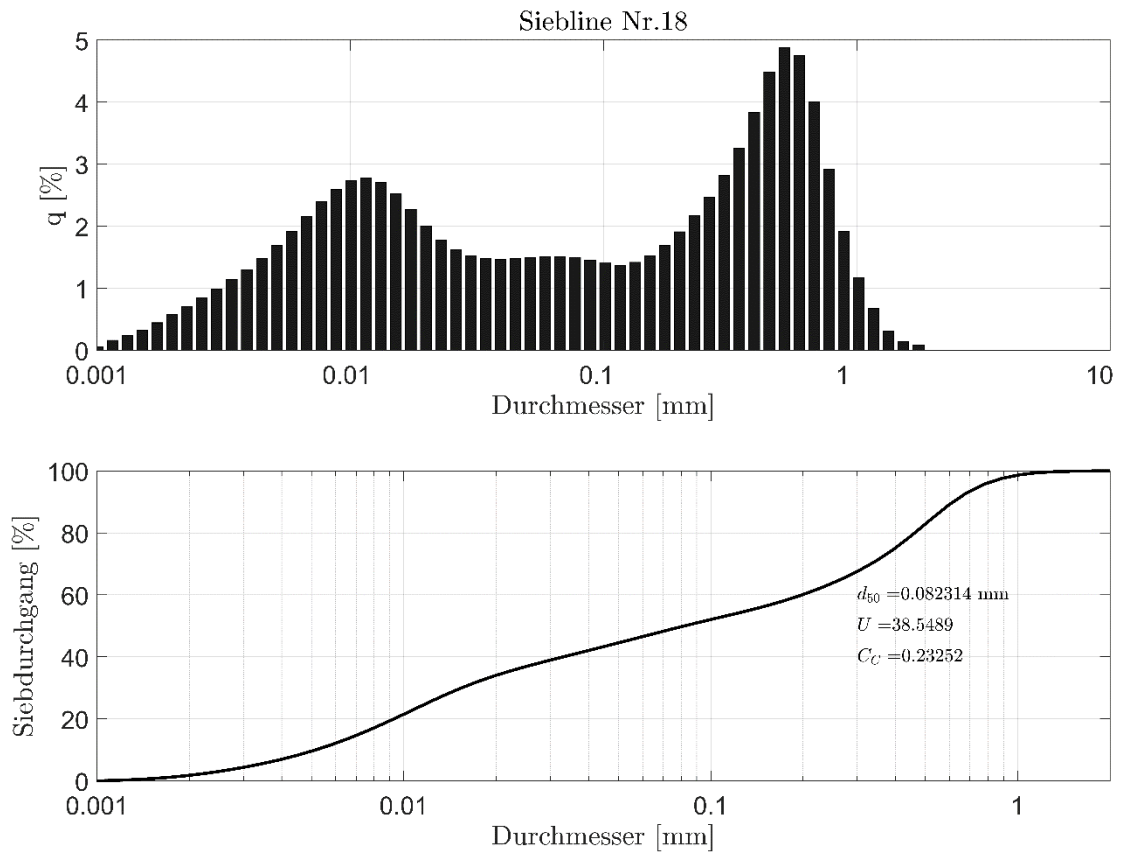
Probe Nr. 14:



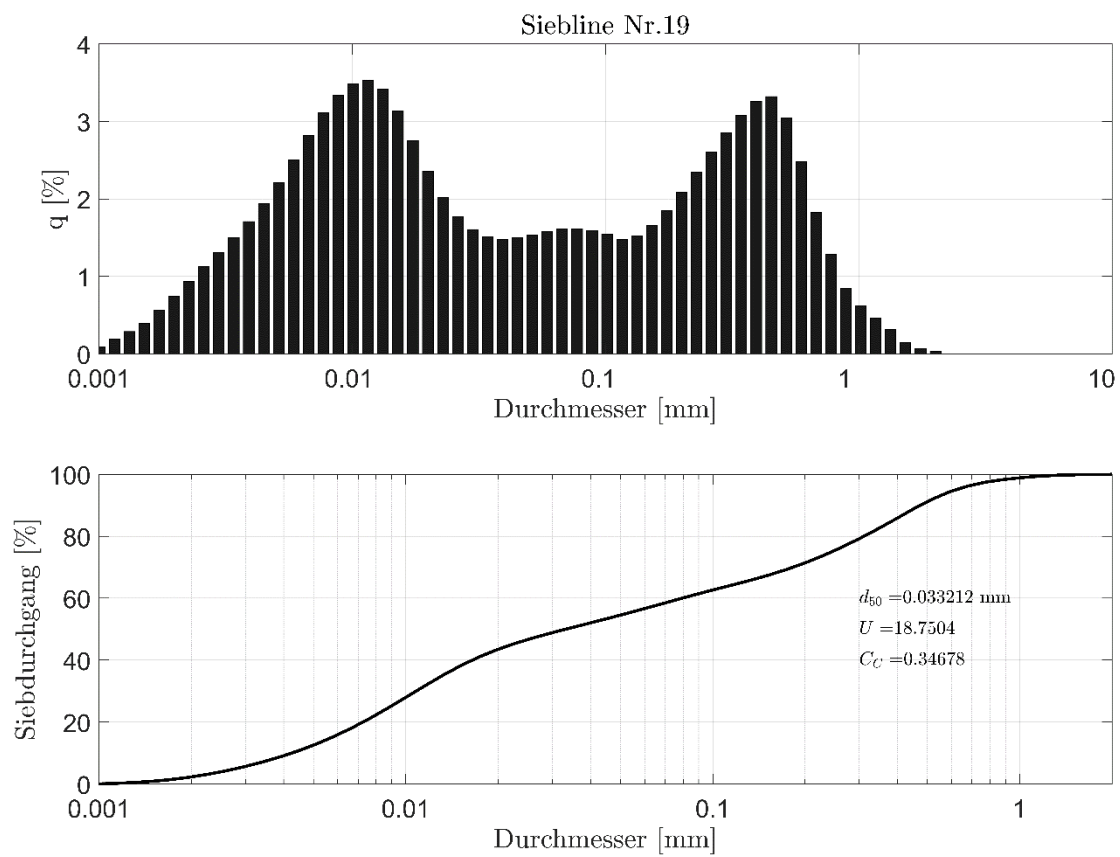
Probe Nr. 15:



Probe Nr. 18:

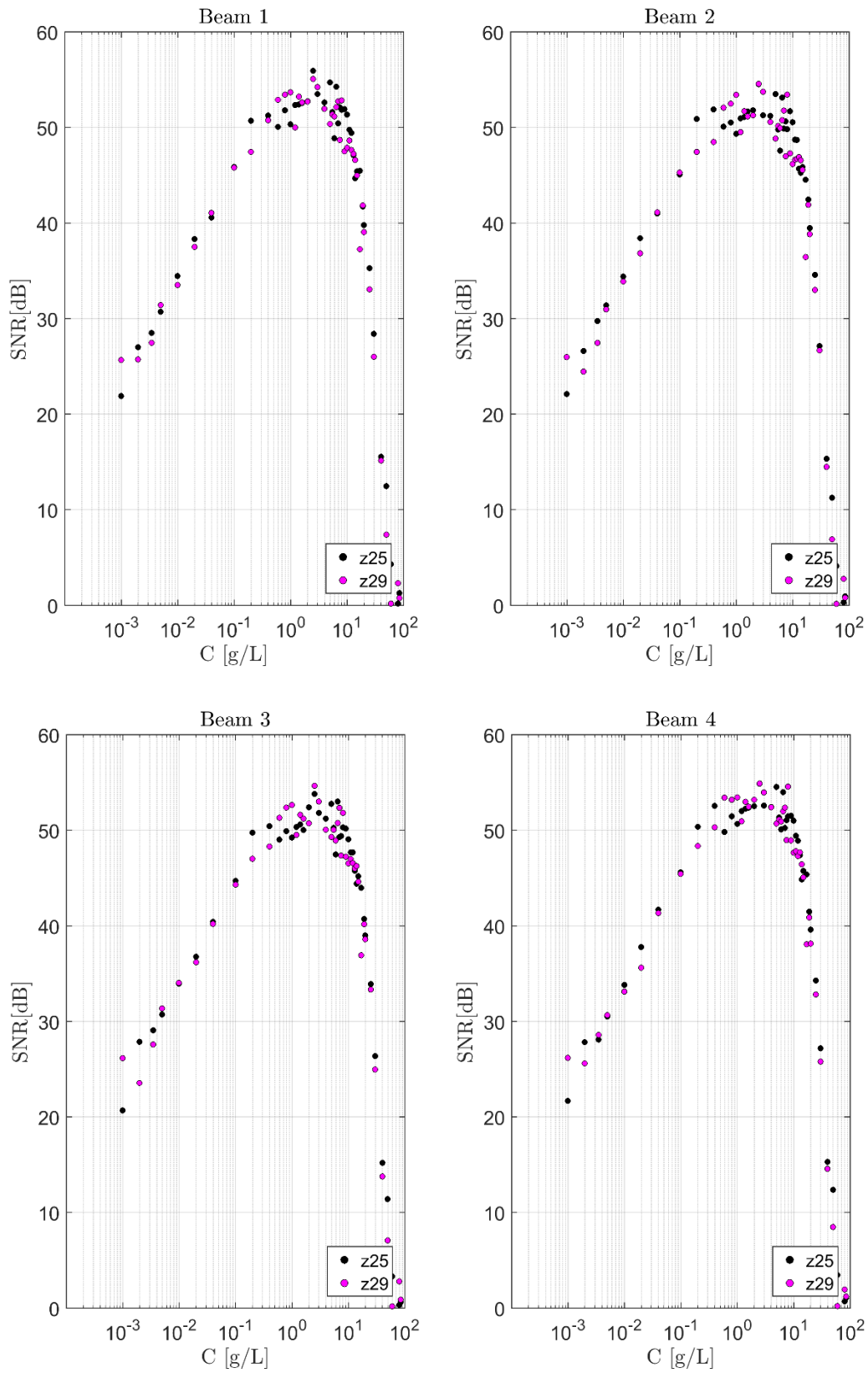


Probe Nr. 19:

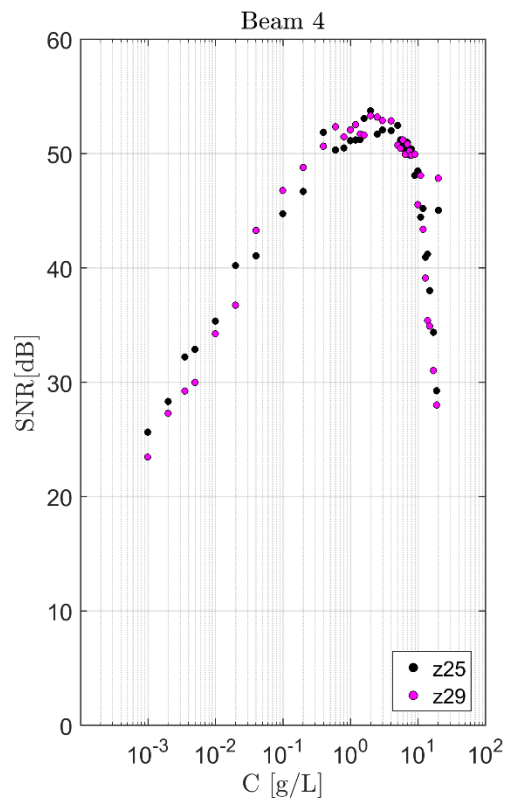
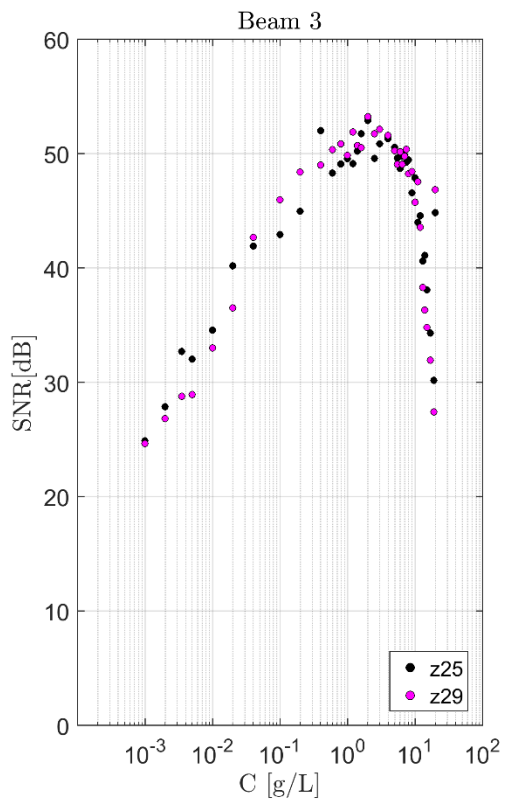
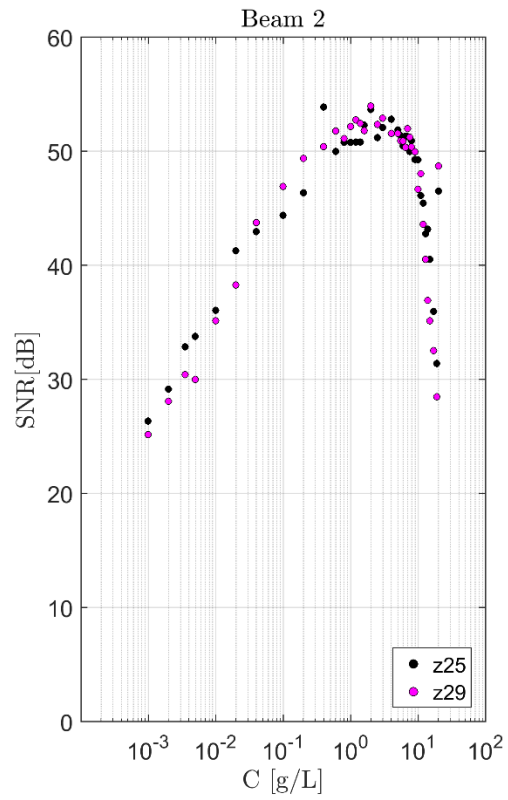
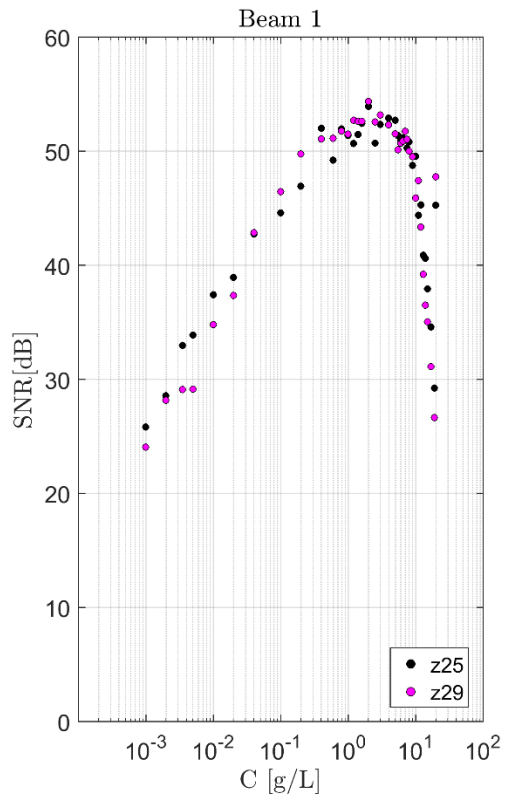


Anhang 2: Darstellung der Messwerte, gemessen auf den Höhen z25 und z29.

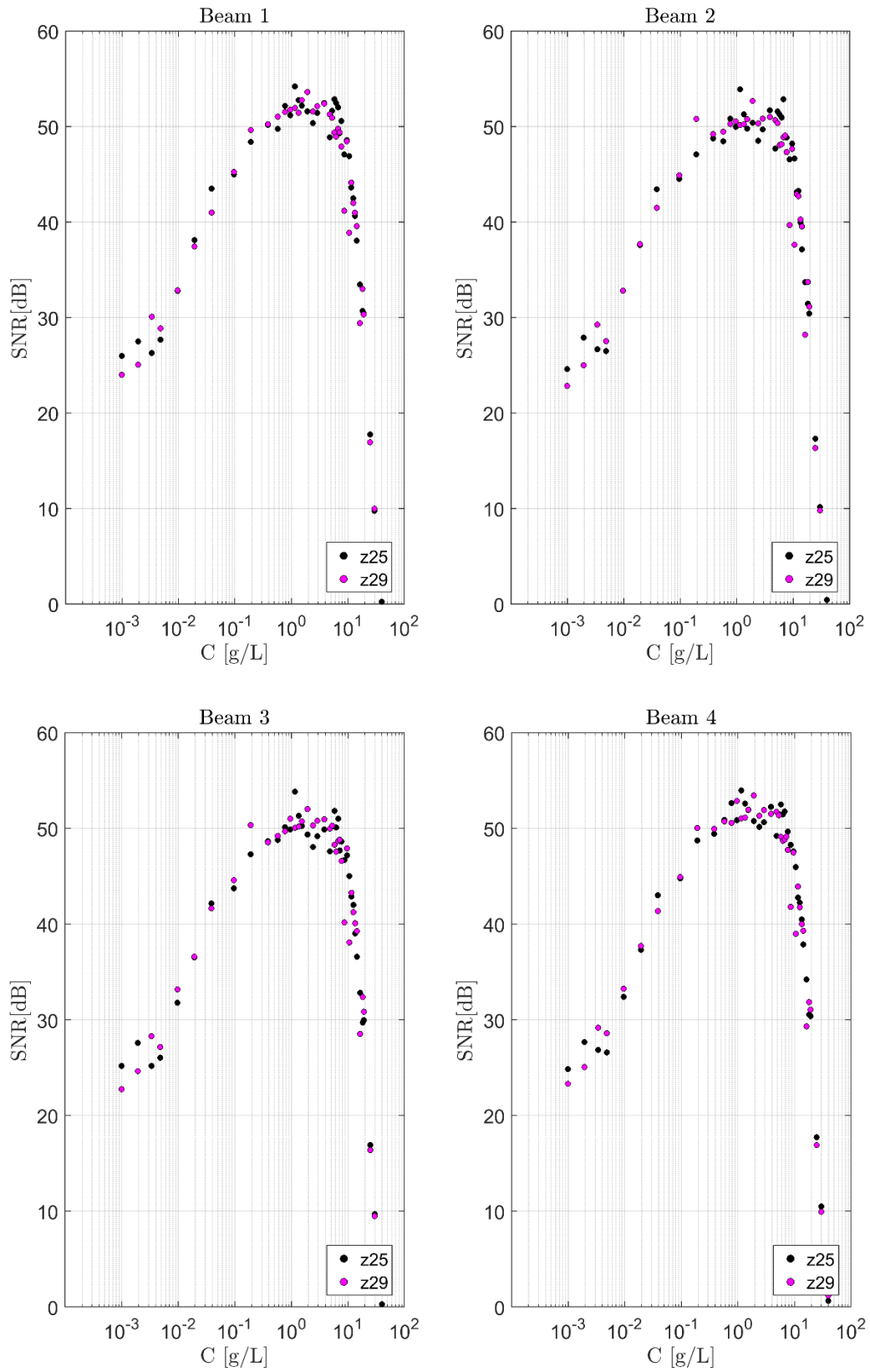
Altmühlsee Messung 2:



**Eixendorfer Stausee Messung 1:**

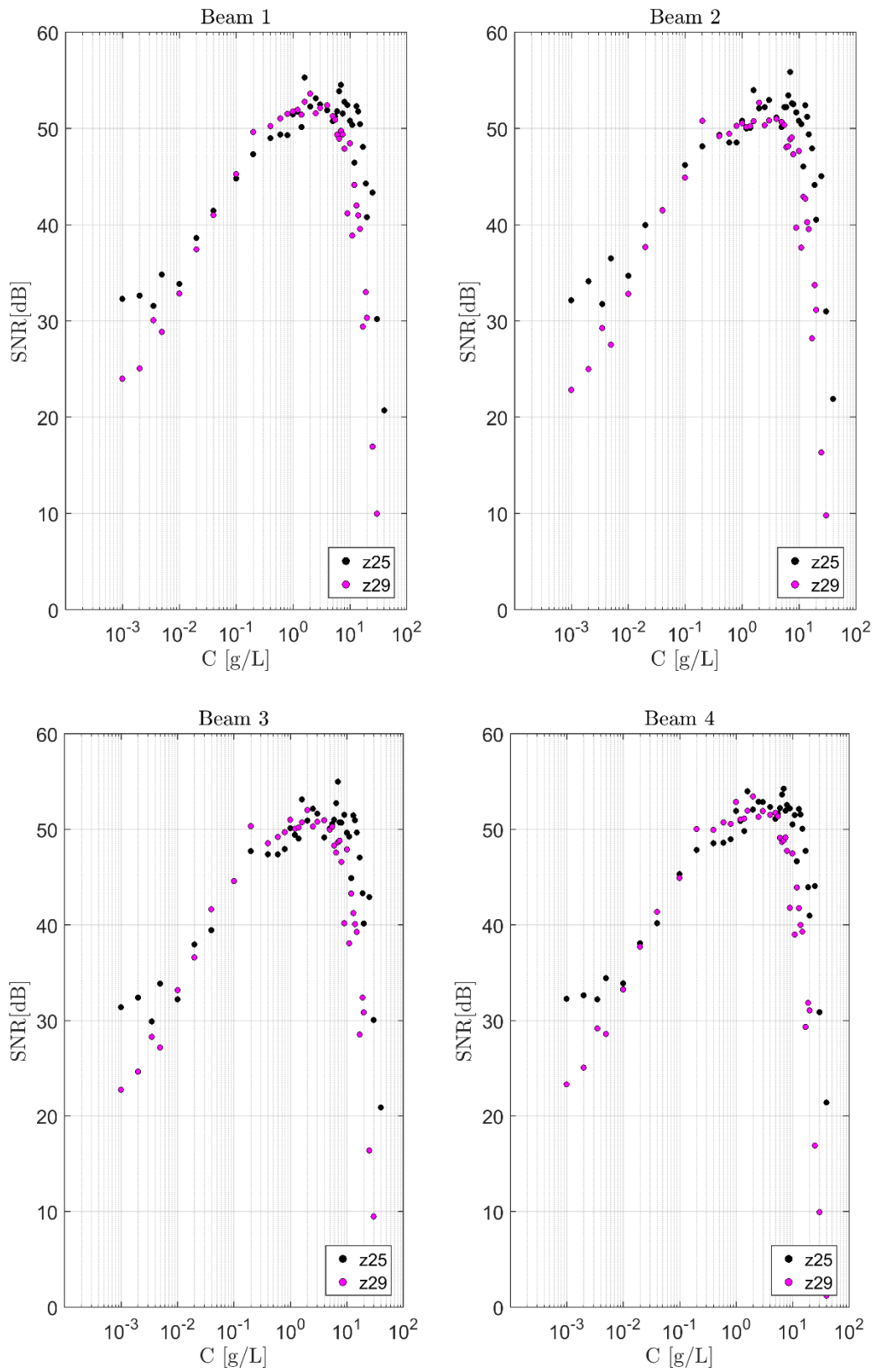


Eixendorfer Stausee Messung 2:

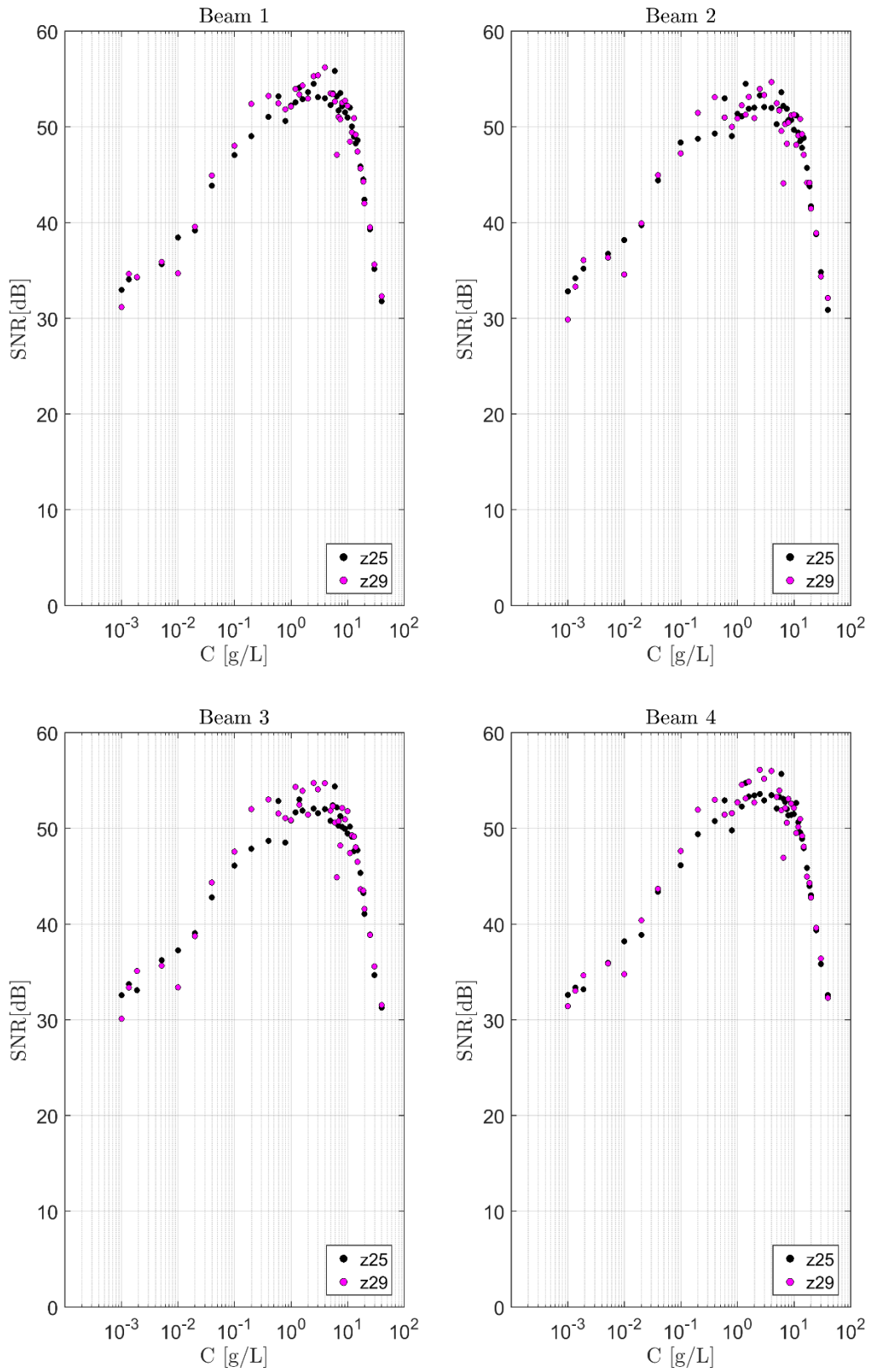




Ems Messung 2015:

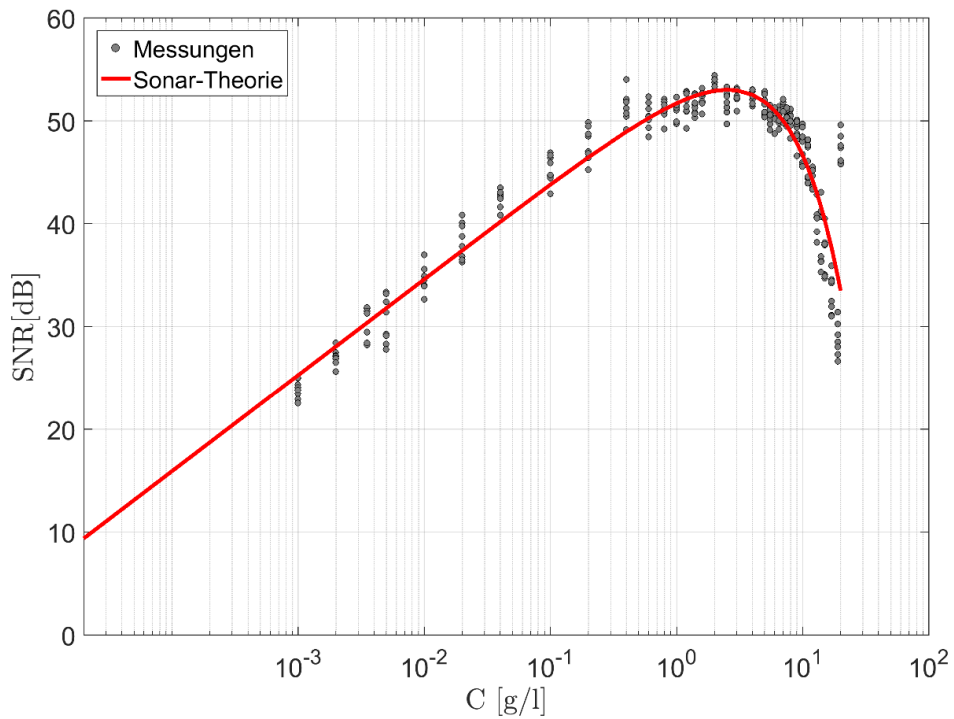


Ems Messung 2012:

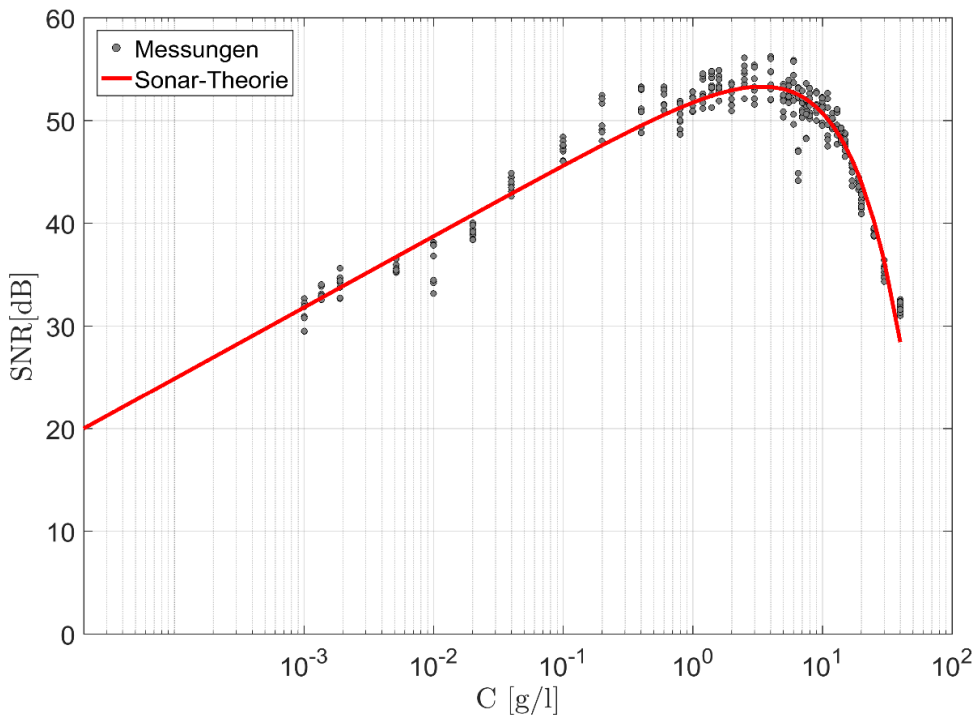


**Anhang 3: Diagramme zur Auswertung durch die Sonar - Theorie.**

**Eixendorfer Stausee 1. Messung:**

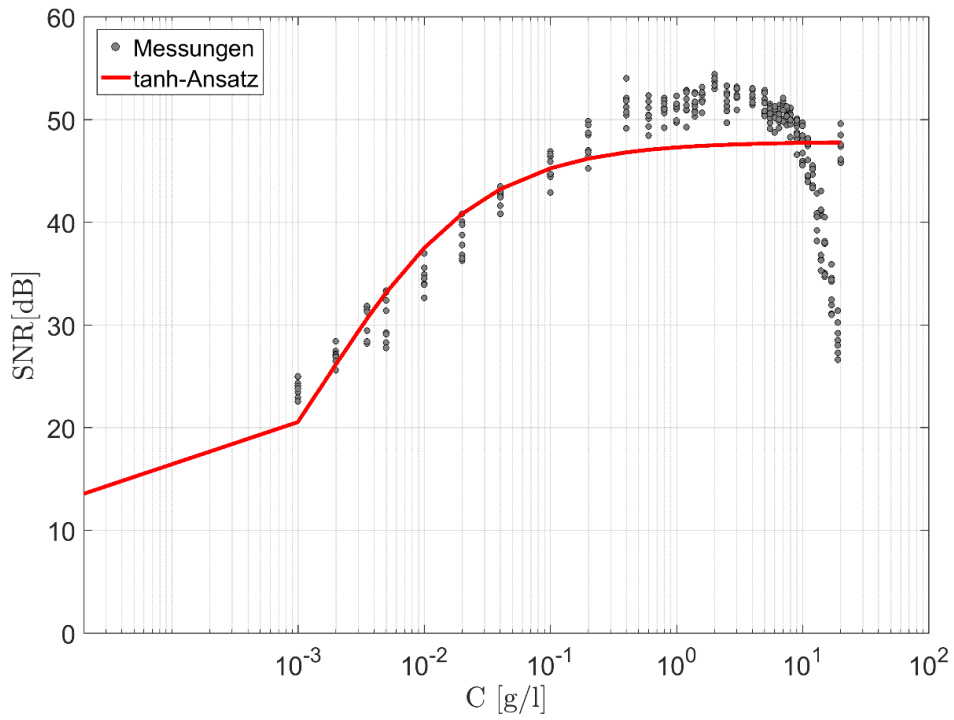


**Ems 2012 Messung:**

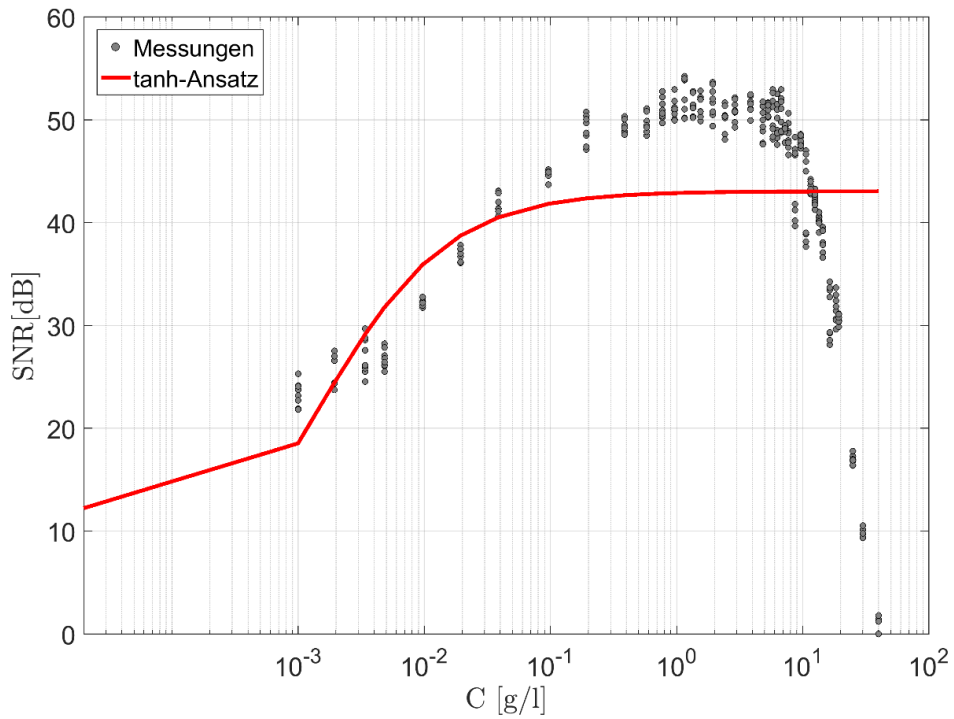


Anhang 4: Diagramme zur Auswertung durch den Tangens hyperbolicus Ansatz.

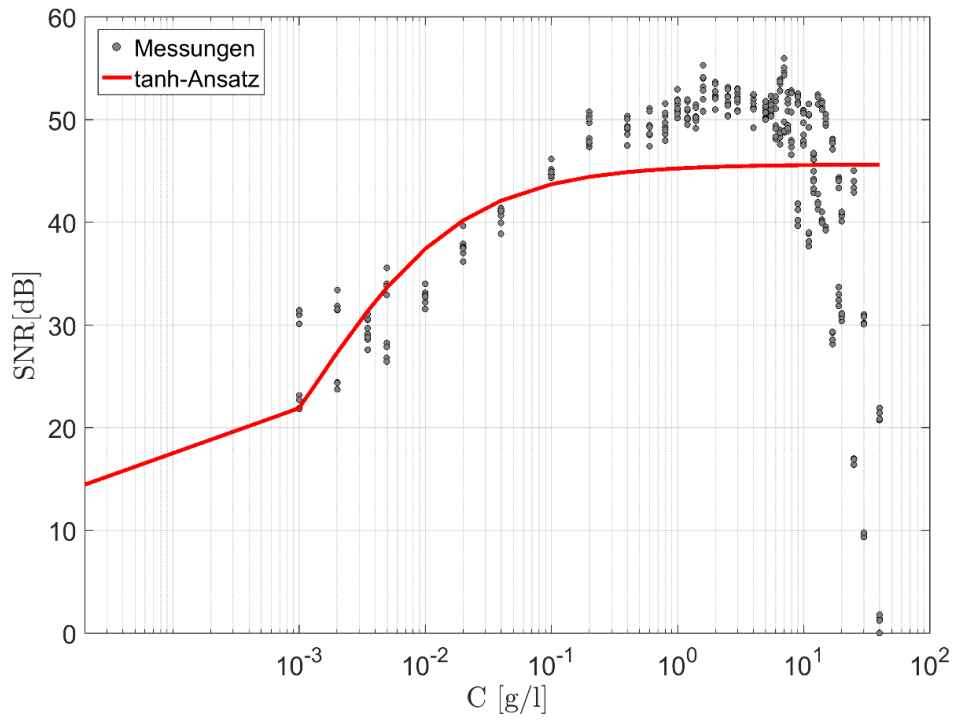
Eixendorfer Stausee 1. Messung:



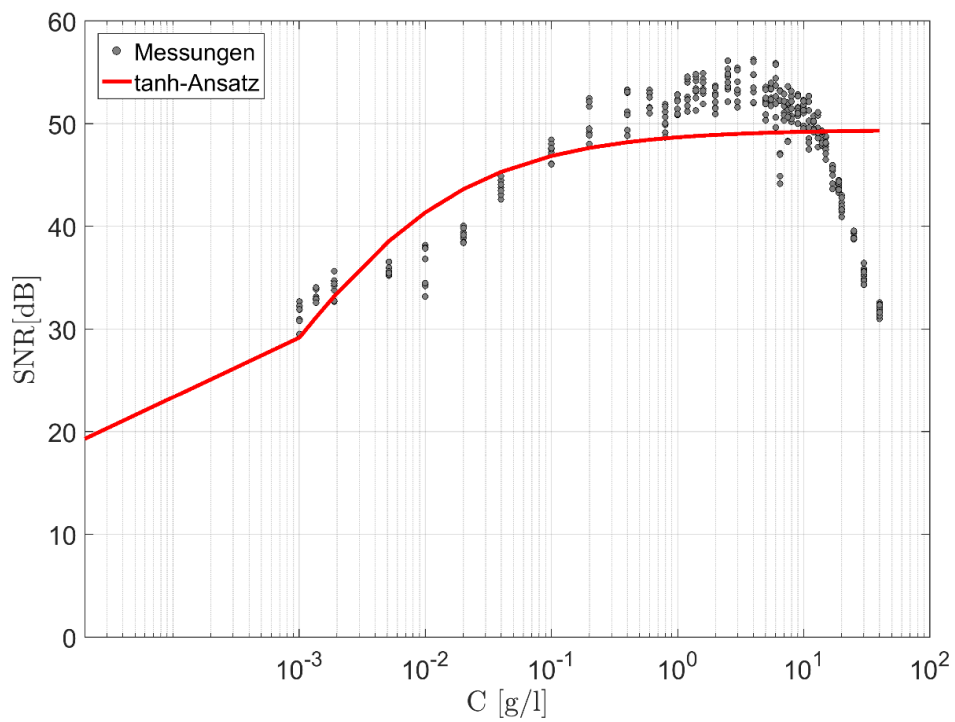
Eixendorfer Stausee 2. Messung:



**Ems Messung 2015:**

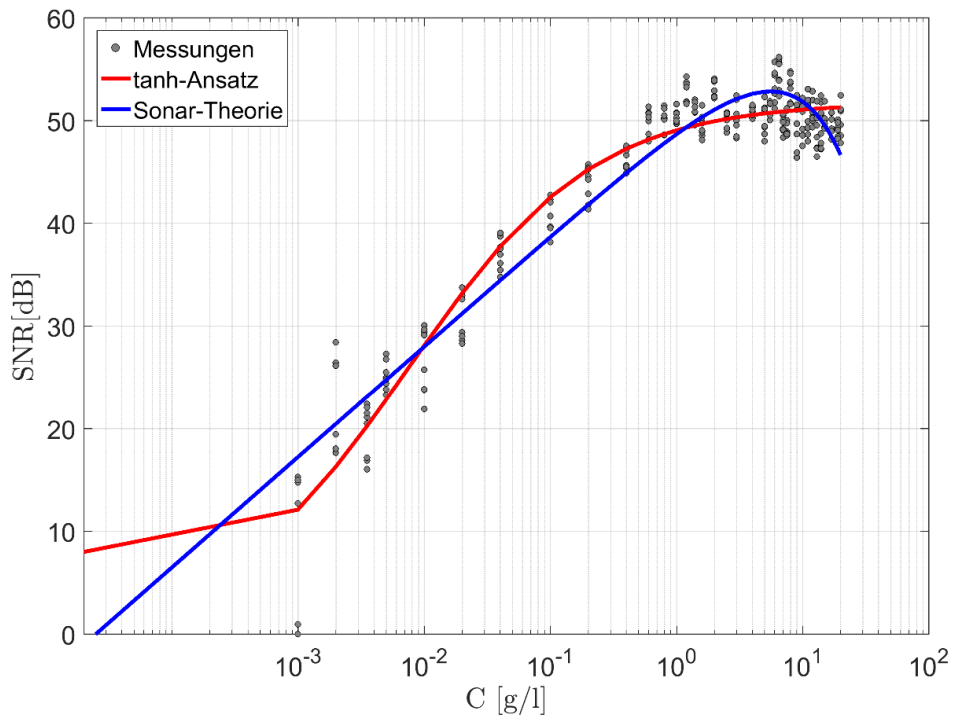


**Ems Messung 2012:**

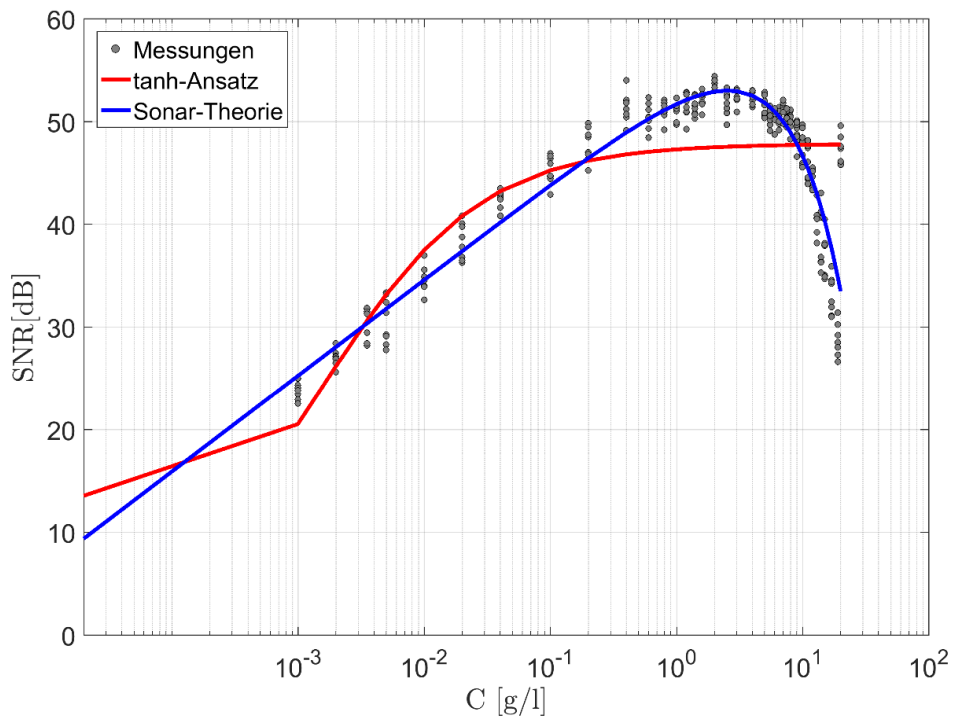


**Anhang 5: Vergleich der Kurven des tanh - Ansatzes und der Sonar - Theorie.**

**Altmühlsee 1. Messung:**

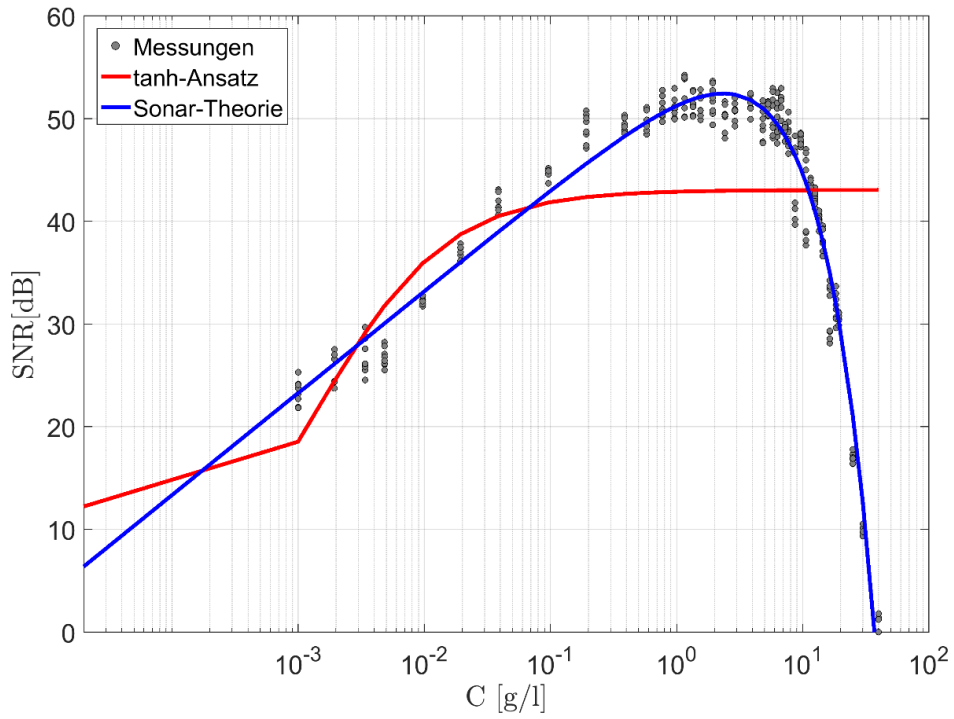


**Eixendorf Stausee Messung 1:**

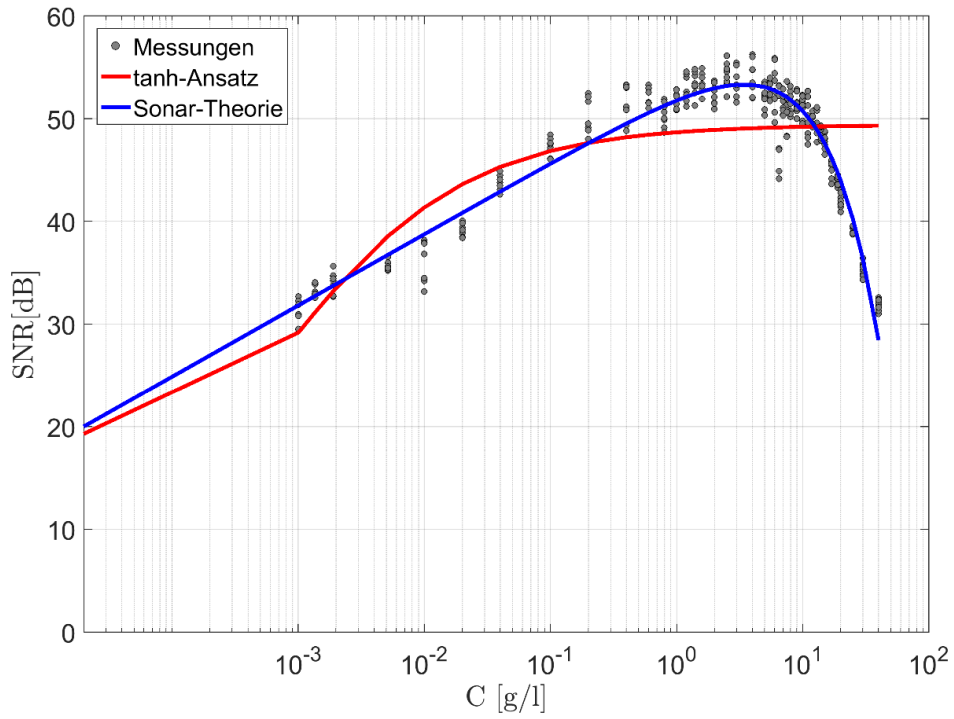




**Eixendorf Stausee Messung 2:**



**Ems 2012 Messung:**



## **Danksagung**

Die folgenden Zeilen möchte ich nutzen, um den Personen zu danken, die mich während dieser Arbeit und während des Studiums unterstützt haben bzw. an diesem Werk beteiligt waren.

Ein großes Dankeschön an Prof. Dr. Andreas Hoffmann, für die Erstkorrektur meiner Bachelorarbeit und für viele interessante Vorlesungen, Praktika und vor allem sehr aufschlussreiche Exkursionen während meiner Studienzeit in Triesdorf.

Vielen Dank auch an Dr. Ivo Baselt für die Zweitkorrektur dieser Arbeit. Ein ganz besonders großer Dank geht an Oliver Chmiel, der mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand, mir aus jeder Matlab – Krise geholfen hat, stets ein offenes Ohr hatte und sich immer Zeit genommen hat, mir alle Fragen zu beantworten.

Ich danke auch dem gesamten Laborteam des Institutes für Wasserwesen an der Universität der Bundeswehr für die tolle Unterstützung und die herzliche Aufnahme.

Außerdem möchte ich mich auch bei Julian Lämmermann bedanken. Zum einen für die seelische, moralische und psychische Unterstützung der letzten Monate und zum anderen für die Formatierungsrecherchen, wenn Microsoft Word andere Vorstellungen von der Formatierung der Bachelorarbeit hatte als ich.

Ein ganz besonders großer Dank geht an meine Familie und Freunde, insbesondere an meine Mama, die mich in jeder Lebenslage unterstützen und immer hinter mir stehen.

Vielen Dank!



## Erklärung

Verfasser/in (Name, Vorname): Eberlein, Laura

---

Betreuer/in (Name, Vorname): Prof. Dr. Andreas Hoffmann

---

Thema der Arbeit: Akustische Konzentrationsmessung mit einer ADV - Sonde

---

Ich erkläre hiermit, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig zu Prüfungszwecken vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Langenzenn	05.09.2018	
Ort	Datum	Unterschrift Verfasser

## Erklärung bzgl. der Zugänglichkeit von Diplom-/Bachelor-/Masterarbeiten

Verfasser/in (Name, Vorname): Eberlein, Laura

Betreuer/in (Name, Vorname): Prof. Dr. Andreas Hoffmann

Thema der Arbeit: Akustische Konzentrationsmessung mit einer ADV - Sonde

Ich bin damit einverstanden, dass die von mir angefertigte Arbeit mit o.g. Titel innerhalb des Bibliothekssystems der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf aufgestellt und damit einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird. Die Arbeit darf im Bibliothekskatalog der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (und zugeordneten Verbundkatalogen) nachgewiesen werden und steht allen Nutzern der Bibliothek entsprechend den jeweils gültigen Nutzungsmodalitäten der Hochschulbibliothek der HSWT zur Verfügung. Ich bin mir auch darüber im klaren, dass die Arbeit damit von Dritten ohne mein Wissen kopiert werden kann. Die Veröffentlichung der Arbeit habe ich mit meinem Betreuer und falls zutreffend, mit der Firma/Institution abgesprochen, die eine Mitbetreuung übernommen hatte.

<input type="checkbox"/>	Ja
<input type="checkbox"/>	Ja, nach Ablauf einer Sperrfrist von _____ Jahren
<input type="checkbox"/>	Nein

Ort	Datum	Unterschrift Verfasser

**Fachgebiet:**

**Umweltsicherung**

- Abfall
- Boden
- Wasser
- Analytik, Mikrobiologie
- Ökologie & Naturschutz
- Umwelttechnik, EDV
- Verwaltung, Recht, Wirtschaft
- Umweltmanagement
- Erneuerbare Energien

**Landwirtschaft**

- Pflanzliche Erzeugung
- Tierische Erzeugung
- Agrarökonomie
- Landtechnik
- Erneuerbare Energien
- Agrarökologie
- Vieh und Fleisch

- Ernährung und Versorgungsmanagement**
- Lebensmittelmanagement

**Master:**

- Energiemanagement und Energietechnik
- MBA Agrarmanagement
- MBA Regionalmanagement

Als Betreuer bin ich mit der Aufnahme in das Bibliothekssystem der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf einverstanden.

Ort	Datum	Unterschrift Betreuer