

Technische Universität Graz
Dekanat für Bauingenieurwissenschaften
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Grundlagen der ADCP-Messtechnik und Auswertung von Messdaten

Masterarbeit
von
Shkelzen Kryeziu

Vorgelegt zur Erlangung des
akademischen Grades eines Master
der Studienrichtung Bauingenieurwesen

Graz, im Februar 2014

Betreuer der Diplomarbeit:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald ZENZ

.....

Mitbetreuender Assistent:
Clemens Dorfmann

.....

Eid (Ehrenwörtliche Erklärung)

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, im Februar 2014

.....

Danksagung

Ich möchte mich beim Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerald ZENZ bedanken, da er mir die Möglichkeit gegeben hat, am Wasserbauinstitut zu arbeiten und meine Masterarbeit zu schreiben.

Bedanken möchte ich mich auch beim Herrn Clemens Dorfmann für die Betreuung, die Tipps und die fachliche Erklärung, während der Verfassung meiner Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Freunden und KollegInnen bedanken, welche mich bei meiner Arbeit unterstützt und mir geholfen haben.

Der größte Dank gilt meiner Familie, da sie mich nicht nur finanziell unterstützt haben, sondern auch mich dazu motiviert haben, das Studium zu beenden. Ohne meine Familie wäre ich heute nicht da wo ich jetzt bin.

Kurzfassung

In der folgenden Arbeit werden die Messungen der Fließgeschwindigkeit analysiert. Die Ermittlung der Fließgeschwindigkeiten kann anhand verschiedener Methoden erfolgen. Für diese Untersuchungen wurde das ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) Gerät verwendet, weil die Fließgeschwindigkeiten nach Justierung und Kalibrierung einfach zu bestimmen sind. Darüber hinaus wird eine flächenhafte Geschwindigkeitsaufnahme im Querschnitt möglich. Mit diesem Instrument werden die Größen der Fließgeschwindigkeit gemessen und es kann ermittelt werden, an welchen Stellen sich Sedimente ablagern. Das ADCP Gerät wird schon seit über zwei Jahrzehnten als Standardsensor zur Vermessung von Strömungen in Gewässern verwendet. Ein sehr interessanter Gesichtspunkt ist, dass diese Ergebnisse häufig als Referenz zur Validierung und Kalibrierung von anderen Strömungsmesssystemen genutzt wird. Einige Versuche und Nachforschungen sind geleistet, welche in der Arbeit näher beschrieben und dargestellt werden.

In dieser Arbeit werden zudem ADCP Messungen, die im Wasserkraftwerk Edling durchgeführt worden sind, vorgestellt und ausgewertet. Die Auswertung besteht aus der Darstellung der 2D tiefgemittelten Fließgeschwindigkeiten im Lageplan und der 3D Darstellung der Fließgeschwindigkeiten.

Abstract

The following thesis deals with measurements of the flow velocity. There are several methods to define the velocity of flow. For this research, the ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) instrument was chosen, because thus the velocity of flow is easier to be determined, according to adjustment and calibration. Moreover, it allows the extensive recording of the velocity in the profile. This instrument also determines the areas where sediments are deposited. The ADCP instrument has been used over the last two decades as the standard sensor for the measurement of water currents. Another interesting point is, that these results can be often used as a reference value for the validation and calibration of other flow measurement systems. An accurate research was conducted which will be depicted and presented in the course of this thesis.

Furthermore, this thesis deals with the presentation and with the analysis of the measurements conducted by the ADCP instrument in the hydroelectric power plant Edling. This analysis consists of the presentation of the 2D depth-averaged flow velocities and also of the 3D presentation of the flow velocities.

Inhaltverzeichnis

1. Aufgabenstellung	1
2. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)	2
2.1 RD Instruments (RDI)	3
3. Ultraschall-Doppler-Technik.....	4
3.1 Physikalische Grundlagen.....	4
3.2 Schallausbreitung	4
3.3 Der Doppler-Effekt	5
3.4 Die Doppler-Verschiebung.....	6
3.5 ADCP Messtechnik.....	10
3.6 Berechnung der Fließgeschwindigkeiten.....	11
3.7 Erfassung der relativen Fließgeschwindigkeiten	11
4. BreitBand Doppler Prinzip.....	13
4.1 Doppler-Zeitdilatation.....	14
4.2 Phasen	15
4.3 Zeitdilatation und Doppler Frequenz Verschiebung.....	15
4.4 Phase Messung und Mehrdeutigkeit	17
4.5 Autokorrelationen.....	18
4.6 Einstellung	19
5. Dreidimensionale Strömungsgeschwindigkeitsvektoren	20
5.1 Mehrere Wandler	20
5.2 Strömungshomogenität in einer horizontalen Schicht.....	20
5.3 Berechnungen der dreidimensionalen Geschwindigkeit mit ADCP.....	21
5.4 Geschwindigkeitsfehler	21
5.5 Die Janus-Konfiguration.....	22
6. Geschwindigkeitsprofile	23
6.1 Tiefenzellen	23
6.2 Mittelungen über die Tiefenzellen	24
6.3 Unterteilung in mehrere Tiefenschichten.....	24
6.4 Gewichtsfunktion für eine Tiefenzelle.....	26

7.	ADCP Daten	27
8.	Zufallsfehler und systematischer Fehler	28
8.1	Wandler-Richtungsfehler.....	28
8.2	Mittelung von ADCP Daten	29
8.3	Der Bearbeitungszyklus	29
8.4	Kalibrierung.....	30
8.5	Unsicherheiten von Moving Boat-ADCP-Messungen	30
9.	ADCP Pitch, Roll, Heading und Geschwindigkeit.....	33
9.1	ADCP Messung für Rotation und Translation.....	34
9.2	Stationäre ADCP Konfiguration.....	35
9.3	Mobile ADCPs–Moving Boat ADCP	35
9.3.1	ADCP-Geräteträger für das Moving Boat-Verfahren:.....	36
9.4	Messtechnische Erfassung der ADCP-Bewegung	40
9.4.1	Die Bootgeschwindigkeit	40
9.4.2	Erfassung der ADCP-Bewegung mit GPS	43
10.	Echointensität und Reichweite	44
10.1	Schallabsorption	45
10.2	Strahlausbreitung.....	46
10.3	Partikeln.....	46
11.	Schallgeschwindigkeit	47
11.1	Schichtung in Wasser	48
11.2	Änderungen der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe	48
11.3	Korrektur der Tiefe und der Zellentiefe für Geschwindigkeitsänderung	49
12.	Wandler	50
12.1	Wandler Abstrahlwinkel	50
12.2	Wandler Hindernisse.....	51
12.3	Mess- und Randbereiche	51
12.3.1	Im Einzelnen gilt für die Randbereiche	52
12.4	Durchflussermittlung	53
12.5	Ringung Effekt	55
12.6	Der Druck	56

12.7	Concave vs Convex	56
13.	Sohlaufnahme oder Bottom Tracking Mode (BTM)	57
13.1	Ice-Tracking.....	59
14.	ADCP Messungen im Stauraum des Kraftwerk Edling.....	60
14.1	Aufgabenstellung	60
14.2	Übersicht Kraftwerk Edling.....	60
14.3	Auswertung der ADCP-Messergebnisse	64
14.3.1	Einleitung Software	64
14.3.2	2D Auswertung.....	65
14.3.3	3D Auswertung.....	70
15.	Zusammenfassung.....	75
	Abbildungsverzeichnis	76
	Tabellenverzeichnis	82
	Literaturverzeichnis	83
	Anhang.....	85

1. Aufgabenstellung

In dieser Arbeit werden die Grundlagen der ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) Messtechnik vorgestellt. Mit der ADCP Messtechnik können in offenen Oberflächengewässern die Fließgeschwindigkeiten entlang eines Querprofils und über die Wassertiefen mit einer hohen räumlichen Auflösung gemessen werden. Mit der gleichzeitigen Wassertiefenmessung kann somit der Durchfluss bestimmt werden.

In Kapitel 3 wird das Funktionsprinzip eines ADCP Gerätes beschrieben. In den darauffolgenden Kapiteln wird speziell auf die Messtechnik von ADCP Geräten der Firma RDI eingegangen.

Das Funktionsprinzip der 3D – Fließgeschwindigkeitsmessung wird ausführlich in Kapitel 5 erläutert. Ebenso wird der geeignete Mess- und Anwendungsbereich des ADCP Geräts näher in Kapitel 12 beschrieben. In weiterer Folge wird die Anwendung für die ADCP - Geschwindigkeitsmessung anhand eines Versuches (Kapitel 14), welcher im Stauraum des Wasserkraftwerkes Edling durchgeführt wurde, ausführlich dargestellt. Des Weiteren wird ein Vergleich zur Kontrolle der Messungen anhand verschiedener Softwarelösungen durchgeführt.

Abschließend wird auch auf mögliche Fehler durch unsachgemäße Bedienung hingewiesen, um die korrekte Anwendung zu verdeutlichen und repräsentative Ergebnisse zu ermöglichen.

2. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler)

Mit hydrometrischen Flügeln werden heute noch Strömungsmessungen ausgeführt. Diese hydrometrischen Flügel sind zum Teil auf Spezialschiffen in ein aufgefälltes Mess- und Auswertungsverfahren integriert. Die Abflussmessung z.B. am Rhein mit einem solchen konventionellen Schiff dauert ca. 3 Stunden. Um den Durchfluss zu ermitteln, verwendet man heutzutage meistens ADCP-Geräte. Diese Geräte arbeiten mit der Ultraschall-Doppler-Technik. Mit dem Gerät dauert eine Durchflussmessung im Rhein etwa 3 bis 8 Minuten. Die Vergleichsmessungen mit hydrometrischen Flügeln wurden herangezogen, um ADCP Messungen zu beurteilen. (Adler, 1993)

Es gibt verschiedene Arten von ADCP Messgeräten, aber alle verwenden das Prinzip des Doppler-Effekts. Das Instrument misst die Geschwindigkeit des Wassers von einem Boot aus oder über dem Meeresboden. Das Gerät sendet akustische Signale im Ultraschallbereich aus, die an Partikeln im Wasser reflektiert und wieder empfangen werden (es hat die Funktion sowohl als Sender als auch Empfänger). ADCP erfasst die Fließgeschwindigkeitsverteilung im Querschnitt mit sehr hoher räumlicher Auflösung während die ADV-Sonden (Acoustic Doppler Velocimetry) zur Erfassung punktueller Geschwindigkeitswerte verwendet werden (Abb. 2.1). (Fiedler, 2008)

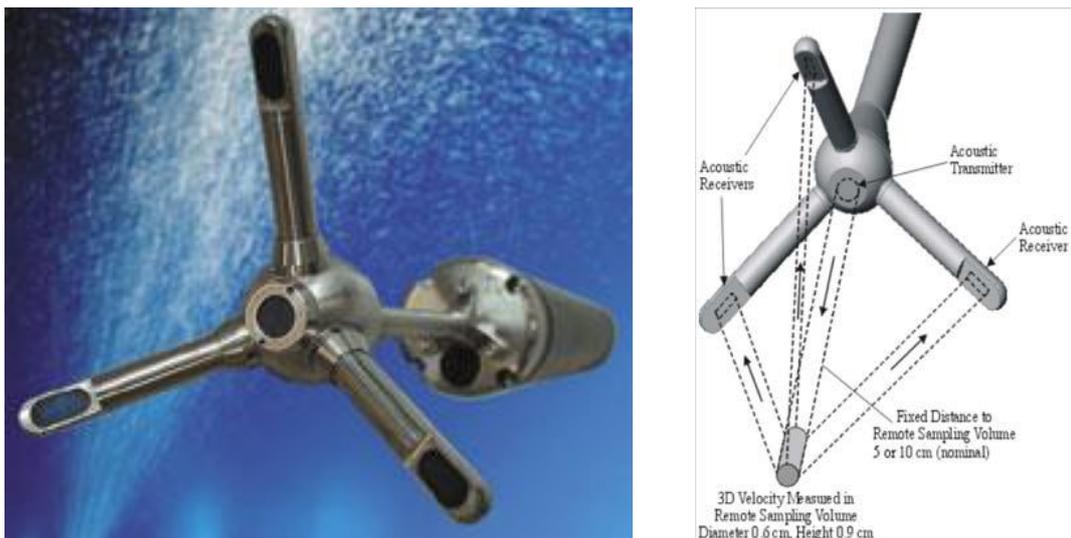


Abbildung 2.1. Links ADV (Nortek AS), rechts Prinzipielle Funktion einer ADV-Sonde

(<http://www.nortek-as.com/en/products/velocimeters/vector>)

(<http://www.sontek.com/10mhzadv.php>)

2.1 RD Instruments (RDI)

Es gibt verschiedene Firmen wie z.B. Teledyne RD Instruments (RDI), Nortek, Sontek oder OTT, welche die ADCPs herstellen. Das erste ADCP Gerät wurde von Rowe&Young im Jahr 1979 produziert. Für diese Untersuchung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, wurde das ADCP Gerät Rio Grande 1200 KHz der Firma RDI verwendet (Abb. 2.2).

RD Instruments (RDI) ist ein Unternehmen, welches sich für die Herstellung akustischer Instrumente für den Einsatz in Ozeanen, Flüssen, Häfen etc. spezialisiert hat. Die Firma wurde im Jahr 1981 von Fran Rowe und Kent Deines gegründet. Zurzeit sind mehr als 100 Menschen beschäftigt und mit ihren ADCP Geräten ist das Unternehmen auf der ganzen Welt bekannt. Das erste ADCP Gerät von RDI wurde im Jahr 1982 hergestellt. Es war ein stationäres Gerät, das für den langfristigen batteriebetriebenen Einsatz konstruiert war (Pettigrew, Beardsley und Irish, 1986). Ein Jahr später produzierte RDI das erste mobile ADCP Gerät. Bis 1986 hatte RDI fünf verschiedene Frequenzbereiche von 75 bis 1200 kHz und drei verschiedene ADCP-Modelle. Einen großen Sprung nach vorne machte die Entwicklung der ADCP-Technik mit dem Verkauf des ersten Breitband-Gerätes. Im Vergleich zu denen mit Schmalband-Technik haben die Breitband-ADCP's eine 100-fache höhere Bandbreite und aus diesem Grund weisen die Messwerte eine, um fast die 100-fach geringere, Streuung auf. (RDI, 1996)

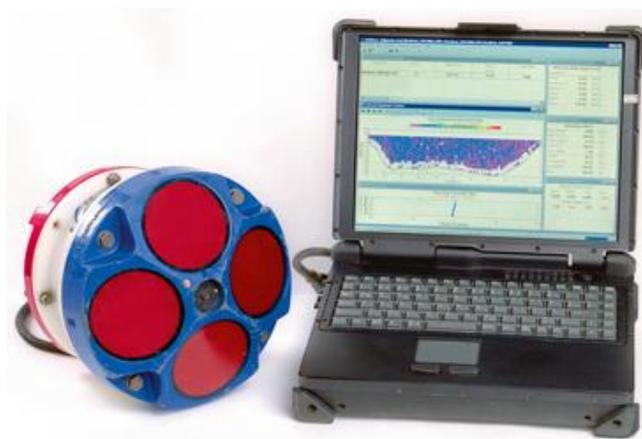


Abbildung 2.2. ADCP Rio Grande (Morgenschweis, 2010)

3. Ultraschall-Doppler-Technik

Um die Geschwindigkeitsmessung durchzuführen, werden in vielen Gebieten der Wissenschaft beispielweise in der Astronomie, Medizin und industrieller Messtechnik akustische Messgeräte eingesetzt. (Morgenschweis, 2010)

3.1 Physikalische Grundlagen

Physikalisch gesehen kann Schall als eine „Störung“ im Druckfeld eines leitenden Mediums beschrieben werden. Die Moleküle des Leiters werden in periodischen Schwingungen versetzt, wodurch es zu Dichte- und Druckänderungen kommt. (Fiedler, 2008)

3.2 Schallausbreitung

Wellenberge und Wellentäler entstehen in den Bereichen des höheren und niedrigen Luftdrucks. Sie breiten sich in ruhenden Gasen und Flüssigkeiten als Longitudinalwellen¹ und in festen Körpern auch als Transversalwellen² aus. Im Vakuum gibt es keine Schallausbreitung. Materialeigenschaften des Ausbreitungsmediums sowie der Druck und die Temperatur sind Faktoren, von denen die Schallgeschwindigkeit „c“ abhängig ist. Die Schallgeschwindigkeit ist in festen Körpern am größten und in gasförmigen Zuständen am kleinsten. Die Formeln, um die Schallgeschwindigkeit zu berechnen, werden unter anderem in Grosso und Mader [1972] angegeben. (Grosso, V. A. Del und Mader, C. W., 1972)

¹ Physikalische Welle, auch Längswelle genannt, welche die in Ausbreitungsrichtung schwingt.

² Physikalische Welle, welche senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung schwingt.

Tabelle 1 Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Luft und Wasser bei verschiedenen Temperaturen (Fiedler, 2008)

T [°C]	-10	0	10	20	30
Luft	325	331	337	343	349
Wasser	1348	1407	1449	1484	1511

Zwischen der Schallgeschwindigkeit „c“ in [m/s], der Schallwellenlänge „λ“ in [m] und der Frequenz „f“ in [1/s] besteht folgender Zusammenhang:

$$c = f * \lambda \quad (1)$$

Man kann den Schall anhand der Frequenz in Infraschall (<16 Hz), Hörschall (<16 Hz – 20 Hz) und Ultraschall (> 20 Hz) unterteilen (Borucki, 1989). Die menschliche Wahrnehmung des Hörschalls wird dadurch ermöglicht, dass die Druckwellen das Trommelfell in Schwingung versetzen. Diese werden im Innenohr in elektrische Signale umgewandelt, welche wiederum vom Gehirn als Geräusch interpretiert werden. Wenn man für eine Schallwelle an der unteren Hörgrenze in Luft bei 20°C die Gleichung (1) anwendet, so erhält man eine dazugehörige Wellenlänge von ca. 20 m. Die Wellenlänge von Schall an der oberen Hörgrenze in Luft beträgt ca. 1.7 cm. Akustische Messverfahren arbeiten meist im Ultraschallbereich. (Fiedler, 2008)

Weil die elektromagnetischen Wellen (z. B. Radiowellen) und das Licht sich im Wasser nur schlecht ausbreiten können und beschränkte Reichweiten besitzen, hat die Ausbreitung von Schall im Wasser eine besondere Bedeutung. Technische Anwendung findet das Phänomen der Schallausbreitung heute vor allem in der Navigation und der Ortung unter dem Wasser. Der verwendete Frequenzbereich liegt zwischen 10 Hz und 1 MHz. (Simpson, 2001)

3.3 Der Doppler-Effekt

Der Doppler-Effekt wird verwendet, um die relative Radialgeschwindigkeit zwischen verschiedenen Objekten zu messen

„Der österreichische Physiker Christian Doppler stellte 1842 bei akustischen Experimenten fest, dass, wenn von einer festen Quelle (Sender) ein Ton mit

einer festgelegten Tonhöhe (Frequenz) ausgesendet wird, ein ruhender Beobachter die gleiche Tonhöhe (f_0) hört, dass aber, wenn der Beobachter sich relativ zur Quelle bewegt, die Tonhöhe sich verändert, das heißt, die Tonhöhe verändert sich durch die Bewegung. Physikalisch ausgedrückt heißt dies, dass die Frequenz von Wellen, z.B. Ultraschallwellen, sich ändert, wenn sich der Sender relativ zu einem stationären Empfänger bewegt oder wenn sich bei einem stationären Sender ein reflektierendes Teil relativ zu einem sich ebenfalls stationären Empfänger bewegt“. (Bernard, 1990)

Ein Beispiel für den Doppler Effekt ist der Ton von einem vorbeifahrenden Zug (Abb.3.1). Während sich der Zug dem fest stehenden Beobachter nähert, hat die Pfeife einen höheren Ton. als im Vergleich dazu, wenn der Zug von ihm weg fährt. In diesem Fall hat die Pfeife eine niedrigere Tonhöhe. Die Veränderung der Tonhöhe ist direkt proportional zur Zuggeschwindigkeit. Um die Geschwindigkeit des Zuges zu berechnen, kann man die Tonhöhe und die Veränderung messen. (RDI, 1996)

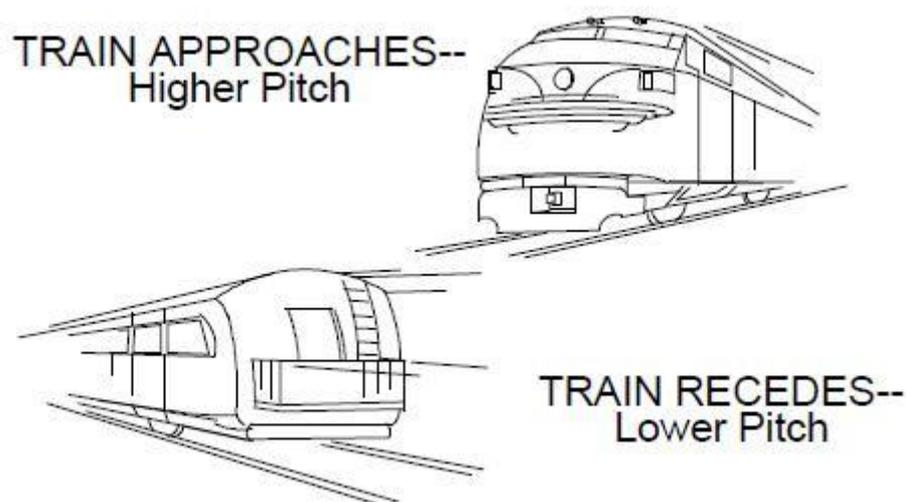


Abbildung 3.1 Doppler-Effekt eines vorbeifahrenden Zuges (RDI, 1996)

3.4 Die Doppler-Verschiebung

Die Schallausbreitung verläuft, bei homogen schallleitenden Medien in alle Richtungen symmetrisch, wenn sich die Schallquelle und das Medium in Ruhe befinden. Die Kreise der Druckwellen werden nicht mehr konzentrisch sein, wenn sich der Sender im Medium bewegt, oder sich das Medium um den Erre-

ger bewegt. Aus diesem Grund ändern sich die Wellenlängen und damit auch die Frequenz (Abb. 3.2).

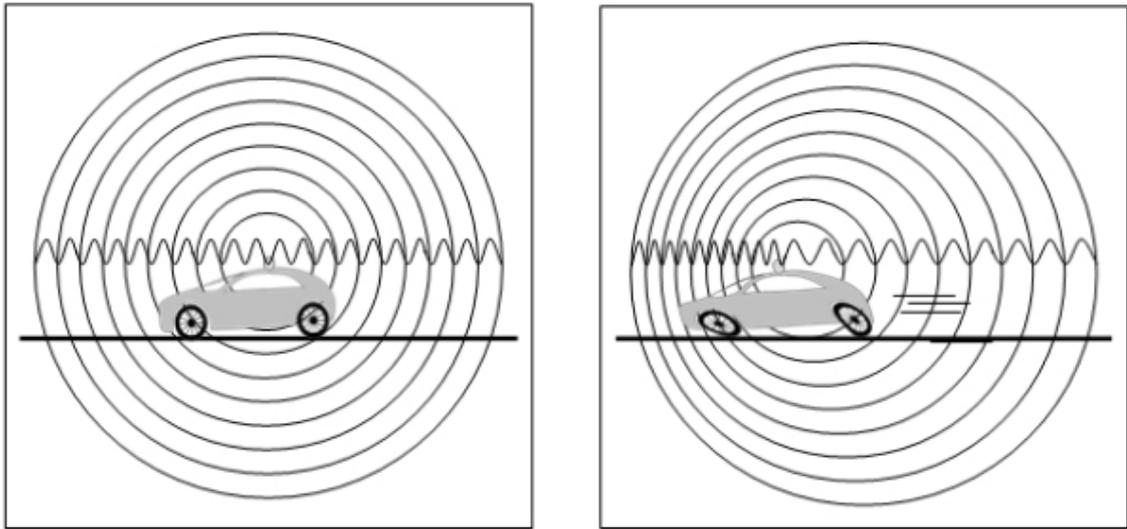


Abbildung 3.2 Doppler-Effekt bei bewegtem Sender (Fiedler, 2008)

Die Doppler-Verschiebung kann auch erfolgen, wenn sich die Position des Beobachters (Empfängers) relativ zur Schallquelle ändert (Abb. 3.3). Ist die linke Person in Abb. 3.3 in Ruhe, ziehen an ihr in der Zeit $\Delta T = T_2 - T_1$ vier Wellenberge des ausgesendeten Signals vorbei. Bewegt sich die linke Person hingegen auf die Schallquelle zu, ziehen an ihr in der gleichen Zeit sieben Wellenberge vorbei – die Frequenz ist also größer. (Fiedler, 2008)

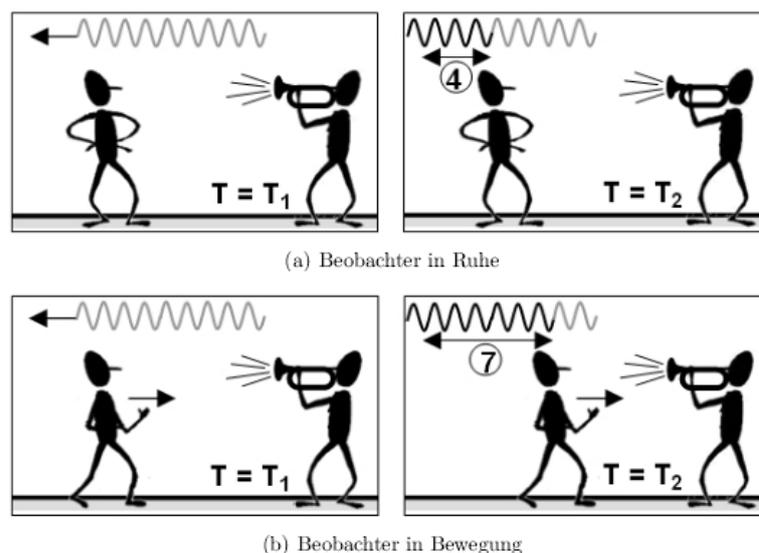


Abbildung 3.3 Doppler-Effekt bei bewegtem Empfänger (Fiedler, 2008)

Dieses im Alltag oft auftretende Phänomen der Frequenzverschiebung wird nach seinem Entdecker Doppler-Verschiebung genannt (Simpson, 2001). Der Unterschied zwischen ausgesendeter und empfangener Frequenz aufgrund von Relativbewegungen des Senders, des Empfängers oder des leitenden Mediums wird mit folgender Formel berechnet (Borucki, 1989) :

$$f_E = f_S * \frac{c \pm v_E * \cos \alpha \pm v_M * \cos \delta}{c \pm v_S * \cos \beta \pm v_M * \cos \delta} \quad (2)$$

f_E = vom Empfänger wahrgenommene Frequenz

f_S = ausgesendete Frequenz

v_E = Geschwindigkeit des Empfängers

v_S = Geschwindigkeit des Senders

v_M = Geschwindigkeit des leitenden Mediums

α = Winkel zwischen v_E und der Verbindungslinie Sender – Empfänger

β = Winkel zwischen v_S und der Verbindungslinie Sender – Empfänger

δ = Winkel zwischen v_M und der Verbindungslinie Sender – Empfänger

In der Abb. 3.4 wird der mathematische Zusammenhang grafisch dargestellt. Man kann hierbei erkennen, dass nur die Geschwindigkeitsanteile parallel zu der Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger eine Frequenzverschiebung verursachen.

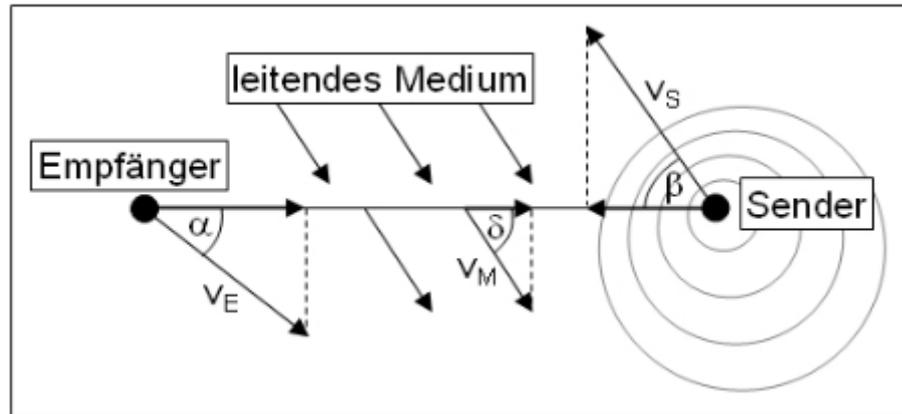


Abbildung 3.4 An der Doppler-Verschiebung beteiligte Geschwindigkeitsanteile (Fiedler, 2008)

Beispiel: Während eine Person auf einem nicht bewegbaren Platz steht, nimmt sie eine Frequenz von 10 kHz wahr. Wenn sie sich in die Richtung der Schallquelle bewegt, wird sie eine Frequenz von 10,1 kHz hören. Die Dopplerverschiebung beträgt daher 0,1 kHz. (RDI, 1996).

Das Maß der Frequenzverschiebung lässt sich nach (RDI, 1996) auch ganz allgemein formulieren:

$$\Delta f = f * \frac{v}{c} \quad (3)$$

f = Ausgesendete Frequenz [1/s]

v = Relativgeschwindigkeit (maßgebende Anteile nach Abb.3.4) [m/s]

c = Schallgeschwindigkeit [m/s]

Allgemein gilt für die Dopplerverschiebung:

- bei ansteigender Bewegungsgeschwindigkeit wird die Dopplerverschiebung grösser,
- sich vom Ton entfernen ergibt eine negative Dopplerverschiebung,
- bei Ansteigen der Frequenz (des Tones) steigt auch die Dopplerverschiebung an,
- bei Ansteigen der Geschwindigkeit nimmt die Dopplerverschiebung ab. (Morgenschweis, 2010)

3.5 ADCP Messtechnik

Die ADCP-Wandler senden Ultraschallimpulse, die im Wasser von Partikeln z.B. Schwebstoffen reflektiert werden. Die wichtigste Annahme für das ADCP Gerät ist, dass sich die Partikeln wie die Fließgeschwindigkeit des Wassers bewegen. Die gesendeten Ultraschallimpulse haben eine konstante Frequenz und sie werden durch die Partikeln im Wasser entweder absorbiert oder in alle Richtungen reflektiert. Ein kleiner Teil der Reflektion wird von den Wandlern wieder aufgefangen, welcher ausgewertet werden kann. Die Wandler empfangen den reflektierten Schall mit einer anderen Frequenz, als jene, welche sie ausgesendet haben, falls es zwischen Wandler und Reflektoren (Partikeln) eine Relativgeschwindigkeit in Richtung des Schallstrahls gibt (Radialgeschwindigkeit). Diese Frequenzverschiebung wird als Doppler-Verschiebung bezeichnet. Das ADCP-Gerät arbeitet dabei als Sender und Empfänger. (Adler, 1993)

Um die Strömungsgeschwindigkeiten zu ermitteln, spielen die Partikeln eine wichtige Rolle, da von diesen der reflektierte Schall vom Wandler gemessen wird, d.h. dass das ADCP Gerät nur im Wasser mit einem Mindestfeststoffanteil (Partikelanteil) funktionieren kann. Diese Bedingung ist bei natürlichen Gewässern erfüllt. Abb. 3.5 stellt einige Beispiele der Partikeln im Ozean dar.

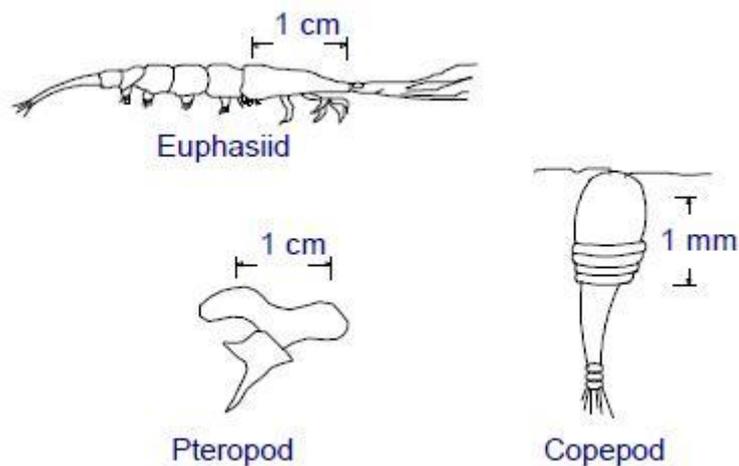


Abbildung 3.5 Die typischen Partikeln in Ozean (RDI, 1996)

3.6 Berechnung der Fließgeschwindigkeiten

Um die Fließgeschwindigkeit in einem Querschnitt zu berechnen müssen mehrere Schritte angewendet werden. Der erste Schritt hierbei ist die Relativgeschwindigkeiten zwischen dem Messgerät und den Partikeln in der Strömung zu messen. Die erfassten Relativwerte entsprechen den absoluten Strömungsgeschwindigkeiten, wenn das ADCP Gerät während der Messung in Ruhe ist. Wenn das ADCP Gerät während der Messung in Bewegung ist, muss diese Bewegung bei der Berechnung der absoluten Fließgeschwindigkeiten berücksichtigt werden. (Fiedler, 2008)

3.7 Erfassung der relativen Fließgeschwindigkeiten

Der gesendete Schall vom Wandler (Sender) wird von den Partikeln entweder absorbiert oder in alle Richtungen reflektiert (Abb. 3.6). Der größte Teil des Schalls wird nach vorne, unberührt durch die Partikeln wie Festkörper oder Gasblasen, nicht reflektiert. Ein geringer Bestandteil des Schalls wird zurück reflektiert und wird von Wandlern (Empfänger) empfangen.

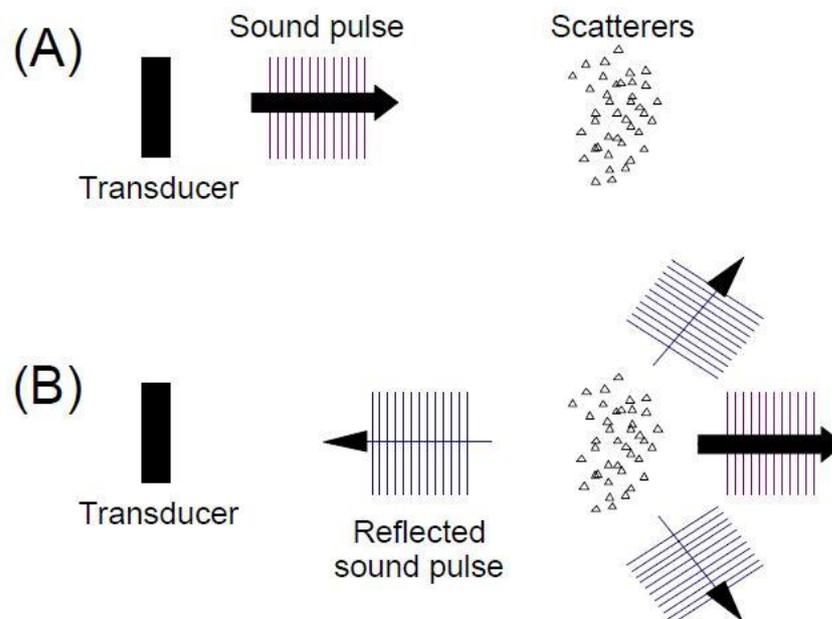


Abbildung 3.6 Zurückreflektierter Schall. (A) Gesendete Impuls, (B) eine geringe Menge der Schallenergie wird zurück reflektiert, die größte Menge der Schallenergie wird nicht reflektiert (RDI, 1996)

Wenn der akustische Impuls vom ADCP Gerät mit einer konstanten Frequenz gesendet wird, wird er mit einer niedrigeren Frequenz proportional zur relativen Geschwindigkeit zwischen dem ADCP Gerät (Wandler bzw. Sender) und den Partikeln aufgefangen (Abb. 3.6.A). Für das ADCP Gerät erscheinen die Partikel als Schallquellen, welche die Schallimpulse reflektieren (Abb. 3.6. B). Während des Wegs vom ADCP Gerät in der Wassersäule zu den Partikeln und zurück, erfährt der akustische Impuls eine zweifache Doppler-Verschiebung: das erste Mal bei der Reflektion der Partikel in der Strömung und das zweite Mal beim Wiederauftreffen auf dem Messgerät (Abb.3.7). Gleichung (3) muss demnach folgendermaßen modifiziert werden (RDI, 1996) :

$$\Delta f = 2 * f * \frac{v}{c} \quad (4)$$

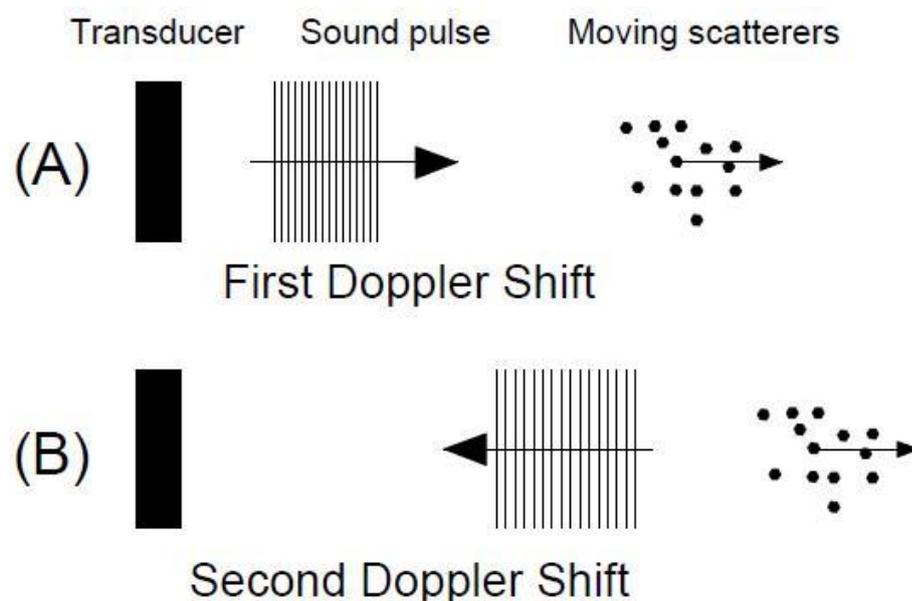


Abbildung 3.7 Rückgestreute Schall beinhaltet zwei Doppler-Verschiebungen, (A) ein im Weg zu den Partikeln und (B) eine zweite auf dem Weg zurück nach der Reflexion. (RDI, 1996)

Jene Anteile der Relativgeschwindigkeit, welche die Distanz zwischen Messgerät und Partikel verändert, wird eine Doppler Verschiebung erfahren, (Glg. 2 und Abb. 3.4). Wenn man ein akustisches Signal rechtwinklig zur Strömung aussendet, ist keine Änderung der Frequenz festzustellen, da die Partikel reflektiert und vom Messgerät empfangen werden. Deshalb werden akustische

Signale zur Geschwindigkeitsmessung immer schräg zur Hauptfließrichtung (Abb.3.8) ausgesendet. (Fiedler, 2008)

Der Winkel Φ zwischen den akustischen Signalen und der Strömungsrichtung muss dementsprechend in Glg. (4) implementiert werden, sodass sich schlussendlich folgende Formulierung nach (RDI, 1996) ergibt:

$$\Delta f = 2 * f * \frac{v}{c} * \cos(\Phi) \quad (5)$$

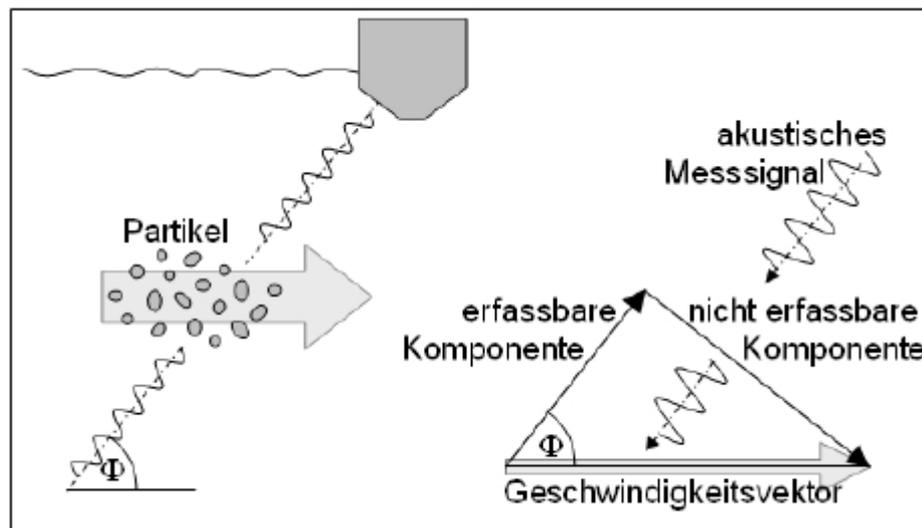


Abbildung 3.8 Auslenkung der ausgesendeten Messimpulse (Fiedler, 2008)

4. BreitBand Doppler Prinzip

In der Puls-Doppler-Messtechnik werden zwei grundsätzlich unterschiedliche Methoden zur messtechnischen Erfassung der Doppler-Verschiebung eingesetzt:

- die inkohärente Pulsmethode, bei der die Zeitverschiebung zwischen zwei aufeinander folgenden Ultraschallbündeln erfasst wird; dieses Verfahren wird auch als „broad band“ bezeichnet (Simpson, 2001)
- die kohärente Pulsmethode, bei der die Dopplerverschiebung des reflektierten Echos erfasst und analysiert wird; dieses Verfahren wird auch „narrow band“ genannt.

Bisher wurde die Doppler-Verschiebung in Bezug auf die Änderungen der Frequenz gesucht. Das BroadBand Doppler-Prinzip ist leichter im Sinne der Zeitdi-

lation zu verstehen d.h. in Bezug auf Änderungen des Signals in der Zeit anstatt der Frequenz. (RDI, 1996)

4.1 Doppler-Zeitdilatation

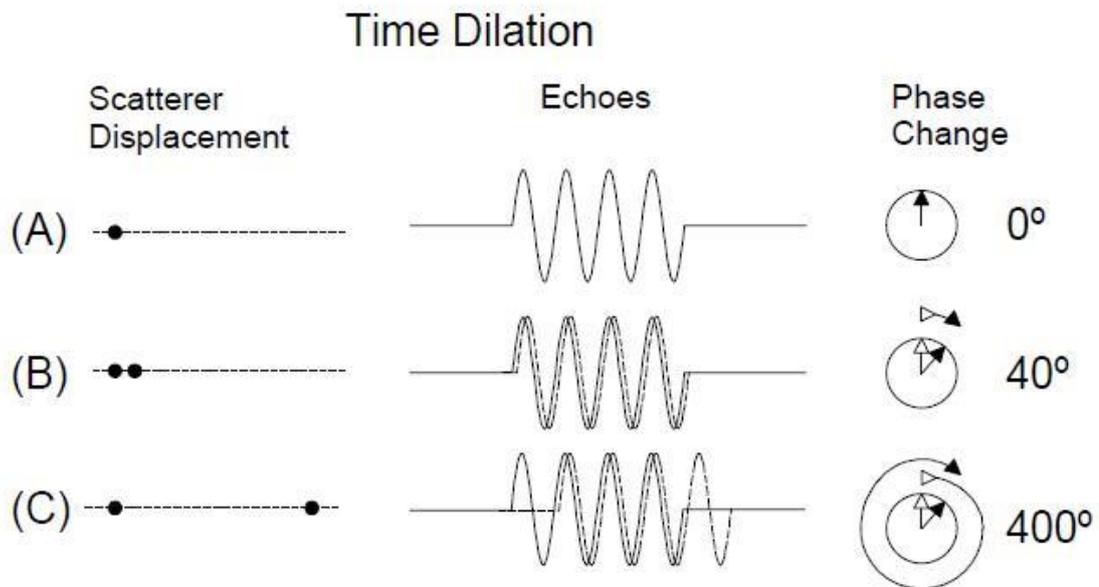


Abbildung 4.1 Laufzeitverzögerung und Phasenänderung verursacht durch Partikelverschiebung. (RDI, 1996)

Wenn man zwei übereinanderliegende Echos betrachtet, sieht man, dass es bei dem zweiten Echo länger dauert bis der Schall zurückkommt, da die Partikel weiter entfernt waren. Deshalb ist das zweite Echo zu dem ersten relativ verzögert. Das verzögerte Echo, welches mit einer gestrichelten Linie dargestellt ist, hat eine Phasenverzögerung von etwa 40° verglichen zu dem ersten Echo (Abb.4.1 B). Das zweite Echo ist etwa 10-mal mehr verzögert als jenes in Beispiel(B), weil sich das Teilchen etwa 10-mal weiter bewegt hat. Die längere Laufzeitverzögerung entspricht einer Phasenänderung von etwa 400° .

Diese Änderung in der Laufzeit, verursacht durch Änderungen der Distanz, wird Laufzeitverzögerung genannt. Die Laufzeitverzögerung ändert die relative Phase des Echos. Es gibt keine Laufzeitverzögerung, wenn das Teilchen am gleichen Platz bleibt.

Die Abstandsänderung verursacht eine Änderung in der Laufzeit oder eine Laufzeitverzögerung. Um ab zu schätzen, wie weit sich das Teilchen bewegt hat, muss man die Geschwindigkeit des Schalls kennen und die Laufzeitverzögerung messen. Die Geschwindigkeit des Teilchens kann man nur dann berechnen, wenn man die Verzögerungszeit zwischen den Schallimpulsen kennt. (RDI, 1996)

4.2 Phasen

Um die Laufzeitverzögerung zu messen verwenden Breitband ADCPs eine Phase, die ein geeignetes und präzises Mittel ist. Um die Phase zu verstehen, betrachtet man die Uhrzeiger. Eine Umdrehung des Stundenzeigers entspricht 360° der Phase. Ein vollständiger Zyklus (die Zeit von einem zum nächsten Spitzenwert) von einem sinusförmigen Schall entspricht 360° der Phase. Daher sind die Phasendifferenzen zwischen dem ersten und dem zweiten Echo etwa (A) 0° , (B) 40° , und (C) 400° , wie in (Abb. 4.1) dargestellt wird. Diese Phasendifferenzen sind genau proportional zu den Partikel-Verschiebungen. (RDI, 1996)

4.3 Zeitdilatation und Doppler Frequenz Verschiebung

Abbildung 4.2 zeigt, dass Frequenzverschiebung und Zeitdilatation äquivalent sind. Das Echo von zwei reflektierten Impulsen von einem stationären Teilchen wird in (Abb.4.2.A) dargestellt. Wenn sich das Teilchen von dem Wandler entfernt, erhöht sich die Zeit zwischen den Impulseechos (Abb. 4.2.B). Durch die Bewegung des Teilchens kommt es zu einer Verzögerung sowohl des Schalls als auch des Echos.

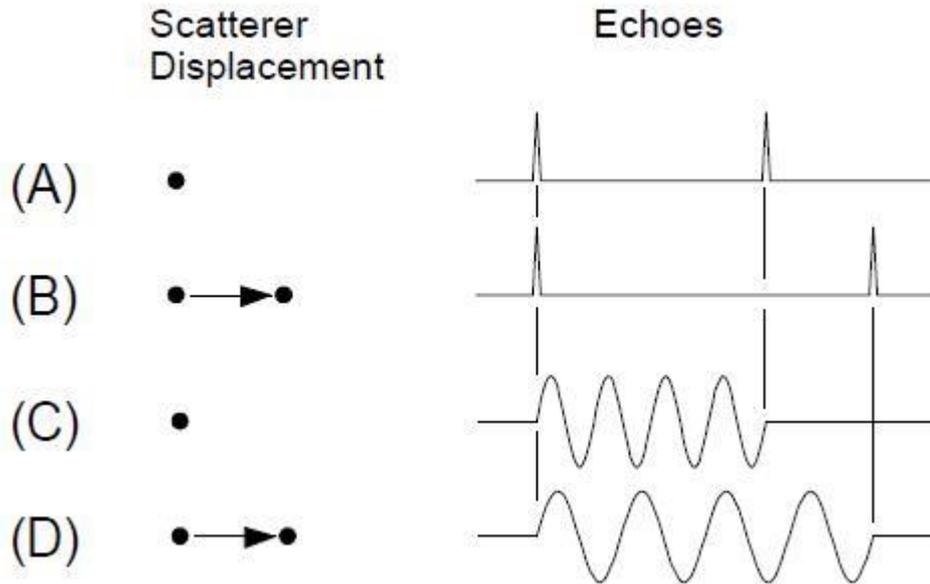


Abbildung 4.2 Zeitdilatation und Doppler Frequenz Verschiebung (RDI, 1996)

(A) und (B) stellen den Unterschied der Echos der Impulspaare aus stationären und beweglichen Teilchen dar. (C) und (D) zeigen dasselbe Verfahren für ein sinusförmiges Echo mit der gleichen Zeitdauer. Die gestrichelten Linien weisen darauf hin, dass die Dehnung sowohl für die Impulspaare als auch für das sinusförmige Echo äquivalent ist.

Viele Doppler-Messgeräte messen die Frequenzverschiebung direkt. Bei der Messung verwenden Breitband ADCPs die Zeitdilatation, die Veränderung der Ankunftszeiten von aufeinanderfolgenden Impulsen. Obwohl verschiedene Messmethoden verschiedene Ansätze umfassen, sind sie oft in Wirklichkeit mathematisch äquivalent. Anstatt die Frequenzänderung zu messen, verwendet RDI die Phase um Zeitdilatation zu messen, weil die Phase eine genauere Doppler-Messung bietet. (RDI, 1996)

4.4 Phase Messung und Mehrdeutigkeit

Weil die Phase nur in dem Bereich von 0° bis 360° gemessen werden kann, können aufgrund dessen bei der Messung Probleme entstehen. Sobald die Phase 360° erreicht hat, beginnt sie wieder bei 0° . Die Phasen von 40° und 400° ($400^\circ = 360^\circ + 40^\circ$) sind die gleichen, soweit es einen elektronischen umlaufenden Phasenmessungskreis betrifft.

Um das zu verstehen, betrachtet man wieder die Zeiger einer Uhr. Man könnte die Zeit mit einer Genauigkeit von etwa 1 Minute messen, ohne es zu wissen, welche Stunde es war, wenn man eine Uhr nur mit einem Minutenzeiger hätte. Im Gegensatz dazu, hätte man eine Uhr nur mit einem Stundenzeiger, würde man es eindeutig wissen, welche Stunde es war. Mit Hilfe der Minutenzeiger wiederum kann die Zeitgenauigkeit viel präziser ausgedrückt werden. Um genaue Messungen der Geschwindigkeit zu erhalten, müssen die Phasenmessungen sensibel auf Änderungen der Geschwindigkeit abgestimmt werden, ähnlich dem Minutenzeiger, der empfindlich gegenüber Veränderungen in der Zeit ist. Die Phase ist durch Vielfaches von 360° gekennzeichnet, welche mit dem Minutenzeiger zu vergleichen ist, da jener sich rund um die Uhr dreht

Um herauszufinden, wie oft die Phase 360° vorgekommen ist, benötigt man die Mehrdeutigkeitsauflösung. Die einfache Möglichkeit um Mehrdeutigkeitsphasen festzustellen, wäre bei einfachen Echos wie jene in Abb.4.2 bedeutend leichter. Die typischen Echos sind wesentlich komplizierter, wie es in Abb.4.3 gezeigt wird.

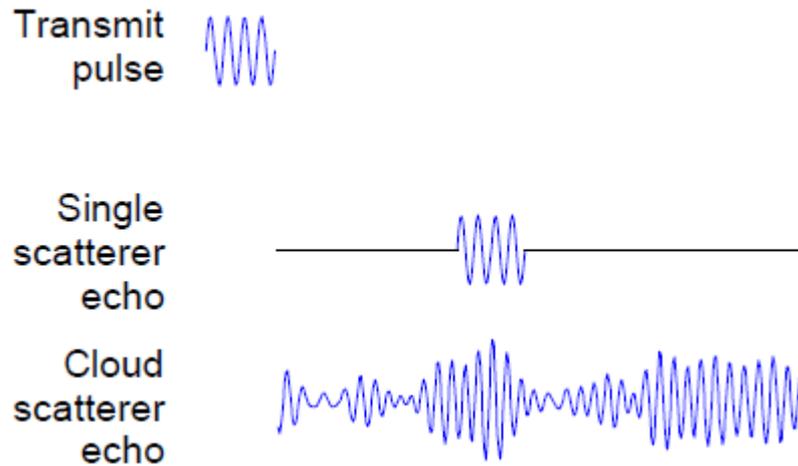


Abbildung 4.3 Das Echo aus einem einzigen Teilchen sieht gleich wie der Sendeimpuls aus aber das Echo aus einer Vielzahl der Teilchen ist kompliziert (RDI, 1996)

Um dieses Problem zu lösen, gibt es mehrere Möglichkeiten. Eine besteht darin, dass die Teilchen nicht genügend Zeit haben sollten, sich sehr weit zu verschieben. Aus diesem Grund muss die Zeit zwischen den Impulsen so klein wie möglich gehalten werden. Die Phase wird nicht stark verändert, wenn sich die Teilchen nicht allzu weit bewegen können. (RDI, 1996)

4.5 Autokorrelationen

Ein nützlich es mathematisches Verfahren um die Echos zu vergleichen ist die Autokorrelation. Autokorrelation ist eine Methode, welche effizient und effektiv für die Erkennung kleiner Phasenänderungen ist. Gut-korrelierte Echos sehen gleich aus im Vergleich zu den nicht korrelierten Echos. Die Verwendung einer Autokorrelations-Methode hilft, die komplizierten realen Echos zu verarbeiten und von diesen die Geschwindigkeit zu ermitteln. Vom Wandler werden in einer Reihe codierte Impulse gesendet, die alle nacheinander in einem einzigen langen Impuls sind. Davon erhält man viele Echos aus vielen Partikeln, die alle in einem einzigen Echo kombiniert sind. Man extrahiert die Laufzeitverzögerung durch die Berechnung der Autokorrelation bei der zeitlichen Trennungsverzögerung der codierten Impulse. Der Erfolg dieser Berechnung erfordert, dass die unterschiedlichen Echos von den codierten Impulsen (alle innerhalb des gleichen Echos vorhandenen) miteinander korreliert werden. (RDI, 1996)

4.6 ADCP Einstellungen

ADCP Geräte setzen eine Vielzahl von Einstellungen (Modi) mit unterschiedlichen Zeitverzögerungen und Pulsformen ein (Tabelle 2). Standard-Modi sind für Robustheit und Messgenauigkeit gewählt. Es gibt andere Modi, die oft noch robustere Messungen (beispielsweise nützlich im Hochwasser) oder genauere Messungen erzeugen. Um hochpräzise Messungen zu erhalten, verwendet man spezielle Modi. Diese Modi können aber nur in limitierten Umgebungsbedingungen funktionieren. Während man solche Modi zum Einsatz bringt, zum Beispiel, wenn die Strömung schneller oder turbulenter wird, können sie mit hoher Wahrscheinlichkeit versagen. (RDI, 1996)

Tabelle 2 Übersicht der Messmodi in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse im Messgebiet. (RDI,2009)

	Mode 1	Mode 12	Mode 11	Mode 13	Mode 5	Mode 8
Typical application	Fast water of all depths. Rough and dynamic situations. Good in streams too fast or deep for modes 5, 8 & 11 or where Mode 12 has problems.	Fast water of all depths. Good in streams too fast or deep for modes 5, 8 & 11. Good for deep, slow water. See Note 1.	Slow, shallow streams with velocities < 1.0 m/sec (depth dependant) with low shear and/or turbulence.	Slow, shallow streams where the Maximum Stream Depth is ≤ 1.0 meters and the Maximum Stream Velocity is < 0.25 m/s	Slow, shallow streams with velocities < 0.5 m/sec with low shear and/or turbulence.	Shallow streams with velocities < 1 m/sec and with moderate shear (rough bed) and/or turbulence.
Minimum recommended cell size (meters)	0.50* 0.25	0.25* 0.10	0.10 0.05	StreamPro ADCPs Only See Low Noise Mode/Water Mode 13	0.10 0.10	0.10 0.10
Recommended Cell Size (meters)	0.50 0.25	0.25 0.10	0.25 0.05		0.25 0.10	0.25 0.10
Single ping standard deviation (cm/s) (using rec. cell size)	13.62 13.64	6.24 6.95	0.74 1.34		0.33 0.44	3.34 5.15
First range cell (meters)	0.97 0.51	0.73 0.26	0.49 0.09		0.49 0.14	0.49 0.14
Minimum profiling range (meters) Bottom Mode 5	1.7 1.0	1.7 1.0	1.6 0.9		1.6 0.9	0.9 0.6
Minimum profiling range (meters) Bottom Mode 7	NA 0.7	NA 0.5	NA 0.3		NA 0.7	NA 0.3
Maximum profiling range (meters)	73.1 19.55	68.29 15.82	<8.0 <4.0		<8.0 <4.0	<8.0 <4.0
Maximum relative velocity (m/s)	10 m/sec	10 m/sec	1 m/sec (Depth Dependant)		0.5 m/sec	1 m/sec

* 600 kHz values are in bold font, and 1200 kHz values are in regular font.

Specifications are for 25 cm blank 600, 5cm Blank 1200, 10° C temperature, and 0.0 ppt salinity.

Note 1. Mode 12 table assumes 20 sub-pings (WO 20,4).

5. Dreidimensionale Strömungsgeschwindigkeitsvektoren

Bis jetzt wurde über das ADCP Gerät mit einem akustischen Strahl gesprochen, womit man nur eine einzige Schallgeschwindigkeitskomponente messen kann. Die gemessene Komponente ist parallel zum Strahl gerichtet. Um die Geschwindigkeit in drei Dimensionen plus zusätzliche redundante (und dennoch nützliche) Information zu erhalten, verwendet man ein ADCP Gerät mit vier Wandlern, dies wird unten erläutert. Wenn man davon ausgeht, dass die Fließgeschwindigkeiten gleichmäßig in Schichten von konstanter Tiefe sind, kann die Geschwindigkeit in drei Dimensionen bestimmt werden. (RDI, 1996)

5.1 Mehrere Wandler

Die Ermittlung der verschiedenen Geschwindigkeitskomponenten erfolgt durch ein ADCP Gerät mit mehreren Wandlern, die in verschiedene Richtungen weisen. Zum Beispiel, um die Ost und die Nord Komponenten zu messen, muss man ein ADCP Gerät mit einem Wandler im Osten und einem anderen Wandler im Norden haben. Wenn die ADCP Wandler in andere Richtungen weisen, können sie durch trigonometrische Umformungen in räumliche Geschwindigkeitsvektoren transformiert werden (Adler, 1993). Ein wichtiger Punkt ist, dass ein Wandler für jede Komponente erforderlich ist. Um drei Geschwindigkeitskomponenten (z.B. Osten, Norden und vertikal) zu messen, muss ein ADCP Gerät deshalb mindestens drei akustische Wandler haben. (RDI, 1996)

5.2 Strömungshomogenität in einer horizontalen Schicht

Bei der Verwendung trigonometrischer Beziehungen tritt ein Problem auf, um Ströme zu berechnen, weil die Wandler an verschiedenen Orten messen. Die trigonometrischen Beziehungen werden nicht funktionieren, wenn die Strömungsgeschwindigkeiten an verschiedenen Orten nicht dieselben sind. Ströme müssen horizontal homogen sein, das heißt, sie müssen in allen vier Wandlern gleich sein. Glücklicherweise ist im Meer, in den Flüssen und Seen, die horizontale Homogenität in der Regel eine vernünftige Annahme. (RDI, 1996)

5.3 Berechnungen der dreidimensionalen Geschwindigkeit mit ADCP

Abb. 5.1 zeigt, wie man drei Geschwindigkeitskomponenten ermittelt, die durch ein ADCP Gerät mit vier akustischen Wandlern gemessen worden ist. Von dem ersten Paar der Wandler erhält man eine horizontale Komponente und die vertikale Geschwindigkeitskomponente. Eine zweite senkrechte horizontale Komponente sowie eine zweite vertikale Geschwindigkeitskomponente erzeugen das zweite Paar der Wandler. (RDI, 1996)

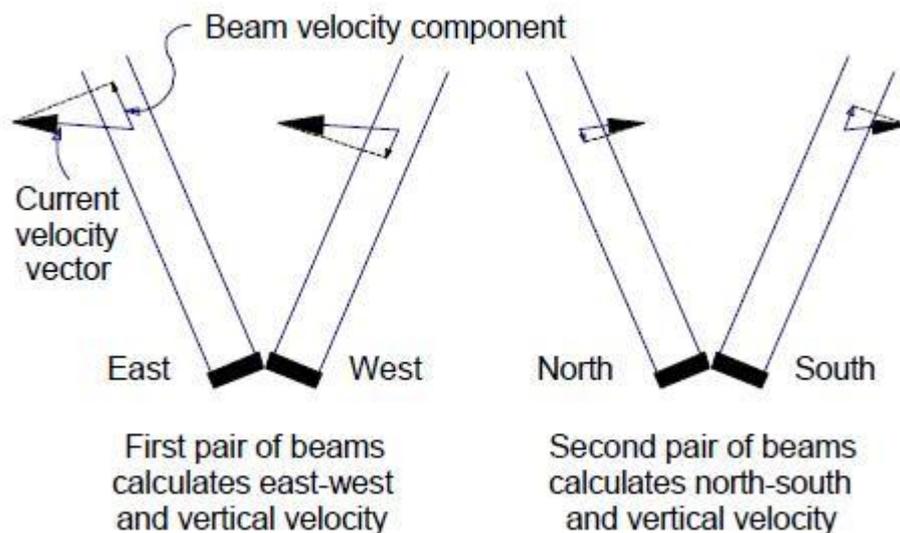


Abbildung 5.1 Das Verhältnis von Wandler und Erd-Geschwindigkeitskomponenten (RDI, 1996)

5.4 Geschwindigkeitsfehler

Die Differenz zwischen den zwei gemessenen Vertikalgeschwindigkeiten ist ein Geschwindigkeitsfehler. Um eine dreidimensionale Geschwindigkeit zu berechnen, sind nur drei Wandler erforderlich. Der vierte ADCP Wandler ist redundant, aber nicht überflüssig. Von der Datenredundanz hängt der Geschwindigkeitsfehler ab. Man kann durch die Annahme der horizontalen Homogenität den Geschwindigkeitsfehler testen. Sie ist ein wichtiges, integriertes Mittel, um die Datenqualität zu bewerten.

Zwei unterschiedliche Situationen sind in der Abb. 5.2 dargestellt. In der ersten Situation ist die Strömungsgeschwindigkeit, bei gleicher Tiefe, in allen vier Wandlern gleich. In der zweiten Situation ist die Geschwindigkeit in einem

Wandler unterschiedlich. In dem zweiten Fall wird der Geschwindigkeitsfehler im Durchschnitt größer als der Geschwindigkeitsfehler im ersten Fall sein. (RDI, 1996)

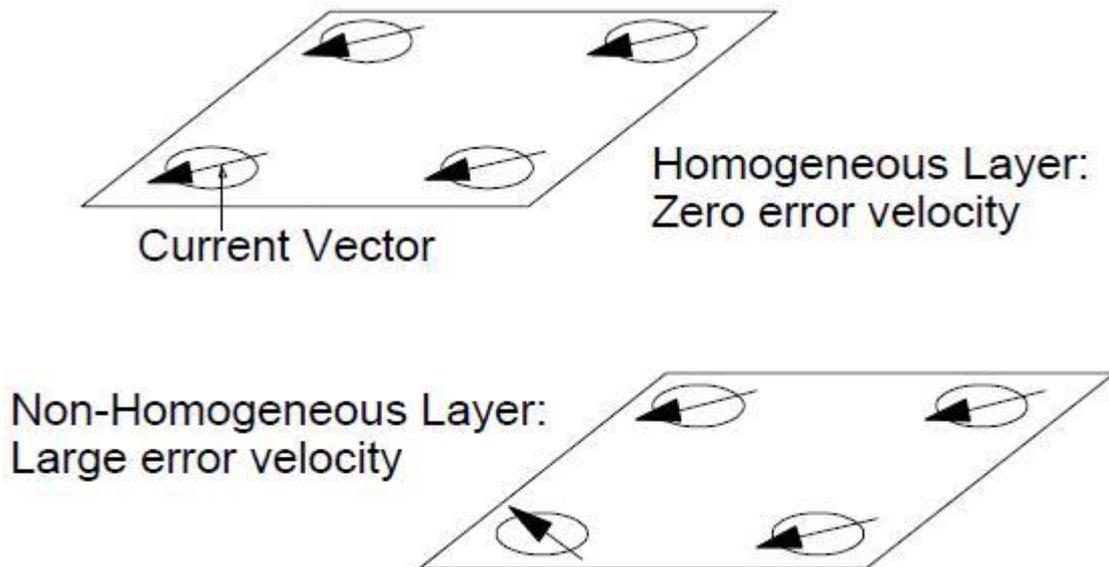


Abbildung 5.2 Inhomogene Strömung führt zu großen Geschwindigkeitsfehler (RDI, 1996)

5.5 Die Janus-Konfiguration

Die vier ADCP Wandler Konfiguration wird als Janus³-Konfiguration bezeichnet. Drei davon werden zur Berechnung der dreidimensionalen Relativgeschwindigkeit verwendet. Sie werden mit Hilfe der aufgezeichneten Kompassdaten in vektorieller Form (east-west, north-south, up-down) abgespeichert, wobei der Einfluss einer möglichen-vom geräteinternen Neigungsmesser erfassten-vertikalen Auslenkung des ADCP Gerätes (beispielweise durch Roll - und Stampfbewegungen des Trägergerätes auf der Wasseroberfläche) bei der Ermittlung der Geschwindigkeitsanteile berücksichtigt wird. (Fiedler, 2008)

³ Römischer Gott des Ein- und Ausgangs. Er hat zwei Gesichter und kann daher sowohl nach vorne als auch nach hinten blicken.

6. Geschwindigkeitsprofile

6.1 Tiefenzellen

Um den Durchfluss zu ermitteln, wird der Messquerschnitt in eine Vielzahl sogenannter Zellen unterteilt. Die Höhe der Zellen während der Messung ist konstant wählbar und die Breite der Zellen ist variabel, welche von der Schallimpulsfolge und der Bootgeschwindigkeit abhängt. Für jede Zelle wird ein Teildurchfluss ermittelt. Die Summe aller Teildurchflüsse ergibt den Gesamtdurchfluss. (Adler, 2008a)

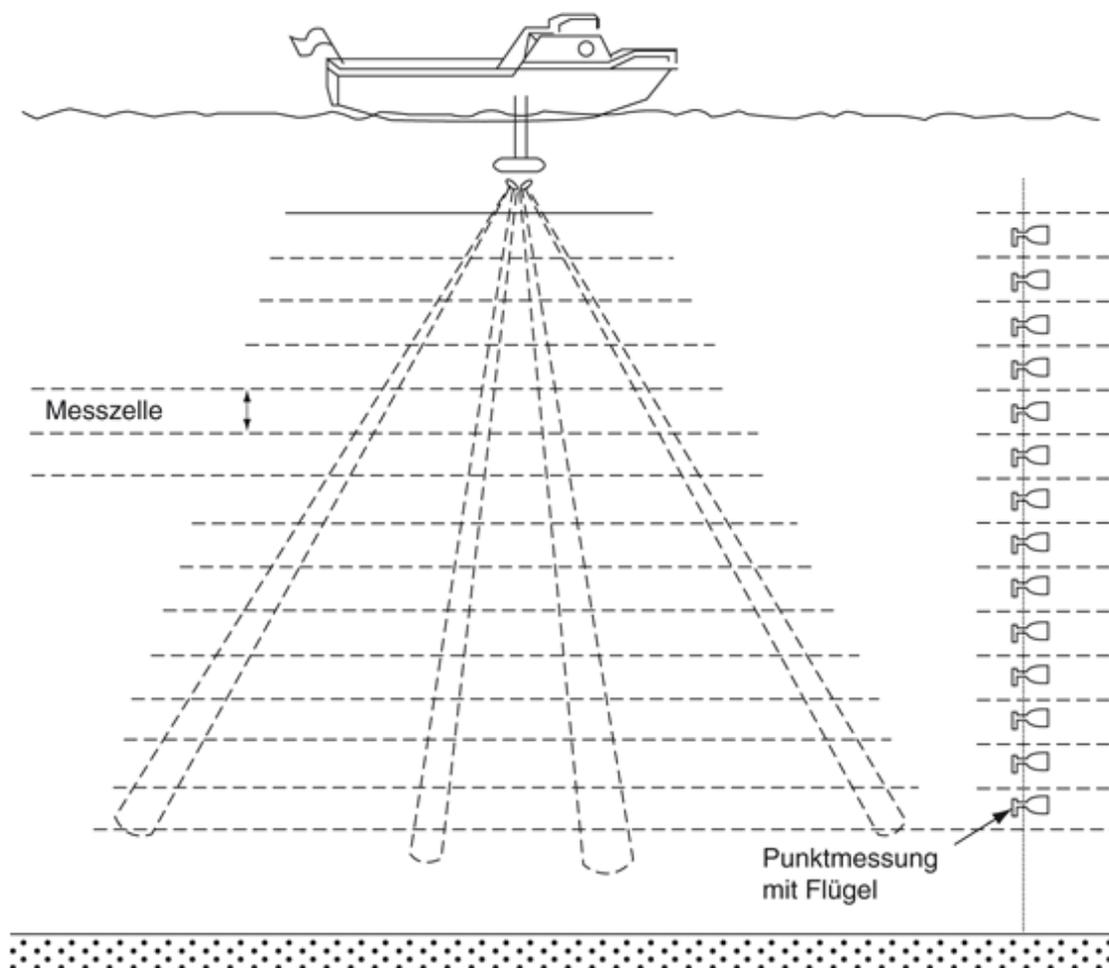


Abbildung 6.1 Vergleich zwischen ADCP Tiefenzellen und herkömmlichen Flügel (Boiten, 2008)

In Abb.6.1 sind die Darstellung der vier Schallwandler und die Unterteilung in Tiefenzellen dargestellt. Die Geschwindigkeit, welche für jede Zelle ermittelt

wird, ist die mittlere Geschwindigkeit. Um die Messung zwischen dem ADCP Gerät und dem Flügel zu vergleichen, ist für jede Zelle ein Flügel eingezeichnet. Sie messen die Punktgeschwindigkeit während das ADCP Gerät die Profilschwindigkeiten misst. Um die gleichen Ergebnisse wie beim ADCP Gerät im Tiefenprofil zu erhalten müssen in diesem Beispiel Flügel synchron gemessen werden (Boiten, 2008). Bei diesen zwei verwendeten Messsystemen gibt es zwei grundlegende Unterschiede. Sie müssen bei der Beurteilung von Vergleichsmessungen berücksichtigt werden:

- Bei dem ADCP-Profil ist der Abstand der Tiefenzellen gleichförmig angeordnet. Bei Flügeln hingegen kann der Abstand der Messpunkte unregelmäßig sein und der Abstand kann sich den hydraulischen Bedingungen vor Ort anpassen
- Die punktförmige Geschwindigkeit wird von dem hydrometrischen Flügel erfasst, während für eine Zelle die mittlere Geschwindigkeit durch ein ADCP Gerät ermittelt wird. (Morgenschweis, 2010)

6.2 Mittelungen über die Tiefenzellen

Im Gegensatz zu herkömmlichen Flügeln, welche die Geschwindigkeit in kleine lokalisierte Volumen des Wassers messen, müssen die ADCP Geräte es nicht machen. Stattdessen misst ein ADCP Gerät die durchschnittlichen Geschwindigkeiten über die gesamten Tiefenzellen. Diese Mittelung reduziert die Auswirkungen vom räumlichen Aliasing. Aliasing wird in Zeitreihen von hochfrequenten Signalen verursacht, welche wie niederfrequente Signale aussehen. (RDI, 1996)

6.3 Unterteilung in mehrere Tiefenschichten

Da im gesamten Messbereich die Fließgeschwindigkeiten und die damit auftretenden Frequenzverschiebungen nicht gleich sind, muss man zusätzlich noch wissen, in welcher Entfernung vom Messgerät die akustischen Signale reflektiert werden. Man kann diese Frage durch das so genannte Time Gating beantworten. Unter Miteinbeziehung der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und der Aufzeichnung zwischen Aussenden und Empfangen der Schallwellen wird die zurückgelegte Entfernung berechnet. All jene Daten, welche innerhalb eines

Zeitfensters ankommen, werden während der Rückstreusignale empfangen, aufgezeichnet und derselben Tiefenzelle zugeordnet (Abb. 6.2).

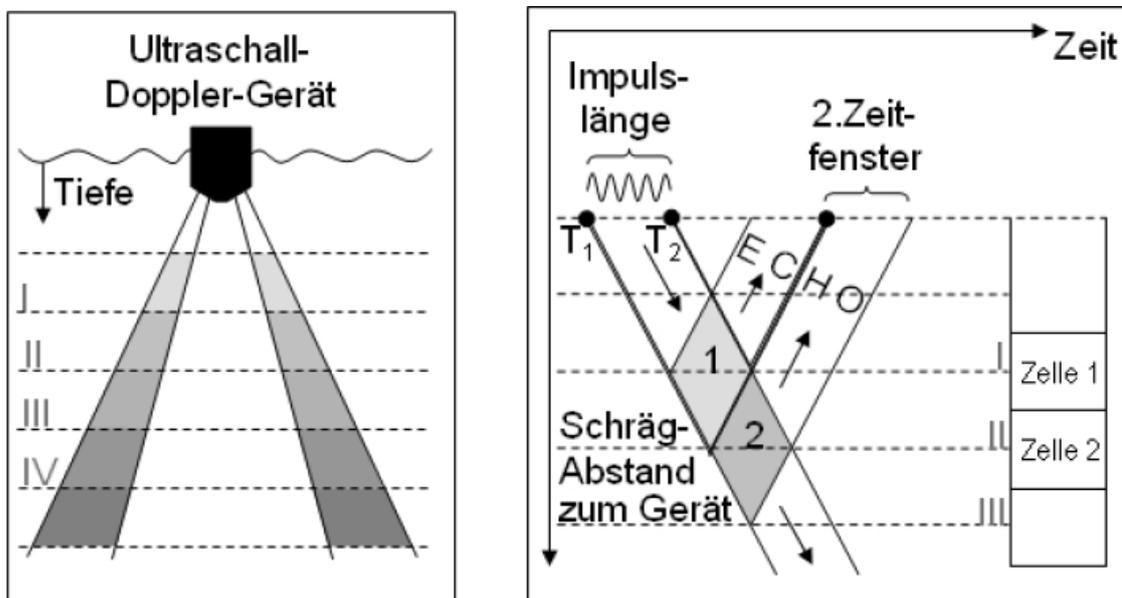


Abbildung 6.2 Unterteilung in Tiefenzellen durch Time Gating (Fiedler, 2008)

Da das ausgesendete akustische Signal eine gewisse Impulslänge aufweist, werden zu einer bestimmten Zeit T Reflexionen aus unterschiedlichen Entfernungen aufgezeichnet. Abbildung 6.2 veranschaulicht dieses Phänomen. Die Spitze des Impulses verlässt den Sender zum Zeitpunkt T_1 , das Ende verlässt den Sender zum Zeitpunkt T_2 . Der hintere Teil der Welle erreicht, aufgrund des Zeitversatzes, später eine bestimmte Tiefe als der vordere Teil der Welle.

Am Anfang des 2. Zeitfensters, werden sowohl Reflexionen aus der Tiefe II (vom Impulsanfang) als auch aus der Tiefe I (vom Impulsende) empfangen. Das ist der Grund, weshalb es zu einer Überlappung der einzelnen Tiefenzellen kommt. Dabei ist der Grad der Überlappung vom Verhältnis der Impulslänge zur Zellentiefe abhängig. Je größer die Zelltiefen und je kürzer die Impulse, desto kleiner die Überschneidungen. Die Situation in Abb. 6.2 entspricht ungefähr einem Verhältnis von eins. Die Informationen einer Zelle werden in diesem Fall vor der Mittelwertbildung dreiecksförmig gewichtet. Die Werte aus dem Zentrum der Zelle haben also eine größere Bedeutung als die Daten aus den Randbereichen. Die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeiten in den einzelnen Tiefenzellen ohne Wichtung erfolgt, wenn kurze Impulse und große Zelltiefen

vorliegen. Allgemein werden kurze Schallimpulse wie möglich verwendet, um hohe Tiefenaufösungen zu erhalten. (Fiedler, 2008)

6.4 Gewichtsfunktion für eine Tiefenzelle

Wo sich das Eingangssignal mit dem Ausgangssignal trifft, bilden sich diamantförmige Teilbereiche, die in Abb. 6.2 als „1“ und „2“ dargestellt sind. Die Partikeln, die sich in dem mittleren Bereich befinden, liefern bessere Signale als die, die sich am Randbereich des diamantförmigen Bereiches befinden. Bei der Bestimmung der durchschnittlichen Strömungsgeschwindigkeit sind daher die Partikeln, die sich im mittleren Bereich befinden, relevant. Die Geschwindigkeit der Tiefenzelle entspricht einem gewichteten Durchschnitt unter Verwendung der dreieckigen Gewichtsfunktion (Abb. 6.3). Es ist zu beachten, dass jede Tiefenzelle mit der benachbarten Tiefenzelle überlappt ist.

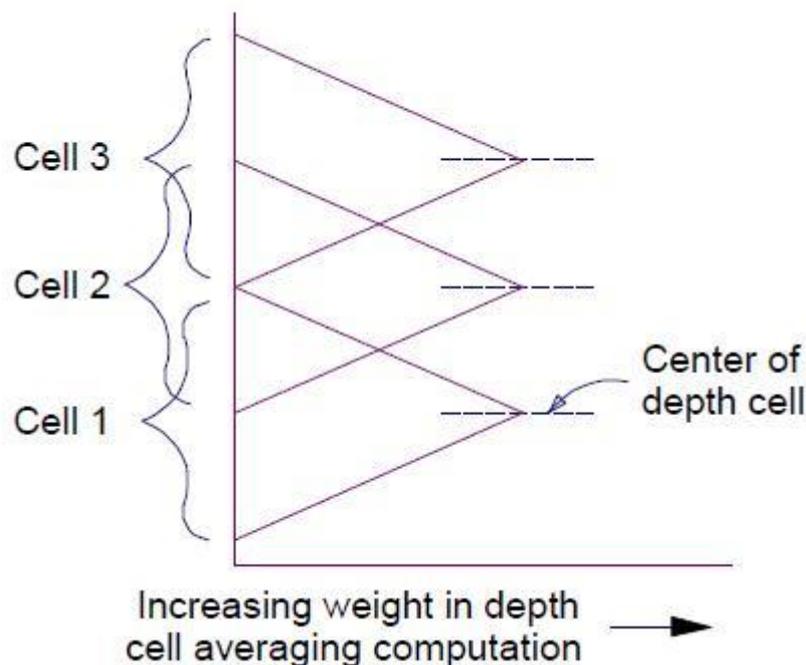


Abbildung 6.3 Tiefenzelle Gewichtsfunktionen (RDI, 1996)

Die oben dargestellte Gewichtungsfunktion gilt für die meisten normalen Situationen für Schmalband- und Breitband ADCPs. Die Form der Gewichtungsfunktion ändert sich, wenn die Sendeimpulse und Tiefenzellgrößen unterschiedlich sind. Eine Gewichtungsfunktion mit einer geringeren Überlappung entspricht einem kur-

zen Sendeimpuls, der relativ zu der Höhe der Zelle ist. Wenn der Sendeimpuls grösser als die Tiefenzelle ist, beträgt die Überlappung mehr als 15 %. (RDI, 1996)

7. ADCP Daten

Durch einen Breitband-ADCP werden Daten produziert. Diese beinhalten folgende vier unterschiedliche Arten von Standard-Profil-Daten:

1. Geschwindigkeit
2. Echointensität
3. Korrelation
4. Sohlaufnahme

Je nach Anforderungen können die Daten in einem der folgenden Formate aufgenommen werden:

1. Geschwindigkeit
 - Wandler Koordinaten – Geschwindigkeit wird parallel zu jedem Wandler ausgegeben.
 - Erdkoordinaten - Geschwindigkeiten sind in Nord-, Ost- und in vertikalen Komponenten umgewandelt.
 - ADCP Koordinaten – sind ähnlich wie Erdkoordinaten. Unterschied ist, dass die Geschwindigkeit in vorwärts-, seitwärts- und wiederum in vertikalen Komponenten, bezogen auf das ADCP Gerät, konvertiert sind (Abb. 7.1).

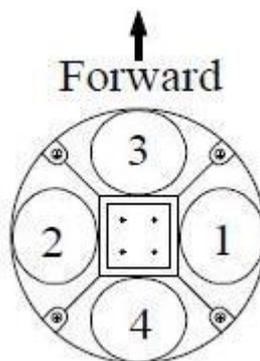


Abbildung 7.1 Aussicht eines ADCP Wandler. Der Aufbau ist der gleiche für konvexe und konkave Wandler (RDI, 1996)

2. Echointensität - die Einheit dieser Daten ist Connt bzw. Dezibel (dB). Die Daten werden aus dem Empfangssignalstärkeindikator(RSSI)-Schaltung erhalten.
3. Korrelation - ist ein Maß für die Qualität der Daten. Die Ausgangsdaten werden in Einheiten skaliert, mit dem erwarteten Korrelationswert von 128.
4. Sohlaufnahmen – Hier erfolgt die Messung der Wassertiefe (RDI, 1996).

8. Zufallsfehler und systematischer Fehler

Es gibt zwei Arten von Fehler: die systematischen und die zufälligen, welche die Unsicherheiten der Strömungsmessung beinhalten. Durch das Erhöhen der Anzahl der Pings pro Ensemble lässt sich die Auswirkung der zufälligen Fehler minimieren. Die Auswirkung der systematischen Fehler kann nur durch das Nachkalibrieren beseitigt werden. Der fehlerhafte Wert der Schallgeschwindigkeit, Einbaufehler, Fehler in der Konfiguration, unpräzise und unzureichende Korrekturen der Schiffsbewegung etc. sind einige Beispiele der systematischen Fehler (Cyseweski, 2011).

ADCP Single-ping Zufallsfehler oder kurzfristige Fehler kann von wenigen mm/s bis zu 0,5 m/s betragen. Die Größe dieses Fehlers hängt von internen Faktoren wie ADCP Frequenz, Tiefenzellgröße, Anzahl der zusammen gemittelten Pings und Wandler Geometrie ab. Zu den externen Faktoren gehören Turbulenzen, interne Wellen und die ADCP Bewegung.

Der systematische Fehler beträgt typischerweise weniger als 10 mm/s. Dieser systematische Fehler hängt von mehreren Faktoren, einschließlich Temperatur, mittlere Strömungsgeschwindigkeit, Signal/Rausch-Verhältnis, Wandler Geometrie, etc. ab. (RDI, 1996)

8.1 Wandler-Richtungsfehler

Ein Wandler-Richtungsfehler kann ein systematischer Fehler sein. Ein Wandler-Richtungsfehler entspricht einer Unsicherheit in der Wandler Richtung.

8.2 Mittelung von ADCP Daten

Ein ADCP System kann entweder im Datenerfassungssystem die Ensemblemittelwerte im Inneren des ADCP Geräts berechnen, oder es kann später berechnet werden.

8.3 Der Bearbeitungszyklus

Mittelungen werden durch die Ping-Rate begrenzt. Die Begrenzung streckt sich über folgende Punkten; wie schnell das ADCP Gerät die Daten erheben, verarbeiten und übertragen kann. Abb. 8.1 zeigt ein typisches Datenerfassungszyklus innerhalb des ADCP Geräts. Jeder Ping besteht aus fünf Phasen: Overhead, Sendeimpuls, Austastperiode, Verarbeitung und Ruhe. Die Zeit der Overhead-Phase wird zum Starten des ADCP Geräts verwendet. Des Weiteren findet sie Anwendung zum Initialisieren, Verarbeiten verschiedener Subsysteme (z.B. die Uhr, Kompass etc.) und zur Vorbereitung der Ping-Verarbeitung. Nach einer Impulsübertragung und einer kurzen Verzögerung, welche ein „Ringing“ des Gerätes bewirkt, beginnt das ADCP Gerät das Echo zu verarbeiten. Wenn die Verarbeitung des Echos abgeschlossen ist, geht das ADCP Gerät entweder in den Ruhestand, um die Batterie aufzuladen oder es beginnt einen weiteren Datensammlungszyklus. Nachdem alle Pings gesammelt wurden, berechnet das ADCP Gerät ein Ensemble-Mittelwert und überträgt die Daten an den internen Daten-Recorder. (RDI, 1996)

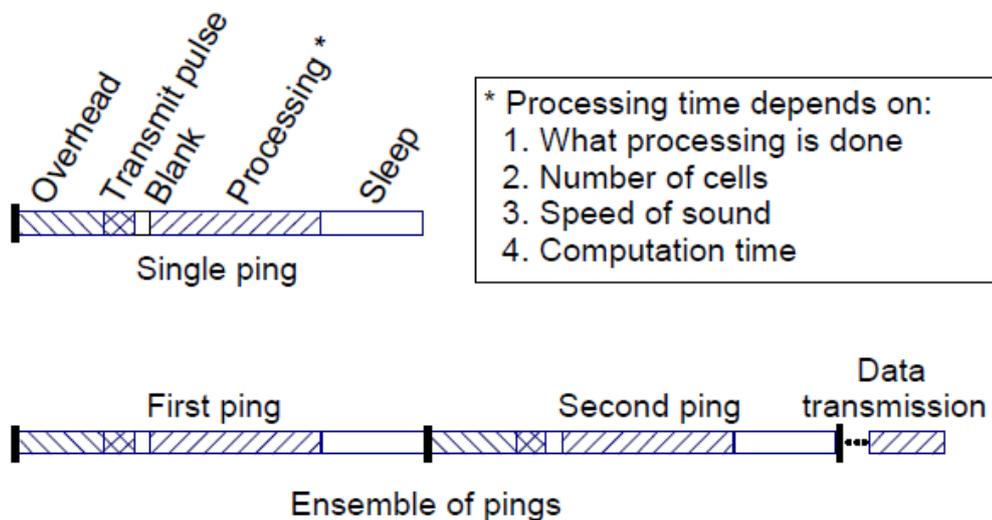


Abbildung 8.1 Schritte im Bearbeitungszyklus (RDI, 1996)

8.4 Kalibrierung

Eine entsprechende Einrichtung zur Kalibrierung und Überprüfung der Messgeräte gibt es schon für den klassischen hydrometrischen Flügel, welcher in den Schleppkanälen „geeicht“ werden kann. Im Gegensatz gibt es für die ADCP-Geräte bis heute keine entsprechenden Einrichtungen, um das Gerät zu kalibrieren und zu überprüfen. Die Herstellungsfirmen arbeiten weiterhin heute noch in der Entwicklung einer solchen Einrichtung (Hersch, 2009). Man kann die ADCP Geräte unabhängig einsetzen, egal ob es Lotrechtenverfahren oder Moving-Boat Verfahren sind. Den ersten Einblick in die Unsicherheit von ADCP-Messungen wird durch die Vergleichsmessungen festgestellt, welche mit einem hydrometrischen Flügel durchgeführt sind, weil dieses Gerät kalibriert werden kann. (Adler, 2008a)

8.5 Unsicherheiten von Moving Boat-ADCP-Messungen

Wenn man eine Messung mit Moving-Boat-ADCP (mobile ADCP) durchführt, müssen zusätzlich der Geschwindigkeitsvektor des Bootes und die Ausrichtung der Bootskoordinaten auf die feststehenden x-, y-, z-Achsen berücksichtigt werden. Deswegen ist die Ermittlung der Unsicherheit bei diesem Verfahren methodisch erheblich komplexer als bei Flügelmessungen. Seit dem Jahr 2008 sollte grundsätzlich das als Vornorm erschienene neue Konzept der Fehlerbetrachtung „Leitfaden zu Messunsicherheiten in der Hydrologie (HUG)⁴“ (DIN ISO/TS, 25377) genutzt werden.

In den letzten Jahren hat sich M. Muste von der Universität of Iowa intensiv mit der Genauigkeit von ADCP-Messungen befasst (Muste, M., Yu, K., Gonzales-Castro, J. u. Starzmann, E., 2004a,b). 2005 hat ebenso R. Marsden von Teledyne RDI eine umfassende Fehlerbetrachtung vorgestellt (Marsden, R., 2005), die jedoch zum einen noch nicht die Methodik von HUG berücksichtigt und zum anderen von einem nicht unabhängigen Firmenvertreter aufgestellt wurde.

⁴ ISO/CEN TS 25377: Hydrometric Uncertainty Guide (HUG). International Standards Organization: Geneva, 2007

In (Hersch, 2009) ist in Anlehnung an das HUG-Konzept eine qualitative Zusammenstellung aller Unsicherheitsquellen bei einer Moving-Boat-ADCP-Messung enthalten. Adler (Adler, 2008a) hat die Summe der ADCP-Einzelunsicherheiten in einer Gesamtgleichung nach HUG zusammengestellt und plädiert angesichts der sich ergebenden „monströsen“ Gleichung für die Anwendung von Typ A der HUG-Methodik, d.h. der statistischen Analyse von Feldmessungen, alles andere hält er für unpraktikabel. Die Bundesanstalt für Gewässerkunde (Deutschland) hat eine Ringversuchsmessung im Rhein bei Koblenz mit 44 verschiedenen ADCP-Geräten durchgeführt. In (Abb.8.2) kann man erkennen, dass von der Referenzmessung die überwiegende Mehrheit der Messungen lediglich um $\pm 2\%$ abweicht. Es gab nur zwei von 44 Messungen, bei denen die maximale Abweichung mehr als 4% betrug.

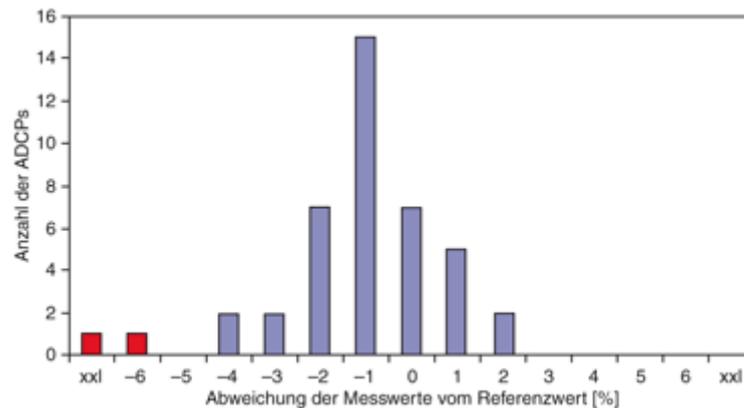


Abbildung 8.2 Häufigkeitsverteilung der Abweichung von ADCP-Messungen von einem Referenzwert beim BfG-Ringversuch 2007. (Adler, 2008a)

Detaillierte Auswertungen früherer Vergleichsmessungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde mit hydrometrischen Flügeln an Rhein und Mosel (Adler, 1992) ergaben folgende Ergebnisse:

- Reproduzierbarkeit der Messungen:

Die Abweichungen lagen bei maximal $\pm 1\%$.

- Ermittelte Durchflüsse:

Die Abweichungen in den Endergebnissen schwankten zwischen +2 und +3,6%. Die Durchflüsse, welche in beiden Fällen mit dem ADCP Gerät gemessen wurden, ergaben leicht höhere Werte. Nach (Adler, 1992) lie-

gen die Abweichungen innerhalb der Genauigkeit konventioneller Durchflussmessverfahren.

- Gemessene Strömungsgeschwindigkeiten:

Bei niedrigen Geschwindigkeiten erhält man praktisch gleiche Fließgeschwindigkeiten. Bei der Messung von hohen Geschwindigkeiten (1,7–2,0 m/s) mit dem ADCP Gerät bekommt man um 4% geringere Geschwindigkeiten als bei der Messung mit dem Flügel. Die Bemessungen über den Gesamtquerschnitt, welche mit dem ADCP Gerät durchgeführt sind, werden um 1% kleiner als jene mit dem Flügel sein.

- Gemessene Wassertiefen:

Wegen der Mittelwertbildung der gemessenen Wassertiefe hat diese einen systematischen Fehler. Die Toleranz für die Abschätzung der tatsächlichen Tiefen beträgt ca. 15 cm. Diese Toleranzen wirken sich bei Tiefen von 3 bis 4m auf den ermittelten Durchfluss von 2–3% aus.

In den USA wurden auch Messungen mit beiden Verfahren (Flügel und mobile ADCP) durchgeführt (Muste, M., Yu, K., Gonzales-Castro, J. u. Starzmann, E., 2004a,b). Sie wurden an 12 unterschiedlichen Messstellen mit Durchflüssen zwischen 21 und 1.690 m³ durchgeführt und die Abweichungen lagen zwischen 5-8%.

Die Vergleichsmessungen, welche in China am Yangtze durchgeführt wurden, ergaben eine Standardabweichung zwischen 6,5% und 7%. Während der Messung waren die Durchflüsse zwischen 5.000 und 65.000 m³/s. Die Wassertiefe lag zwischen 6 und 7m und die Geschwindigkeiten zwischen 0,45 und 3,62 m/s. Die Abweichungswerte wurden auf Werte zwischen 2% und 5% reduziert, wenn man beim ADCP Gerät eine DGPS und ein Magnetkompass benutzt (installiert) nach (Hersch, 2009).

In einem Erfahrungsbericht über ADCP-Messungen in Schweden wird auf Probleme mit ADCP-Messungen bei geringen Fließgeschwindigkeiten verwiesen (Jonson, 2006)

Aufgrund der zahlreichen Vergleichsmessungen auf der ganzen Welt kann man annehmen, dass die Messungen mit Moving-Boat-ADCP oder mit Flügelmessung sowohl bei den Fließgeschwindigkeiten als auch bei den Durchflüssen

gute Übereinstimmungen aufweisen. Lediglich systematisch leicht erhöhte Werte ergaben sich bei der Sohlprofilpeilung. Im Rahmen der aktuellen Studie wurde diese Annahme (Beschluss) auch von (Frizell, 2004) bestätigt.

Die angeführten Vergleichsmessungen belegen, dass ADCP-Messungen nach der Moving-Boat-Methode damit auf jeden Fall eine vergleichbare, wenn nicht höhere Genauigkeit als Flügelmessungen erreichen. (Morgenschweis, 2010)

9. ADCP Pitch, Roll, Heading und Geschwindigkeit

ADCP Geräte messen Strömungsgeschwindigkeit relativ zu dem ADCP Gerät. Das ADCP Gerät selbst kann beliebig ausgerichtet werden und sich relativ zur Erde bewegen. Daher ist es üblicherweise notwendig, die Daten für die ADCP Haltung und Bewegung zu korrigieren. Demzufolge wird es deutlich, warum die ADCP Datenkorrektur erforderlich ist und wie sie für die ADCP Bewegung und Haltung gemessen und korrigiert wird.

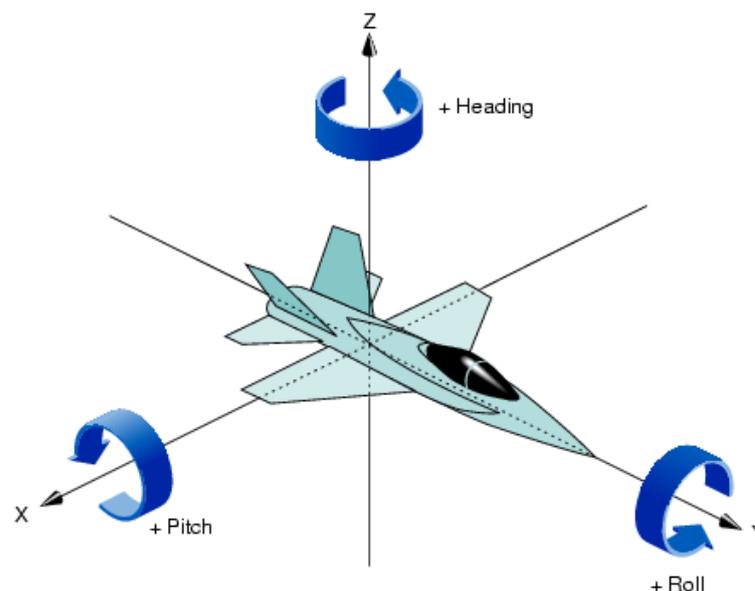


Abbildung 9.1 Pitch, roll und heading (http://techpubs.sgi.com/library/tpl/cgi-bin/getdoc.cgi/0650/bks/SGI_Developer/books/Perf_GetStarted/sgi_html/ch05.html)

Es gibt zwei Arten von Bewegung, die korrigiert werden müssen-Rotation (pitch, roll, und heading) und die Umsetzung (Bootgeschwindigkeit). Wie in Abb. 9.1 dargestellt. (RDI,1996)

9.1 ADCP Messung für Rotation und Translation

Das ADCP Gerät enthält vier verschiedene Sensoren:

- 4 Ultraschall-Wandler
- 1 Pendel
- 1 Magnetkompaß
- 1 Thermometer

Für die Durchflußmessung sind die vier Ultraschall-Wandler essentiell notwendig. Pendel, Kompaß und Thermometer sind Hilfssensoren. Diese werden verwendet, um Meßdatenqualität zu verbessern, während sie Zusatzinformationen liefern. Um die Stampf- und Rollbewegungen des Messbootes und eine ungewollte schräge Aufhängung des ADCP Geräts zu registrieren, wird das Pendel benötigt. Dadurch werden die Meßdaten entsprechend korrigiert. (Adler, 1993)

Um Rotation und Translation (Umsetzung) zu bemessen gibt es viele Möglichkeiten. Die folgenden werden häufig mit ADCP Geräten verwendet (RDI, 1996):

- Rotation (heading)
 - Erdinduktionskompass
 - Kreiselkompass
- Rotation (Pitch und Roll)
 - Neigungssensoren
 - Vertikalkreisel
- Translation
 - Sohlaufnahme
 - Navigationsgerät (d.h. GPS)
 - Annahme eine "Schicht ohne Bewegung" (Referenz-Schicht)

9.2 Stationäre ADCP Konfiguration

Um die Geschwindigkeiten zu erfassen, können ADCP Geräte prinzipiell für verschiedene Varianten eingesetzt werden. Für den Einsatz, bei denen Fließgeschwindigkeiten relativ langsam und unbeeinflusst von Oberflächenwellen sind, ist das stationäre-ADCP Gerät zu empfehlen (Abb. 9.2) (RDI, 1996). Zwei unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten gibt es, wenn man das Messprinzip zur kontinuierlichen Durchflussmessung nutzen will:

- Installation der Ultraschallwandler auf Gewässersohle und fortlaufende Abtastung des darüber strömenden Wasserkörper - vertikale ADCP.
- Installation des oder bei Mehrebenenanlagen der Ultraschallwandler senkrecht an einen der Ufer und Senden der Schallwellen in horizontaler Richtung in den Wasserkörper hinein. Horizontale ADCP oder Side Looking - ADCP. (Morgenschweis, 2010)

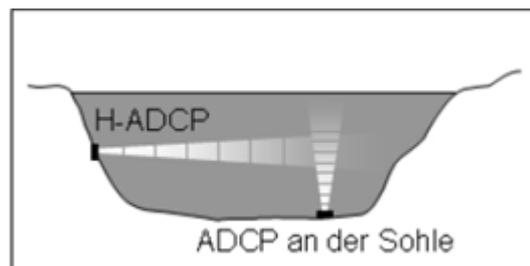


Abbildung 9.2 Stationäres ADCP Gerät (Fiedler, 2008)

Durch Messung mit einem stationären ADCP Gerät können nur Daten entlang einer Messlinie gesammelt werden. Es ist nicht möglich mit einem solchen Gerät die Messung im gesamten Fließquerschnitt durchzuführen, dafür benötigt man mehrere Messgeräte. Da das stationäre ADCP Gerät sich während der Messung in Ruhe befindet, entspricht die ermittelte Relativgeschwindigkeit den Absolutwerten der Fließgeschwindigkeit. (Fiedler, 2008)

9.3 Mobile ADCPs–Moving Boat ADCP

Ein mobiles ADCP Gerät, welches vier Wandler enthält, ist in Abb.9.3 dargestellt. Die Abstrahlwinkel des Schalls zur Vertikalen beträgt 20° , welche schräg nach unten in verschiedenen Richtungen weisen. Die Schallstrahlen verlaufen pyramidenförmig (Morgenschweis, 2010). Den Weg, welchen man mit dem

Boot von Ufer zu Ufer zurücklegt, kann beliebig sein. Die zurückgelegte Strecke kann sowohl schräg als auch zickzackförmig sein. Der Meßpfad muss nicht rechtwinkelig zur Strömung verlaufen, wie der bei der Flügelmessung. Die Bootgeschwindigkeit muss nicht gleichmäßig oder bestimmt sein. Die akustische "Abtastung" des Wasserkörpers unter dem ADCP Gerät erfolgt während der Fahrt. Die Messdaten werden in Echtzeit verarbeitet (Adler, 1993)

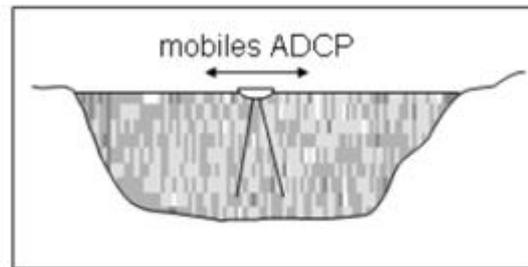


Abbildung 9.3 Mobiles ADCP Gerät (Fiedler, 2008)

9.3.1 ADCP-Geräteträger für das Moving Boat-Verfahren:

Nach Moving Boat-Verfahren findet die ADCP-Messung von der Wasseroberfläche aus statt. Knapp unter der Wasseroberfläche bewegt sich das ADCP-Gerät, welches ein Trägergerät benötigt, über den Messquerschnitt. Je nach Messbedingungen kommen dabei verschiedene Trägergeräte zum Einsatz. Nach (Adler, 2008a) sind folgende Grundsätze bei der Wahl des Geräteträgers zu beachten:

- Um die Strömungsrichtung korrekt zu ermitteln, muss der Magnetkompass unbeeinflusst sein, welcher im ADCP Gerät integriert ist. Er wird durch Eisen oder durch elektromagnetische Felder von Antriebsmotoren gestört. Deswegen sollten Boote oder Schwimmkörper möglichst aus Kunststoff oder Aluminium bestehen.
- Der Schutz des installierten Messgeräts ist äußerst wichtig, z.B. Bei Fahrten in Ufernähe soll das Gerät nicht beschädigt werden. Die Lösung liegt darin das Gerät in einem Messschacht zu installieren.
- Die ADCP-Sonde muss so tief eintauchen, dass keine Luftblasen von der Bootsahrt erzeugt und vor den Sensoren gespült werden, da dies zu Messausfällen führt.

Diese Grundsätze beachtend, wurde im Laufe der letzten Jahre eine Reihe von Geräteträgern entwickelt, die sich in der Praxis bei großen und kleineren Gewässern bewährt haben:

- bemannte Messboote verschiedener Größen aus Kunststoff (Abb.9.4) oder Aluminium (Abb.9.5 a, b). Sie werden am meisten in den größeren Gewässern verwendet, um die ADCP-Messungen durchzuführen. Die Messboote in den Abb.9.4. und Abb.9.5 sind trailerbar, d.h. sie können auf der Straße schnell von Messstelle zu Messstelle transportiert werden



Abbildung 9.4 Trailerbares Kunststoffboot mit ADCP-Messschacht. (Adler, 2008a)



Abbildung 9.5 Aluminiumboot als Geräteträger. a Messung mit Ausleger. b Messboot auf Trailer. (Morgenschweis, 2010)

- unbemannte ferngesteuerte Boote (Abb.9.6 a und b). Diese kommen z.B. bei Hochwasser Messungen zum Einsatz.



Abbildung 9.6 Ferngesteuertes Boot, Typ Q-Boat von Oceanscience. a ADCP-Gerät und Bootsantrieb b im Messeinsatz. (Morgenschweis, 2010)

- Schwimmkörper ohne Antrieb, die mit Seilkrananlagen oder von Brücken aus mit einem Seil über den Gewässerquerschnitt gezogen werden, z.B. der Trimaran „Riverboat“ von Oceanscience⁵ (Abb.9.7 a und b), der RiverCAT von SonTek (Abb.9.8), das StreamPro von RDI (Abb.9.9)

⁵ OceanScience, 105 Copperwood Way, Suite J. Oceanside, CA 92054, USA



Abbildung 9.7 Trimaran als ADCP-Geräteträger mit a 1200 kHz- ADCP Workhorse Rio Grande
b im Einsatz am Seil geschleppt von einer Brücke (Morgenschweis, 2010)

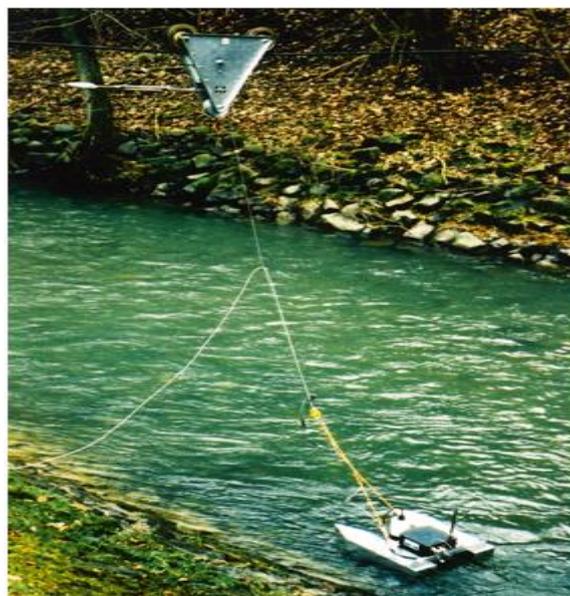


Abbildung 9.8 RiverCat als Geräteträger für ein SonTek Mini-ADCP montiert an einer Seilkran-
anlage (Morgenschweis, 2010)



Abbildung 9.9 Flachwasser-ADCP StreamPro. (Morgenschweis, 2010)

Die Messdaten werden sowohl beim ferngesteuerten Boot als auch bei den Schwimmkörpern ohne Antrieb per Funk an einen Laptop oder Handhold am Ufer zur Weiterverarbeitung gesendet. (Morgenschweis, 2010)

9.4 Messtechnische Erfassung der ADCP-Bewegung

Wie anfangs erläutert entspricht die ermittelte Relativgeschwindigkeit mit stationärem ADCP Gerät der Absolutgeschwindigkeiten. Um beim mobilen ADCP Gerät die Absolutgeschwindigkeiten der Strömung zu ermitteln, sind Informationen über die Bewegung des ADCP Geräts erforderlich. Diese können auf zwei verschiedene Arten erfasst werden:

- Geräteinterne Erfassung der ADCP- Bewegung und
- Erfassung der ADCP-Bewegung mit GPS (Fiedler, 2008)

9.4.1 Die Bootgeschwindigkeit

Das Meßboot kreuzt ein Gewässer von Ufer zu Ufer auf einem beliebigen Kurs. Dabei misst das ADCP Gerät gleichzeitig:

- die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten im Tiefenprofil,
- die Geschwindigkeit des Boots über Grund und
- die Wassertiefe.

Mit Hilfe des Doppler-Effekts wird die Bootsgeschwindigkeit, genauer gesagt die Geschwindigkeit des ADCP Geräts über der Flusssohle, analog der Strö-

nungsgeschwindigkeit bestimmt. Sie lässt sich aus der Dopplerverschiebung des an der Sohle reflektierten Schalls ermitteln. Durch das Kreuzen des Gewässers werden Messdaten über den gesamten Messquerschnitt erfasst. Die Geschwindigkeiten des Boots und der Strömung werden vektoriell, d.h. in Größe und Richtung, bestimmt. In Abb.9.10 a ist der willkürliche Messpfad eines ADCP-Bootes von Ufer zu Ufer dargestellt. (Adler, 1993)

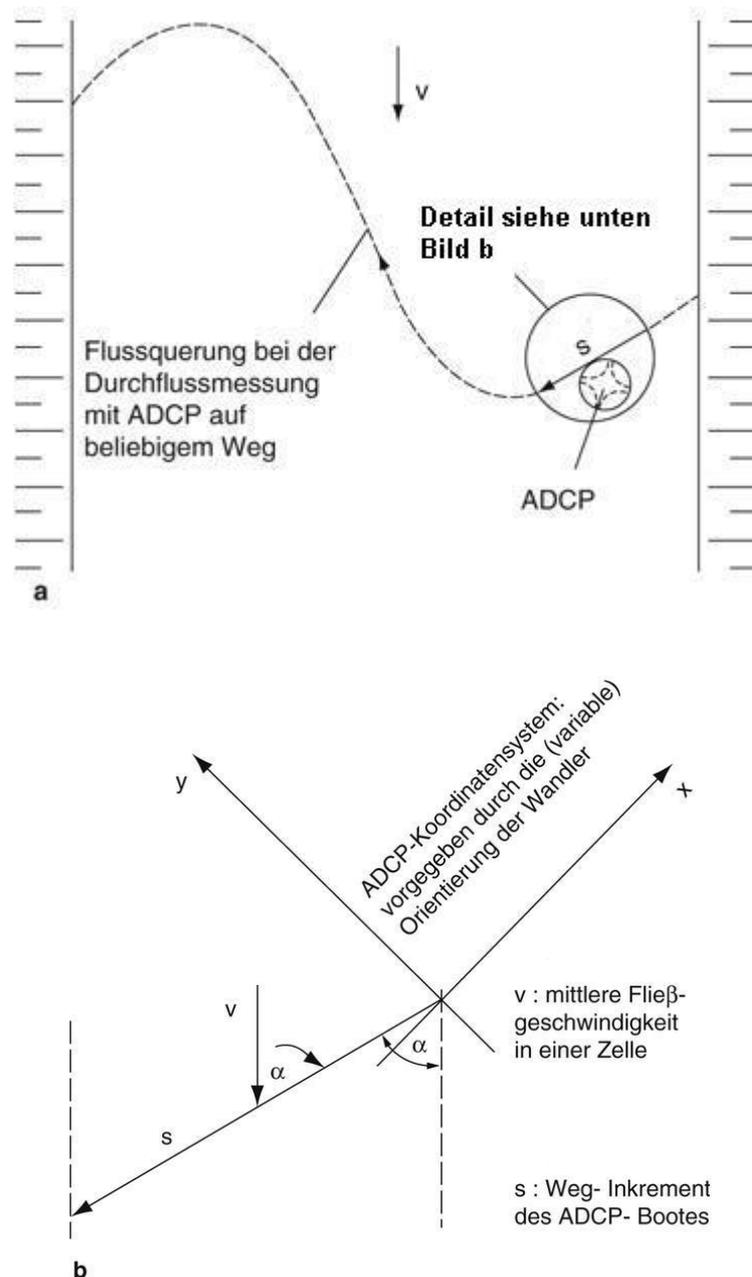


Abbildung 9.10 a Definitionsskizze zur Durchflussermittlung mit dem ADCP. b Detail zur Definitionsskizze (Adler, 1993).

Eingekreist ist ein Weginkrement zu Abb.9.10 b. Beide Bilder verdeutlichen:

- Durch die Orientierung der Wandler vorgegebene Koordinatensystem des ADCP Geräts dient zur Beschreibung der Vektoren \vec{v} und \vec{s} ,
- Anhand der Bootsgeschwindigkeit und Fahrzeit berechnet sich ein Weg-Inkrement \vec{s} , sowie
- der Winkel α zwischen dem Weg und den Geschwindigkeitsvektoren \vec{s} , und \vec{v}

Zum Durchfluss der Zelle q trägt nur die Komponente von v bei, die senkrecht auf dem Messweg s steht:

$$q = |\vec{v}| \cdot \sin\alpha \cdot |\vec{s}| \cdot \Delta h \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (6)$$

mit

q = Durchfluss einer Zelle [m^3/s]

\vec{v} = Geschwindigkeitsvektor [m/s]

\vec{s} = Weg-Inkrement [m]

α = Winkel zwischen \vec{s} und \vec{v}

Δh = Zellenhöhe [m].

Vektoriell geschrieben lautet Gl:

$$q = |\vec{v} \times \vec{s}| \cdot \Delta h \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (7)$$

Durch die Kombination des geräteinternen Kompasses mit den Rückstreuinformationen des Bottom Pings kann die geräteinterne Ermittlung des ADCP-Messpfades erfolgen. Damit kann man die Sohle abtasten, dabei wird das *Bottom Track*-Signal vom ADCP Gerät in jedem Messensemble ergänzend zu den *Water Pings* ausgesendet. Die Relativgeschwindigkeit zwischen der Sohle und dem ADCP Gerät wird aus der Doppler-Verschiebung des Sohlenechos ermittelt. In diesem Fall geht man davon aus, dass sich die Sohle in Ruhe befindet und die erfasste Relativgeschwindigkeit (v_{ADCP} in Abb. 9.11) durch die Bewegung des Messgeräts verursacht wird. Nur wenn kein Geschiebetrieb stattfindet und das ADCP Gerät die Sohle mit dem BT-Signal erfasst, kann das beschriebene Verfahren funktionieren. Wenn sich das Sohlmaterial in Bewegung befindet, kann die erforderliche Voraussetzung ($v_{\text{Sohle}} = 0$) nicht mehr eingehalten werden.

Das ADCP Gerät interpretiert die aus dem Geschiebetrieb resultierende Doppeler-Verschiebung als eigene Bewegung stromaufwärts (v_{ADCP}^* in Abb. 9.11). Werden die erfassten Relativgeschwindigkeiten zwischen dem ADCP Gerät und den Partikeln in der Strömung ($v_{Wasser (relativ)}$ in Abb. 9.11) mit dem verfälschten ADCP-Weg addiert, führt das zu einer Unterschätzung der Fließgeschwindigkeiten (v_{Wasser}^* in Abb. 9.11). (RDI, 1996)

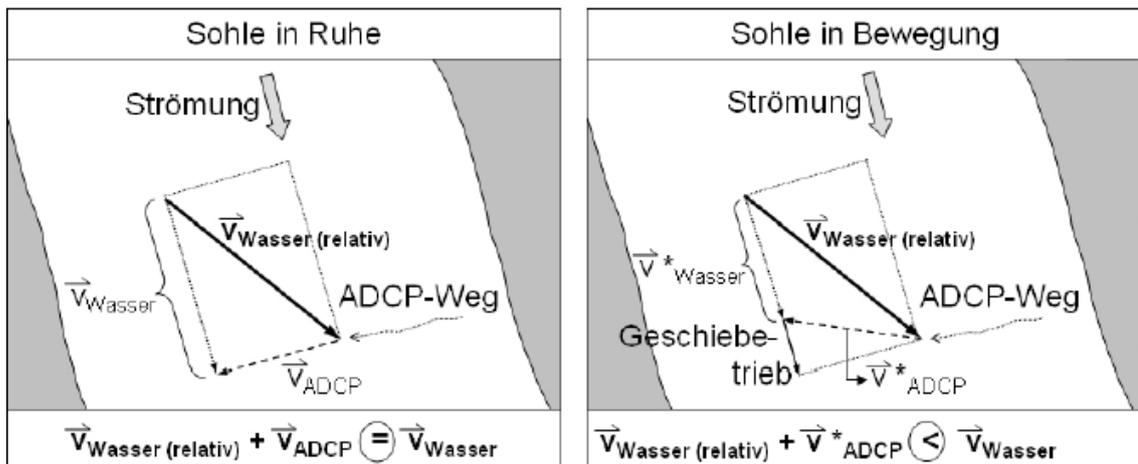


Abbildung 9.11 Beeinflussung der Fließgeschwindigkeitsermittlung durch Geschiebetrieb (Fiedler, 2008)

9.4.2 Erfassung der ADCP-Bewegung mit GPS

Mit externen Messgeräten kann auch die ADCP-Bewegung erfasst werden. Dabei kommt das Global Positioning System (GPS) in den meisten Fällen zum Einsatz. Das satellitengestützte Navigationssystem ist weltweit einsetzbar. Auf der Erde befinden sich 24 Satelliten sowie mehrere Kontrollstationen. Die Laufzeit zwischen Satellit und Messgerät kann man mit Hilfe von GPS-Empfängern erfassen und daraus den jeweiligen Gerätestandort berechnen. Um die eindeutige Lagebestimmung herauszufinden ist der Kontakt zu mindestens vier Satelliten erforderlich. Für die zivile Nutzung gibt es eine künstliche „Verschmierung“ (Selective Availability), welche sich auf zirka 15 m reduziert, dies hat militärische Gründe. Die Genauigkeit kann bis auf wenige Zentimeter, durch den Einsatz von Differential-GPS (dGPS), gesteigert werden (RDI, 1999). Zusätzlich zum beweglichen GPS-Gerät wird noch eine ortsfeste Station verwendet, welche dasselbe Satellitensignal wie die bewegliche Antenne empfängt. Der Fehler der GPS-Ortsbestimmung kann berechnet werden, und zur Korrektur der GPS-

Daten der beweglichen Antenne verwendet werden, da die geografische Position der Referenzstation bekannt ist. (Fiedler, 2008)

10. Echointensität und Reichweite

Das Signal, welches von den Schwebstoffen in der Wassersäule zurückgesteuert wird, ist schwächer als z. B vom Boden. Das zurückkommende Signal wird zunehmend abgeschwächt, wenn die Entfernung vom Strahler größer wird (Cysewski, 2011). Das Maß der Signalstärke des Echos, das der Sendeimpulses des ADCP Geräts rücktkehrt wird die Echointensität bezeichnen. Um die Konzentration von Zooplankton oder Schwebstoffe zu bestimmen, wird manchmal die Echo-Intensität verwendet.

Echo Intensität ist abhängig von:

- Schallabsorption
- Strahlausbreitung
- Sendeleistung
- Rückstreuoeffizient

Eine Gleichung für Echointensität ist:

$$EI = SL + SV + constant - 20\log(R) - 2\alpha R \quad (8)$$

wobei:

EI = die Echo-Intensität (dB)

SL = die Quelle-Ebene oder die Sendeleistung (dB)

SV = das Wasser-Massevolumen Rückstreuung Festigkeit (dB)

α = der Absorptionskoeffizient (dB / m)

R = der Abstand von dem Wandler zu der Tiefenzelle (Meter)

Weil die Messung relativ und nicht absolut ist, wird eine Konstante hinzugefügt. Das bedeutet, dass das ADCP Gerät Veränderungen in der Echointensität sieht. Der Wert „ $2\alpha R$ “ ist eine Annahme für die Absorption und der Wert „ $20\log(R)$ “ hingegen ist eine Annahme für die Strahlausbreitung.

Das Verhältnis von der Echointensität zur Partikelkonzentration hängt stark von der Partikelgröße ab und soll aus diesem Grund beachtet werden. Das bedeutet, dass die Beziehung zwischen der Echointensität und der Konzentration mit In-situ-Messungen zu kalibrieren ist.

Die maximale Reichweite des ADCP Geräts entspricht dem Ort, wo die Signalstärke auf einen Wert vergleichbar mit dem Geräuschpegel sinkt. Außerhalb dieses Bereichs kann das ADCP Gerät nicht mehr die genaue Dopplerverschiebung berechnen. (RDI, 1996).

10.1 Schallabsorption

Aufgrund von physikalischen und chemischen Prozessen in Wasser wird die Stärke des Echos durch die Absorption verringert. Wegen den chemischen Reaktionen ist die Absorption in den Ozeanen schneller als im Süßwasser. Die Absorption bewirkt im Einsatz eine lineare Reduzierung (proportional zur „ $2\alpha R$ “) der Echointensität, welche in dB gemessen wird. Die Absorption wird die Echointensität exponentiell mit zunehmender Reichweite verursachen. Die Schallabsorption (in dB/m) erhöht sich grob proportional zur Frequenz innerhalb des Frequenzbereiches, in welchem die ADCP Geräte (75 bis 1200 kHz, siehe Tabelle 3 oder Urick, 1983) agieren. Dadurch ergibt sich eine inverse Beziehung zwischen der Frequenz und der Reichweite. (RDI, 1996)

Tabelle 3 Schallabsorption (bei 4 ° C, 35 ‰ und auf Meereshöhe) und nominale Reichweite eines Breitband ADCP. Die aufgeführte Sendeleistung ist die maximale Leistung, die übertragen unterliegen Beschränkungen durch Schockbildung verursacht werden können.

Frequency (kHz)	α (dB/m)	Nominal Range (m)	@ Power (W)
76.8	0.022-0.028	700	250
153.6	0.039-0.050	400	250
307.2	0.062-0.084	120	80
614.4	0.14-0.20	60	30
1228.8	0.44-0.66	25	15

Die Schallabsorption Werte in Tabelle 3 angegeben, entstammen aus (Urick, 1983) und (Kinsler, 1980).

10.2 Strahlausbreitung

Die Strahlausbreitung ist eine geometrische Ursache für die Dämpfung des Echos. In der Gl. (6), wird die Strahlausbreitung als ein logarithmischer Verlust in der Echointensität mit zunehmender Reichweite (Entfernung) dargestellt, wobei die Echointensität in dB gemessen ist. In Lineareinheiten, sinkt die Echointensität proportional zum Quadrat der Entfernung. Mit dem Quadrat der Entfernung vom Wandler steigt die beschallte Fläche. Es werden dadurch zwar mehr Partikeln getroffen, die Intensität des zurückkehrenden Echos direkt zum Strahler ist jedoch wegen der Streuung um ein Viertel kleiner (Abb.10.1). (Cysewski, 2011)

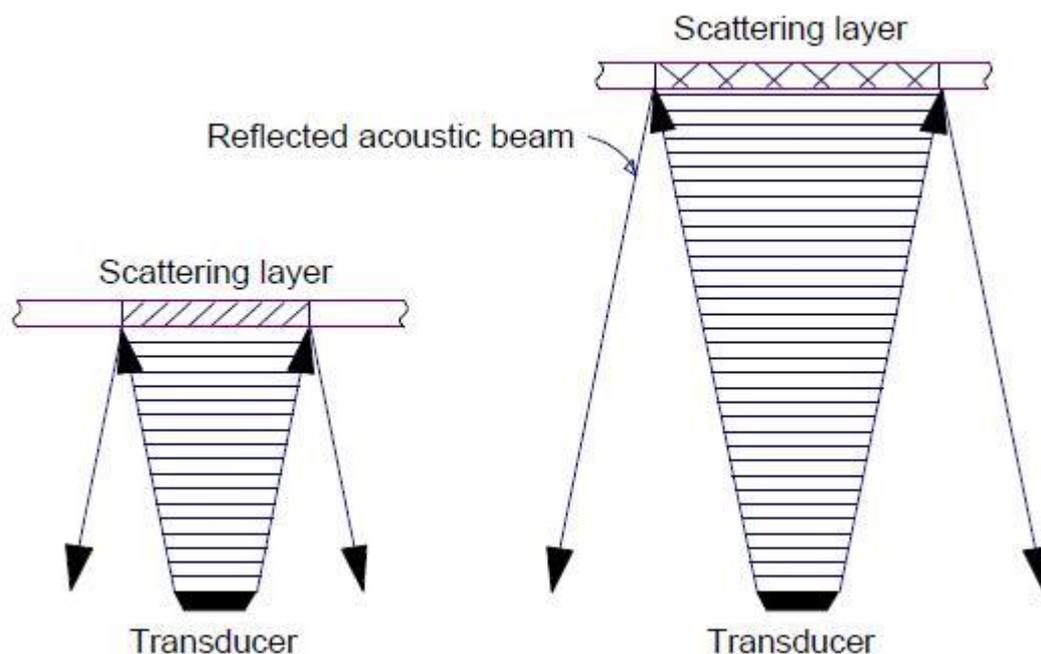


Abbildung 10.1 Entfernung - Verhältnis Signaldämpfung (RDI, 1996)

10.3 Partikeln

Die Konzentration der Partikeln in einem Bereich bewirkt, dass mehr Partikeln Schall reflektieren. Der dominierende ozeanische Partikelschall an den ADCP Frequenzen ist Zooplankton mit einer Größe von einem Millimeter (Abb. 3.5). Andere Partikeln sind Schwebstoffe, Gerölle und Dichtegradienten. Gelegentlich, reduziert der Mangel an Partikeln im Wasser den Bereich relativ zu dem Nennbereich. Das Institut für Meereswissenschaften (Wormley UK) hat eine

Kreuzfahrt in der Nähe Mauritius durchgeführt und dort war der Bereich rund ein Drittel der Nennbereich. Die Messung wurde mit einem RD-VM0150 durchgeführt. Solche Fälle sind selten auftretend, es macht weniger als 10% der Messungszeit aus. Die ADCP Geräte, die in Tiefen unterhalb von 1200 m eingesetzt werden, nehmen oft reduzierte Bereiche auf, welche weniger als ein Drittel des Nennbereichs sind. (RDI, 1996)

11. Schallgeschwindigkeit

Salzgehalt, Temperatur und Tiefe (Druck) sind die primären Faktoren, von welchem die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Ultraschallwellen in Wasser abhängt. Geschwindigkeitsdaten werden in mm/s Einheiten ausgegeben. Der Geschwindigkeit-Skalierungsfaktor ist proportional zu der Schallgeschwindigkeit, die an dem Wandler gemessen wird. Das ADCP Gerät berechnet automatisch die Schallgeschwindigkeit aufgrund der gemessenen Temperatur und eines angenommenen Salzgehalts. Wenn der angenommene Salzgehalt falsch ist, kann die Geschwindigkeit der Schallgeschwindigkeit in der Nachbearbeitung unter Verwendung der folgenden Gleichung korrigiert werden

$$V_{Corrected} = V_{uncorrected} * (C_{real}/C_{ADCP}) \quad (9)$$

Wobei:

C_{real} = die wahre Schallgeschwindigkeit am Wandler

C_{ADCP} = die, vom ADCP Gerät aufgezeichnete, Schallgeschwindigkeit

Man kann die folgende Gleichung (Urick, 1983) verwenden, um Schallgeschwindigkeit zu berechnen:

$$C = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016D$$

Gl. (10)

C = Ultraschallgeschwindigkeit in mm/s

T = die Temperatur in °C

S = Salzgehalt in Promille (‰)

D = die Tiefe in Metern

11.1 Schichtung in Wasser

Nicht alle Gewässertypen sind vertikal durchmischt wie z.B. ein Gebirgsfluss. Im Meer können sich durch einige Vorgänge horizontale Schichten mit verschiedenen Dichten, Temperaturen und Salzgehalten bilden. Aufgrund schwacher Leistung, die durch diese Schichtung verursacht wird, können sich einige Frequenzen der ADCP Geräte nicht durchdringen und daher die Strömungsmessung unmöglich gestalten. Manchmal reicht ein Sturmereignis, um diese Schichtungen aufzulösen und die Messung kann mit demselben ADCP Gerät ohne Probleme durchgeführt werden. (Cyseweski, 2011)

11.2 Änderungen der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe

Obwohl sich die Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe ändert, bleibt die horizontale Komponente der Strömungsmessung mit dem ADCP Gerät gleich. In Abb.11.1 ist die Änderung der Schallgeschwindigkeit mit der Tiefe dargestellt, welche Refraktionen oder Beugungen bewirken. Sie lassen die horizontale Komponente unverändert bleiben. Dass die horizontale Wellenzahl beim Passieren durch horizontale Grenzschichten unverändert bleibt, basiert auf einem theoretischen Hintergrund, welchen die Snell's Gesetze liefern. Die Messung der horizontalen Geschwindigkeiten bleibt unbeeinflusst, weil die Frequenz und ebenfalls die horizontale Komponente der Schallausbreitungsgeschwindigkeit konstant bleiben. Die Veränderungen der vertikalen Komponente der Strömungsgeschwindigkeit sind aber proportional zur Änderung der Schallgeschwindigkeit. (Cyseweski, 2011)

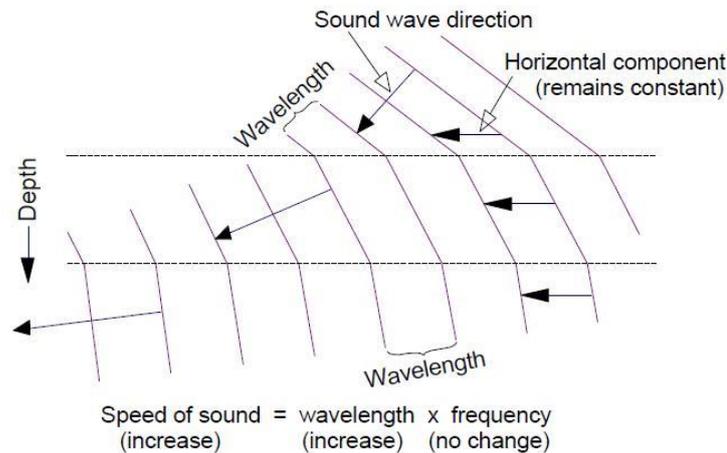


Abbildung 11.1 Veränderung der Schallausbreitung abhängig von der Tiefe. Die horizontale Komponente der Schallgeschwindigkeit bleibt jedoch durch die Reflexion unverändert. (RDI, 1996)

11.3 Korrektur der Tiefe und der Zellentiefe für Geschwindigkeitsänderung

Dass die Schallgeschwindigkeit konstant über der Wassersäule ist, ist eine Annahme, welche das ADCP Gerät verwendet, um Tiefenzellorten zu berechnen. Dieser Ansatz wird vom ADCP Gerät automatisch für den Wandler mit Abstrahlwinkel (20° oder 30°) berücksichtigt. Wenn der Bereich groß ist und die Schallgeschwindigkeit sich von der Geschwindigkeit am Wandler unterscheidet, kann die Tiefe jeder Tiefenzelle korrigiert werden. Wenn die Schallgeschwindigkeit im Profil bekannt ist, besteht eine entsprechende Vorgehensweise aus folgenden Schritten:

- Bestimmung der Position der ersten Tiefenzelle
- Ermittlung der Länge der Tiefenzelle unter Verwendung der Gleichung:

$$L_{corrected} = L_{uncorrected} * (C_{ADCP}/C_{real}) \quad (11)$$

wobei:

L = die Tiefenzellenlänge.

- Verwendung der oben Tiefenzellenlängen, Bestimmung die Position der nächsten Tiefenzelle.
- Wiederholung diesen Vorgang für alle Tiefenzellen. (RDI, 1996)

12. Wandler

Für die Datenqualität ist die Qualität der Wandler entscheidend. Deswegen stellen die ADCP Geräte außergewöhnlich hohe Anforderungen an die Wandler. Sie müssen direktional (einschließlich der beiden schmalen Abstrahlwinkel und unterdrückt Nebenkeulen) und effizient sein. Das BreitBand Prinzip erfordert 25-50% Abstrahlwinkel und für tiefe Einsätze ist es notwendig, dass der Wandler extremem Drücken standhält. Im Folgenden werden die Eigenschaften der Wandler beschrieben, insbesondere solche, die die Messung beeinträchtigen.

Die aktiven Elemente in Wandlern, die piezoelektrische Keramikscheiben, die entweder Expandieren oder Kontrahieren unter dem Einfluss eines elektrischen Feldes. Das elektrische Feld wird durch dünne Schichten aus Silber auf den Oberflächen der Keramik aufgebracht. Wenn eine Spannung angelegt wird, wird die Platte dicker oder dünner, je nach Polarität der Spannung. Die keramische Platte ist mit Polyurethan in einer Metallschale mit einem reflektierenden Grundmaterial vergossen. Stationäre ADCP Geräte sind für hohe Drücke ausgelegt, unter der Verwendung eines inkompressiblen Trägermaterials, sodass der Wandler dem Druck standhält. (RDI, 1996)

12.1 Wandler Abstrahlwinkel

Das Wandlermuster zeigt die Stärke des übertragenen Schalls als eine Funktion des Winkels an. Der Winkel wird gegenüber der Wandlerachse gemessen. Die Strahlmuster sind reziprok, sodass sie ebenso für die Empfindlichkeit des Wandlers zum ankommenden Schall als eine Funktion der Richtung repräsentiert werden können.

Der Winkel Φ wird größer, je steiler die Messstrahlen zur Strömungsrichtung angeordnet werden. Mit steiler werdender Anordnung der Messstrahlen zur Strömungsrichtung werden die über den Doppler-Effekt erfassbaren Geschwindigkeitskomponenten kleiner. Des Weiteren werden die Ungenauigkeiten der Geschwindigkeitsmessung größer. Bei der Wahl eines kleineren Winkels wird der messtechnisch nicht erfassbare Bereich (Blanking-Bereich, siehe Abb.12.2) größer. Dies geschieht aufgrund der so genannten Side Lobes. In einem Winkel

von 30° - 40° werden diese störende Nebenkeulen (Side Lobes) zum akustischen Hauptsignal ausgesendet. Die Messdaten des Hauptwandlers von den Rückstreusignalen der Nebenkeulen werden überlagert, wenn sie vor der Hauptkeule die Sohle erreichen. Der dadurch beeinträchtigte sohlnahe Messbereich beträgt in Abhängigkeit der Auslenkung der Messstrahlen 15 % der Fließtiefe bei 30° bzw. 6 % der Gesamttiefe bei 20° . (Fiedler, 2008)

12.2 Wandler Hindernisse

Die Hindernisse vom Wandler können den akustischen Wandler stören und die Datenqualität beeinträchtigen. Abb.12.1 stellt den Bereich dar, in welchen man alle Hindernisse beseitigen muss. (RDI, 1996)

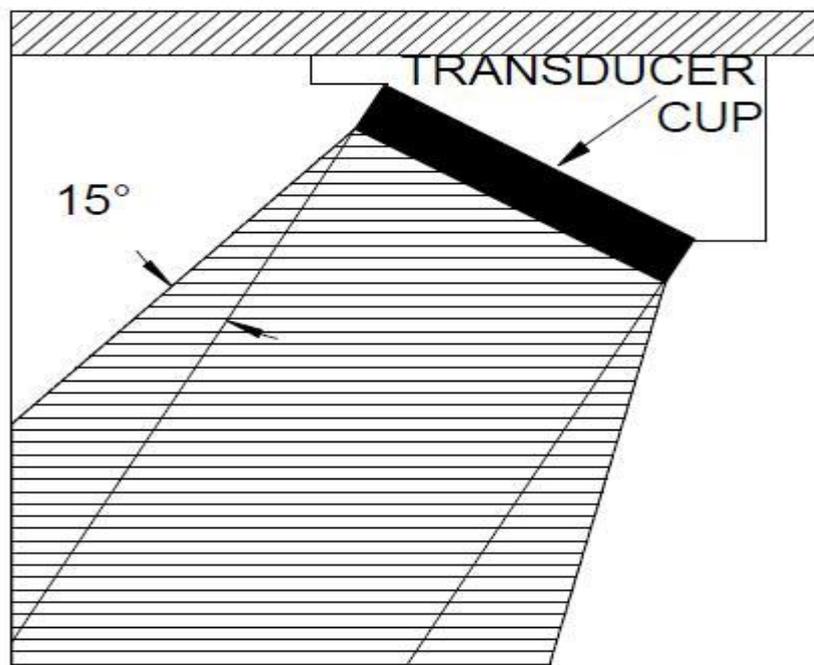


Abbildung 12.1. Diese Region umfasst eine 15° Kegel um den Wandler (RDI, 1996).

12.3 Mess- und Randbereiche

Aus gerätetechnischen Gründen sind Strömungsprofilmessungen nur im Kernbereich (Messbereich) des Querschnitts möglich. Es bestehen Zonen, die sich in Ufernähe sowie über und unter dem Kernbereich befinden, welche keine Messwerte haben (vgl. Abb.12.2). Durch Extrapolation der Messwerte des Kernbereichs werden Ihre Durchflussanteile berechnet. Mit zunehmender Was-

sertiefe wächst die Genauigkeit der Messung. Dies ist eine Voraussetzung, dass ein bestimmtes Verhältnis von Gewässerbreite zu Gewässertiefe besteht, damit eine Anwendung von ADCP-Messungen sinnvoll ist.

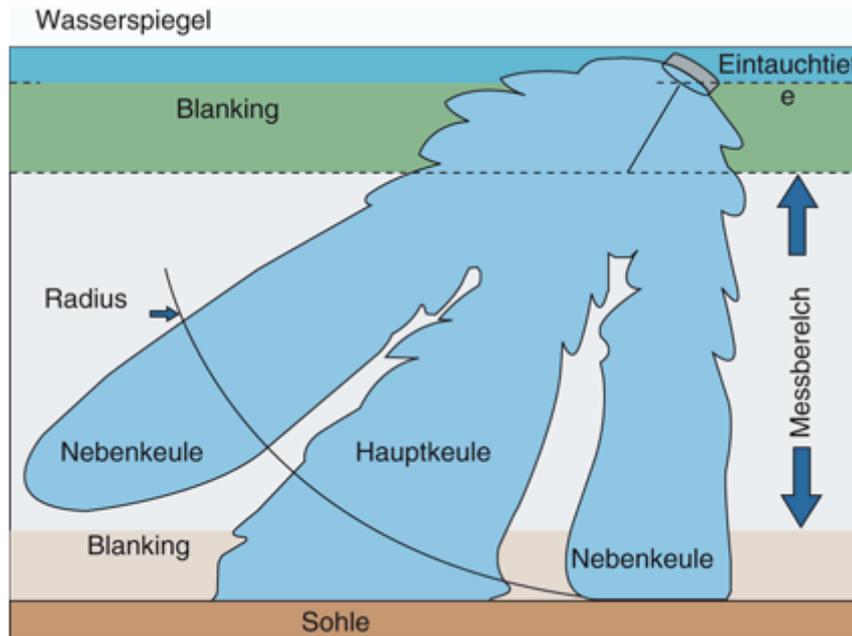


Abbildung 12.2 Grenzen von ADCP-Messungen in einem Querschnitt. (Morgenschweis, 2010)

12.3.1 Im Einzelnen gilt für die Randbereiche

Im unteren Randbereich, nahe der Gewässersohle, werden die gemessenen Geschwindigkeiten verfälscht. Dies geschieht dadurch, dass ein kleiner Anteil der Pulsenergie in Nebenkeulen (Uferbereiche) übertragen wird und deren starke Echos die schwachen Echos der Partikeln im Kernbereich überlagern und verwischen.

Die Auswertesoftware „WinRiver“ verwirft Daten aus dem Bereich, der beeinflusst sein könnte. Die Strahlen des ADCP Geräts haben eine Richtung von 20° zur Vertikalen. Die Eintauchtiefe des Messgeräts ist abhängig von der Baugröße des Sondenkörpers. Es besteht eine notwendige Eintauchtiefe und eine Blanking-Zone, bei denen keine Messwerte wiedergegeben werden (Abb.12.2.). Die Eintauchtiefe muss je nach Wellengang vergrößert werden, um zu verhindern, dass Luftblasen vor die Sensoren gespült werden. Dazu kommt noch ein Tiefenbereich, in dem durch das verwendete Pulsverfahren eine Totzone ent-

steht (Blanking in Abb.12.2). Diese Totzone wird „blanking distance“ genannt. Sie hängt von der Bauart und von der Frequenz des ADCP Geräts ab. Durch schwingungsfreie Lagerung der Wandler kann der Blanking-Bereich reduziert werden. (Morgenschweis, 2010)

Allgemein gilt nach (RDI, 1996) für die Berechnung der Reichweiten mit ungestörten Strömungswerten:

$$R_{max} = R * \cos \theta \quad (12)$$

wobei:

R_{max} = maximale Reichweite in (m)

R = Entfernung vom Strahler in (m)

Θ = Winkel der Hauptkeule zur Lotrechten in Radiant

12.4 Durchflussermittlung

Wie bereits die Durchflussermittlung erläutert wurde, ergibt sich der Gesamtdurchfluss Q im Messquerschnitt als die Summe aller Zellendurchflüsse. Bei der Berechnung der einzelnen Zellendurchflüsse wird die Zellenfläche mit dem vektoriellen Anteil der Strömungsgeschwindigkeit multipliziert, der senkrecht auf der Fläche steht.

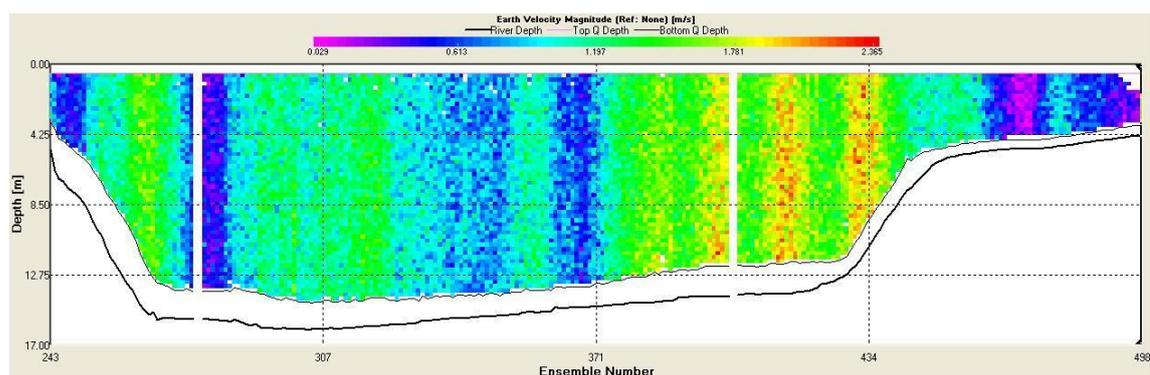


Abbildung 12.3 Fließgeschwindigkeiten mit WinRiver

Zum Schließen der Datenlücken an der Wasseroberfläche und der Sohle kann zwischen zwei Extrapolationsverfahren gewählt werden (Abb.12.4).

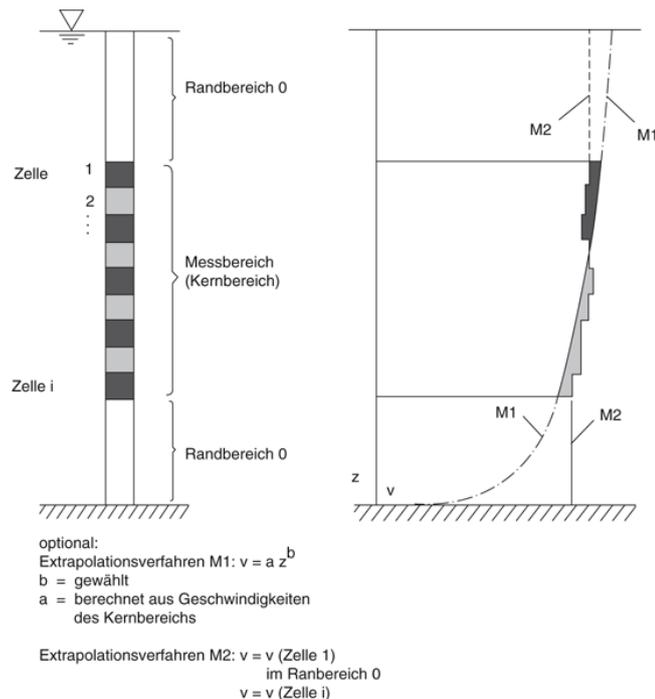


Abbildung 12.4 Berücksichtigung des nicht gemessenen Durchflussanteils in den oberen und unteren Profilbereichen. (Adler, 1993)

Beim Extrapolationsverfahren M2 (Abb.12.4) wird die Geschwindigkeit der obersten gemessenen Zelle bis zur Wasseroberfläche verlängert. An der Sohle wird analog vorgegangen, d.h. die Geschwindigkeit der untersten Zelle wird gleich der Sohlgeschwindigkeit gesetzt.

Beim Extrapolationsverfahren M1 (Abb.12.4) wird die idealisierte Geschwindigkeitsverteilung mit der Tiefe anhand einer Potenzfunktion angenähert:

$$v = a * z^b \text{ [m/s]} \quad (13)$$

wobei:

v = Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

z = Abstand von der Sohle [m]

a, b = Parameter

Der Parameter b ist wählbar (voreingestellt bei $1/6$), der Parameter a wird für jedes Ensemble neu berechnet. Er ergibt sich aus der mathematischen Bedingung, dass die mittlere Geschwindigkeit im Kernbereich für die tatsächlichen Messwerte und für die angepasste Potenzfunktion gleich groß ist. Mit Hilfe der

konstruierten Geschwindigkeitsverteilung und der Fläche der Randbereiche unten und oben errechnet die geräteinterne Software „WinRiver“ die entsprechenden Durchflussanteile. In den meisten Fällen liefert die Extrapolationsmethode M1 brauchbarere Ergebnisse.

Die Durchflussanteile am linken und rechten Ufer, die wegen zu geringer Wassertiefe nicht gemessen werden können, werden von „WinRiver“ nach folgendem Berechnungsansatz ermittelt:

$$Q_{Ufer} = C * v_m * L * d_m \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (14)$$

mit

C = Koeffizient zur Beschreibung der Uferform beträgt:

- 0,35 für dreieckige Ufer
- 0,91 für rechteckige Ufer

v_m = tiefengemittelte Geschwindigkeit in der Start- bzw. Stopposition am jeweiligen Ufer [m/s]

L = Abstand der Start-bzw. Stopposition vom jeweiligen Ufer [m]

d_m = Wassertiefe, gemittelt [m]. (Morgenschweis, 2010)

12.5 Ringing Effekt

Die Wandler werden beim ADCP Gerät sowohl zum Senden der Schallsignale als auch zum Empfangen der Echos verwendet. Zwischen Senden und Empfangen braucht das Gerät eine kurze Zwangspause, damit sinnvolle Messdaten erfasst werden können. Die kurze Zeitspanne zwischen Senden und Empfangen multipliziert mit der Schallgeschwindigkeit entspricht der Entfernung von den Wandlern bis zur ersten Zelle. (Morgenschweis, 2010)

Diese Wartezeit wird die Austastperiode genannt. Tabelle 4 zeigt typische Klingelzeiten. Diese Klingelzeiten entsprechen etwa der Standard-Austastperiode.

Tabelle 4 Typische Ringing-Zeiten als Abstände vor dem Wandler ausgedrückt (RDI, 1996)

Frequency	Ringing distance
75 kHz	6 m
150 kHz	4 m
300 kHz	2 m
600 kHz	1 m
1200 kHz	0.5 m

12.6 Der Druck

Stationäre ADCP Geräte sind so gebaut, dass auch ganzen Ozeantiefen standhalten können. Die Leistung des ADCP Geräts bleibt relativ unberührt, wenn sie in Tiefen von mehr als 2000 Metern zum Einsatz kommen. Mit zunehmender Tiefe verringert sich tendenziell die niedrige Rückstreuung. (RDI, 1996)

12.7 Concave vs Convex

Stationäre ADCP Geräte verwenden konvexe Wandler (Abb.12.5), damit das ADCP Gerät in einem in-line Käfig fest montiert werden kann. Die Wandler des Mobilten ADCP Geräts sind konkav, damit sie in dem kleinstmöglichen Seekasten des Schiffsrumpfs montiert werden können. (RDI, 1996)

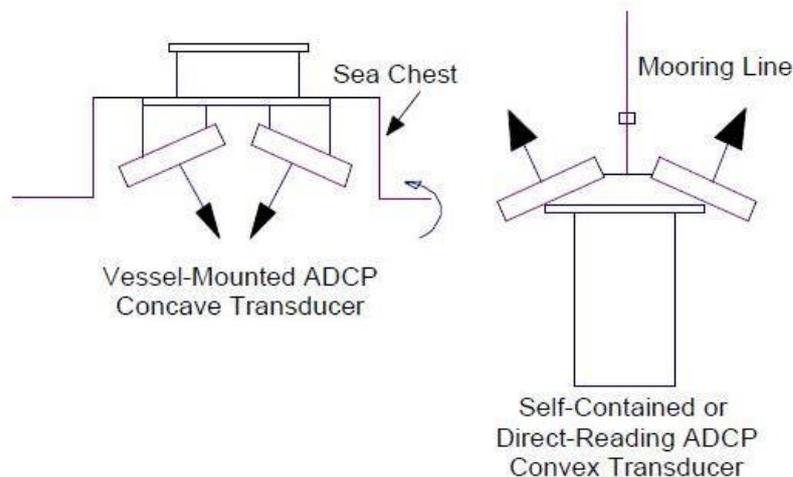


Abbildung 12.5 Konkaven und konvexen Wandlern. (RDI, 1996)

13. Sohlaufnahme oder Bottom Tracking Mode (BTM)

Bei diesem Verfahren messen vier Wandler des ADCP Geräts den Abstand zum Boden unabhängig voneinander. Ein viel stärkeres Echo als das von der Streuung an den Schwebstoffen im Wasser wird von dem Boden reflektiert. Dadurch ist der Boden leichter zu detektieren. Die eigene Bewegung über Grund kann aus der Dopplerverschiebung der Bottompings eigemessen werden. Durch die Schräglage im Raum (Neigungswinkel zur Lotrechten sowie der Stampf- und Rollwinkel) erfassen alle vier Strahler einen anderen Ort am Boden, siehe Abb. 13.1. Alle vier Tiefenwerte werden für die mittlere Tiefe gemittelt. Der Hersteller gibt für diese Mittelung eine Genauigkeit von ca. 0,1 m an und für die Genauigkeit der Geschwindigkeitsbestimmung einige mm/s. (Cyseweski, 2011)

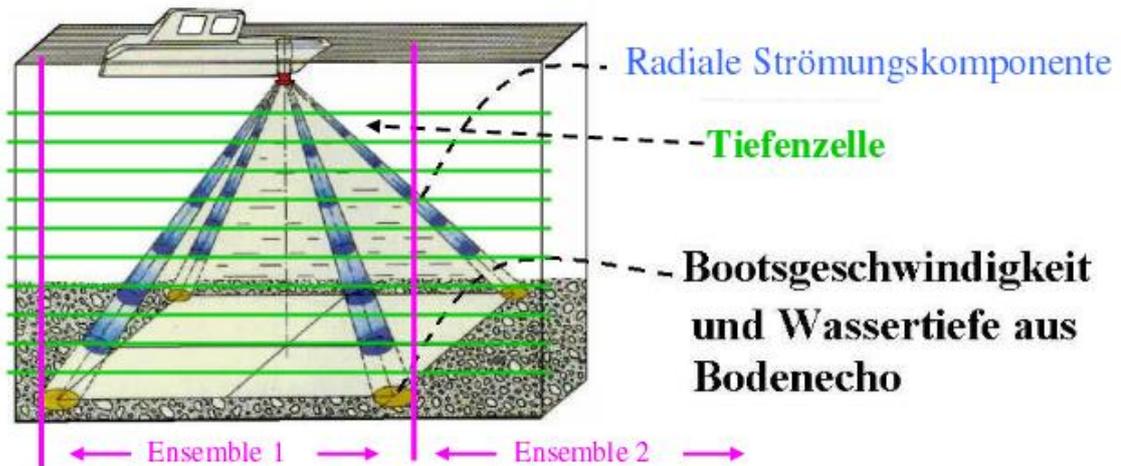


Abbildung 13.1 Messprinzip der ADCP Strömungsmessung vom Schiff aus. (Cyseweski, 2011)

Für die Abtastung der Sohle werden im Gegensatz zu den Water Pings möglichst lange Signale verwendet, um zu gewährleisten, dass die gesamte Wandlербreite des Signals zur selben Zeit von der Sohle reflektiert wird (Abb. 13.2). Dadurch ist eine größere Genauigkeit in der Auswertung der Rückstreuungssignale möglich. Über die Laufzeit zwischen dem Aussenden und dem Empfangen der Schallimpulse und über das Time Gating kann die Schrägentfernung zwischen dem ADCP Gerät und der Sohle berechnet werden, die mittels trigonometrischer Formeln in die vertikale Fließtiefe umgerechnet wird. Aus der Dopplerverschiebung der Sohlenechos ermittelt außerdem das ADCP Gerät die Relativgeschwindigkeit zwischen der Sohle und sich selbst. (Fiedler, 2008)

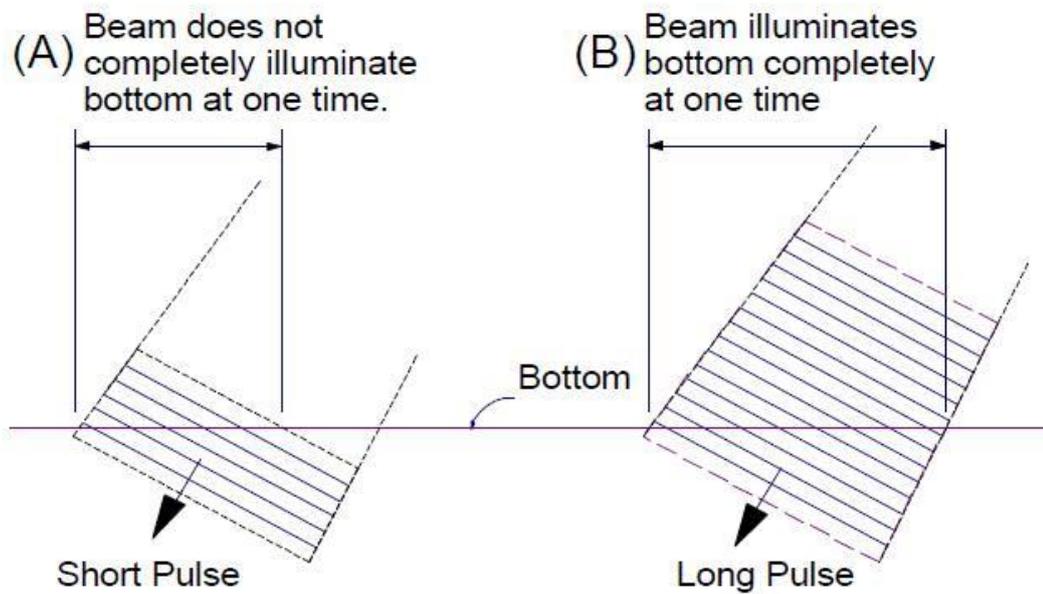


Abbildung 13.2 Ein langer Impuls ist für die Strahlen erforderlich, um den gesamten Boden auf einmal zu erleuchten (RDI, 1996).

13.1 Ice-Tracking

Ein, am Meeresboden montiertes, ADCP Gerät kann die Eisbewegung unter Verwendung seiner Sohlaufnahmebegabung verfolgen. (Belliveau, 1989)

14. ADCP Messungen im Stauraum des Kraftwerk Edling

14.1 Aufgabenstellung

Im Stauraum des Wasserkraftwerks Edling wurden Messungen der Fließgeschwindigkeit mit Hilfe eines ADCP Gerätes durchgeführt. Dabei wurde der Stauraum abschnittsweise in 21 Profile unterteilt. Die Querschnittsprofile wurden mit einem ADCP Gerät auf einem Gerätträger abgefahren und die Fließgeschwindigkeiten, Wassertiefe und die Sohle des Flusses in den jeweiligen Profilen gemessen. Für die Messungen wurde ein ADCP Gerät vom Typ Workhorse RioGrande 1200 KHz der Firma RDI verwendet.

14.2 Übersicht Kraftwerk Edling



Abbildung 14.1 Standort Wasserkraftwerk Edling (Verbund, 2013)

Errichtet wurde das Kraftwerk Edling in den Jahren 1958 bis 1962 und ist situiert am Beginn der Schluchtstrecke der Drau im Jauntal. In der Kraftstation am linken Draufer sind zwei Maschinensätze mit vertikaler Welle, bestehend aus je einer Kaplan turbine und einem eingebauten Drehstromgenerator. In den Jahren 1996/97 wurden die Turbinen und Generatoren erneuert.



Abbildung 14.2 Luftaufnahme Kraftwerk Edling (Verbund, 2013)

Durch den Bau des Kraftwerkes entstand der Völkermarkter Stausee. Mit einer Fläche von 10,5 km² ist er der drittgrößte See Kärntens. Der Stausee hat sich seit der Errichtung des Kraftwerkes zu einem Natur- und Naherholungsgebiet entwickelt, das weithin bekannt ist. Das von 1989 bis 1991 geschaffene 18 Hektar große Flachwasserbiotop Neudenstein wurde unter Naturschutz gestellt und 2005 zu einem Europa-Schutzreservat erklärt. (Verbund, 2013)

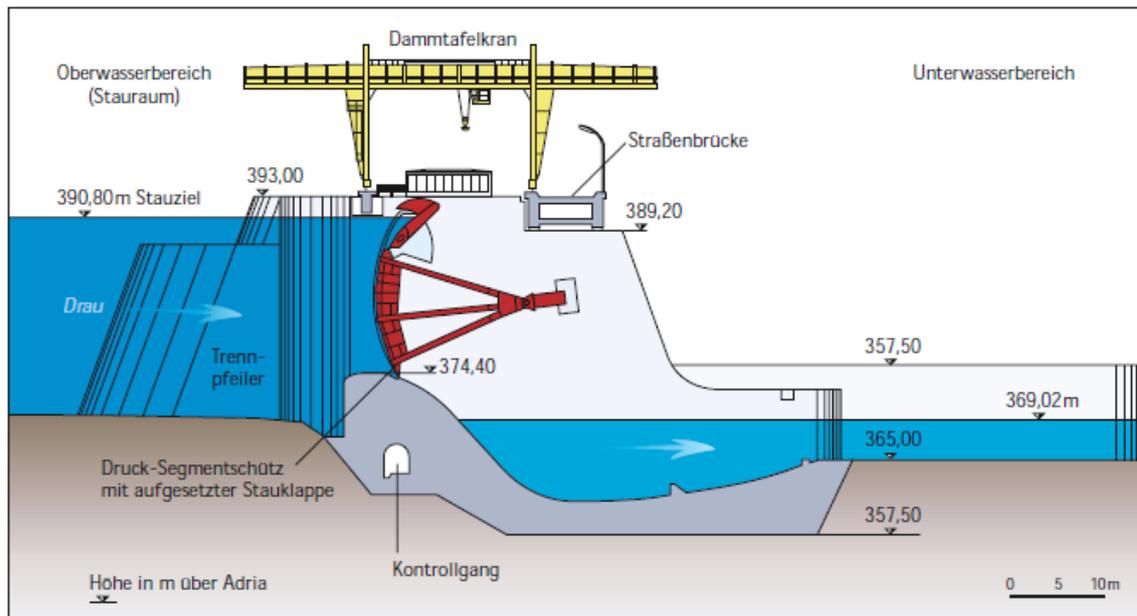


Abbildung 14.3 Querschnitt durch ein Wehrfeld (Verbund, 2013)

In Abb. 14.3. ist ein Querschnitt des Wasserkraftwerks Edling durch ein Wehrfeld dargestellt.

Tabelle 5 Allgemeine Daten

Kraftwerkstyp	Lauf-Schwellkraftwerk
Ausführung	Buchtenkraftwerk
Inbetriebnahme	1962
Engpaßleistung	87.000 kW
Erzeugung im Regeljahr	407 GWh
Ausbaufallhöhe	21,5 m
Ausbauwassermenge	410 m ³ /s

Tabelle 5 zeigt die allgemeinen Daten des Wasserkraftwerks Edling.

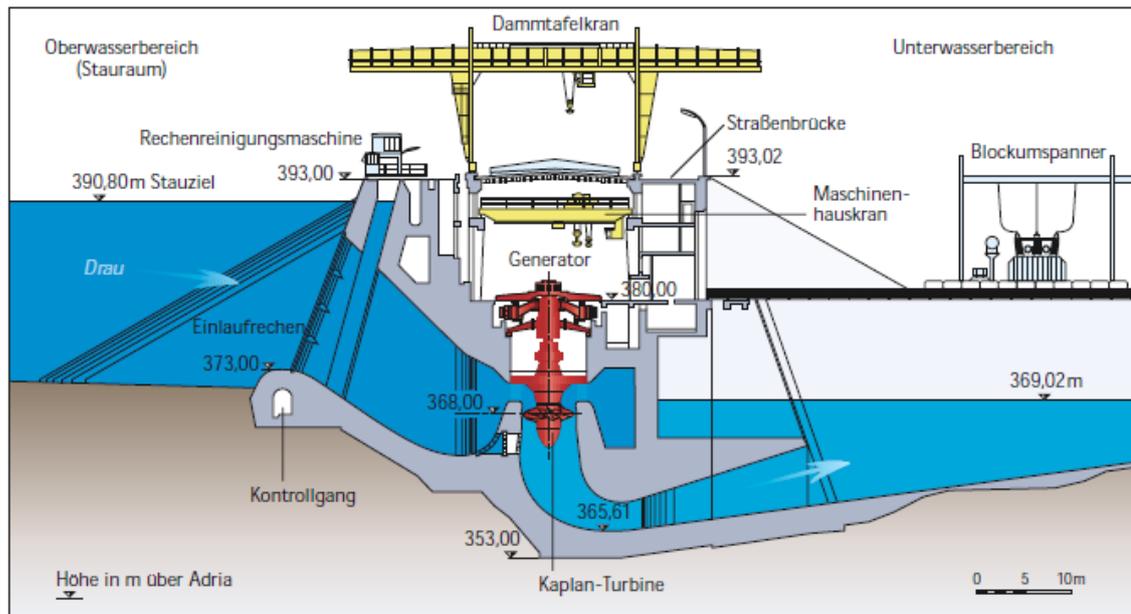


Abbildung 14.4 Querschnitt durch das Kraftwerk (Verbund, 2013)

In Abb. 14.4 ist der Querschnitt des Wasserkraftwerks durch das Kraftwerk abgebildet.

Tabelle 6 Technische Daten

<i>Turbinen</i>	
Anzahl	2
Bauart	Kaplanturbinen
Anordnung	vertikal
Nennleistung	je 44.500 kW
Nenndurchfluß	je 195 m³/s
Nenndrehzahl	115,4 U/min
Laufgrad-Ø	5,6 m
Generatoren	
Anzahl	2
Nennleistung	je 50.000 kVA
Nennspannung	10,5 kV
Wehranlage	
3 Wehrfelder mit beweglichen Wehrverschlüssen, einer lichten Weite von je 15 m; Verschluss: Drucksegmentschütze mit aufgesetzten Stauklappen; Verschlusshöhe 17 m	
Stauziel	390,8 m ü. A.
Stauraulänge	rund 24,0 km

Tabelle 6 stellt die technischen Daten des Wasserkraftwerks dar.

14.3 Auswertung der ADCP-Messergebnisse

14.3.1 Einleitung Software

Die Ergebnisse wurden von folgenden Softwares berechnet:

- WinRiver II, Version 2.08, Copyright 2003/11 Teledyne RD Instruments (Die Ergebnisse werden im Anhang präsentiert)
- BlueKenue, Version 3.0.44, Canadian Hydraulics Centre (Ein Teil der Ergebnisse wird im Verlauf der Arbeit präsentiert, ein anderer Teil befindet sich im Anhang)
- ADCP PostProcessing Tools (Institut für Wasserbau, TU Graz)

Die ADCP Messdaten werden vom „WinRiver“ ausgewertet. „ADCPtools“, welches im Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TUGraz, entwickelt wurde, hat hingegen die Fähigkeit die Daten in mehrere Formate umzuwandeln. Eines dieser Formate ist „BlueKenue“.

14.3.2 2D Auswertung

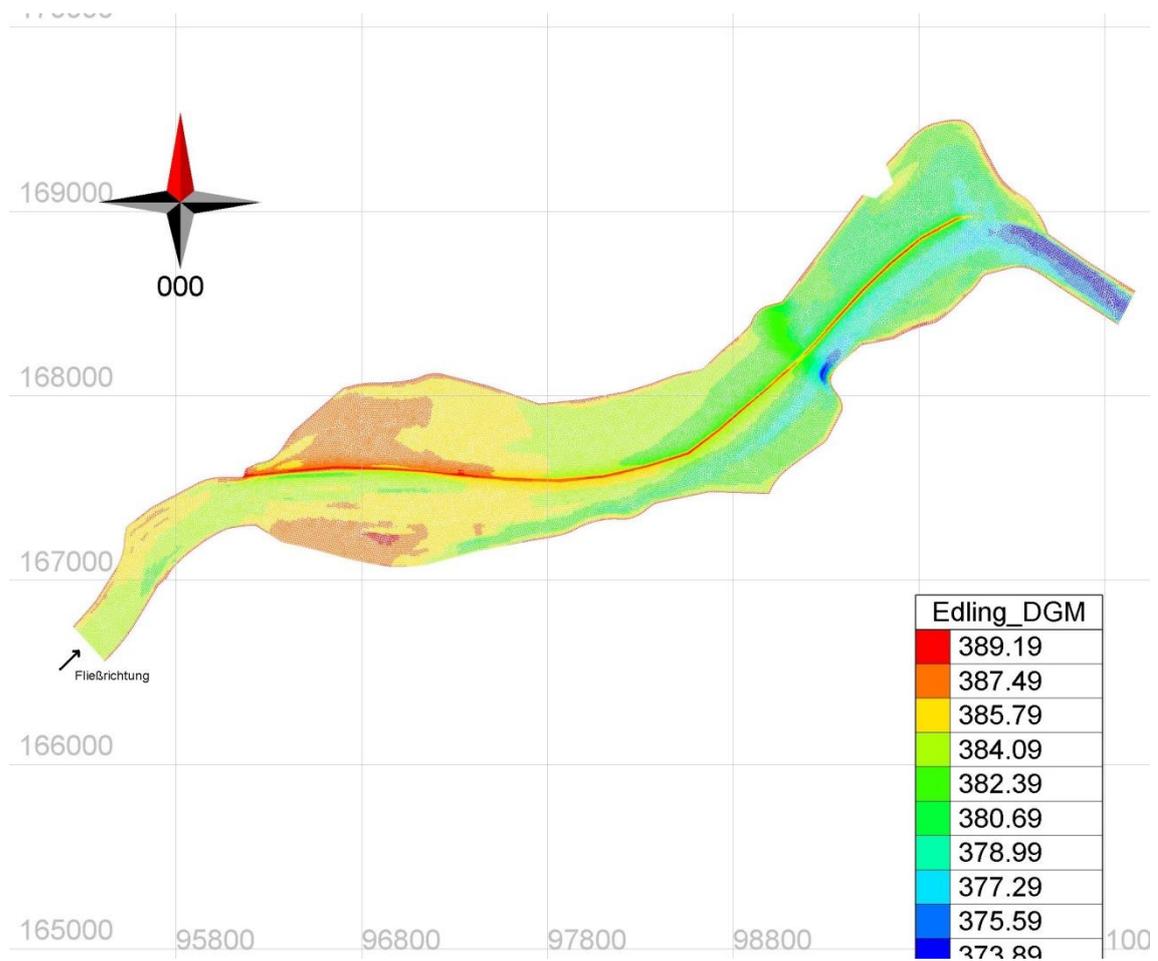


Abbildung 14.5 Geländemodell dargestellt in Lageplan

Abb.14.5 zeigt die Sohle des Flusses in Lageplan. Die blaue Farbe markiert dabei die tiefsten Bereiche des Flusses, die seichten Gebiete sind mit roter Farbe gekennzeichnet. Das digitale Modell wird aus Querprofilen - Echolotaufnahmen erstellt.

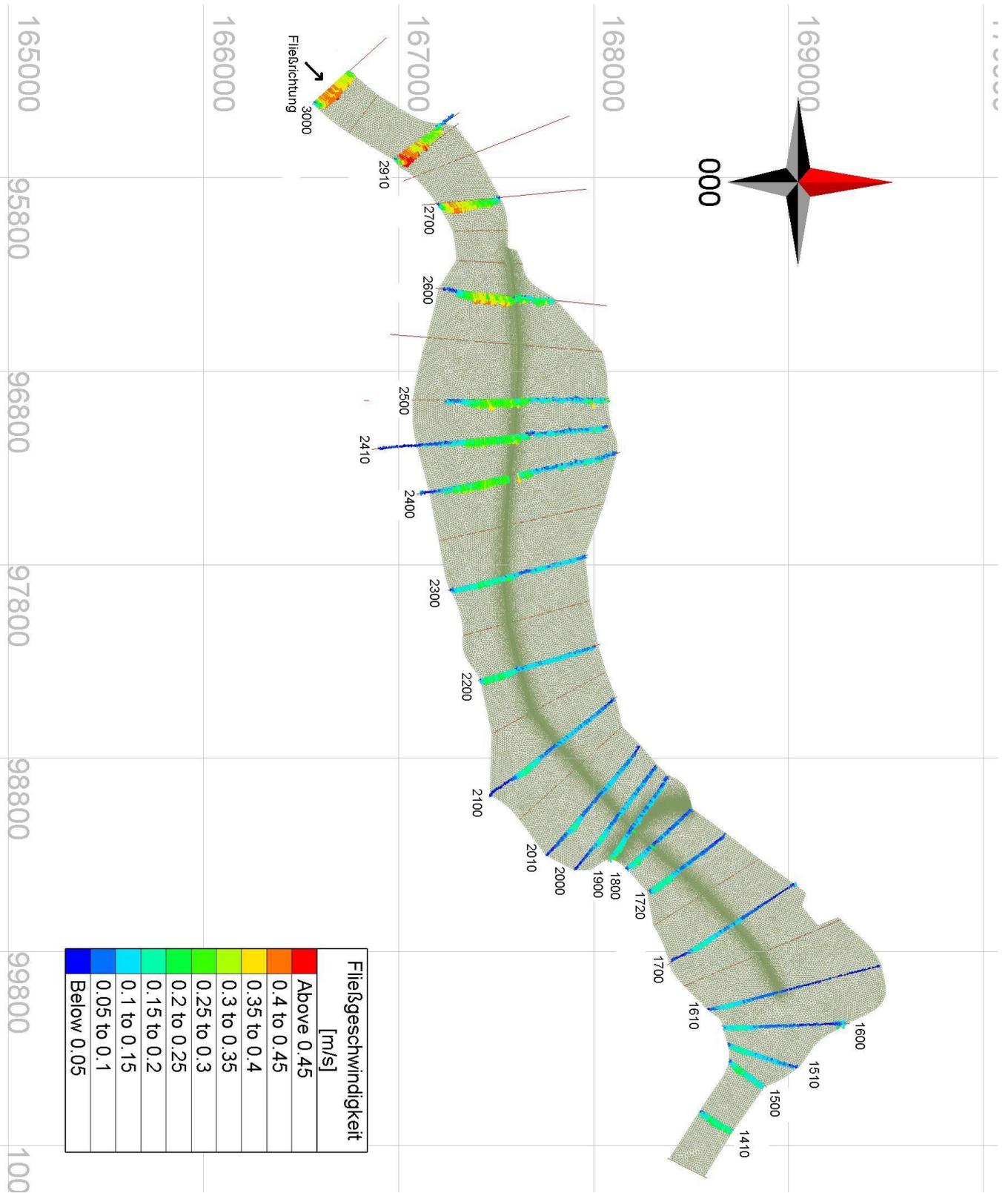


Abbildung 14.6 2D tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten der gemessenen Profile

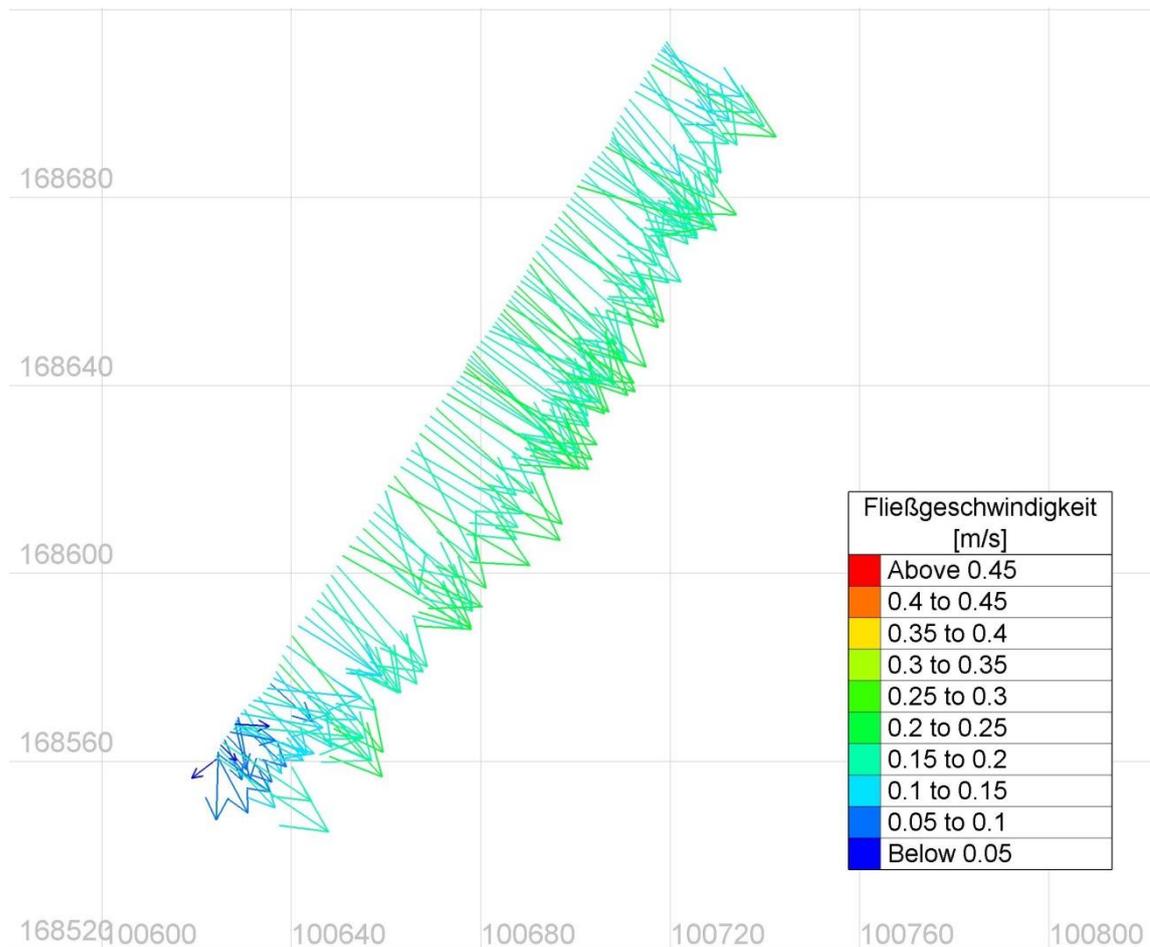


Abbildung 14.7 2D tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1410

In Abb.14.7 sind die tiefgemittelten Fließgeschwindigkeiten des Flussquerprofils 1410 dargestellt. Bei der 2D Darstellung werden die tiefengemittelten Fließgeschwindigkeiten in Lageplan präsentiert.

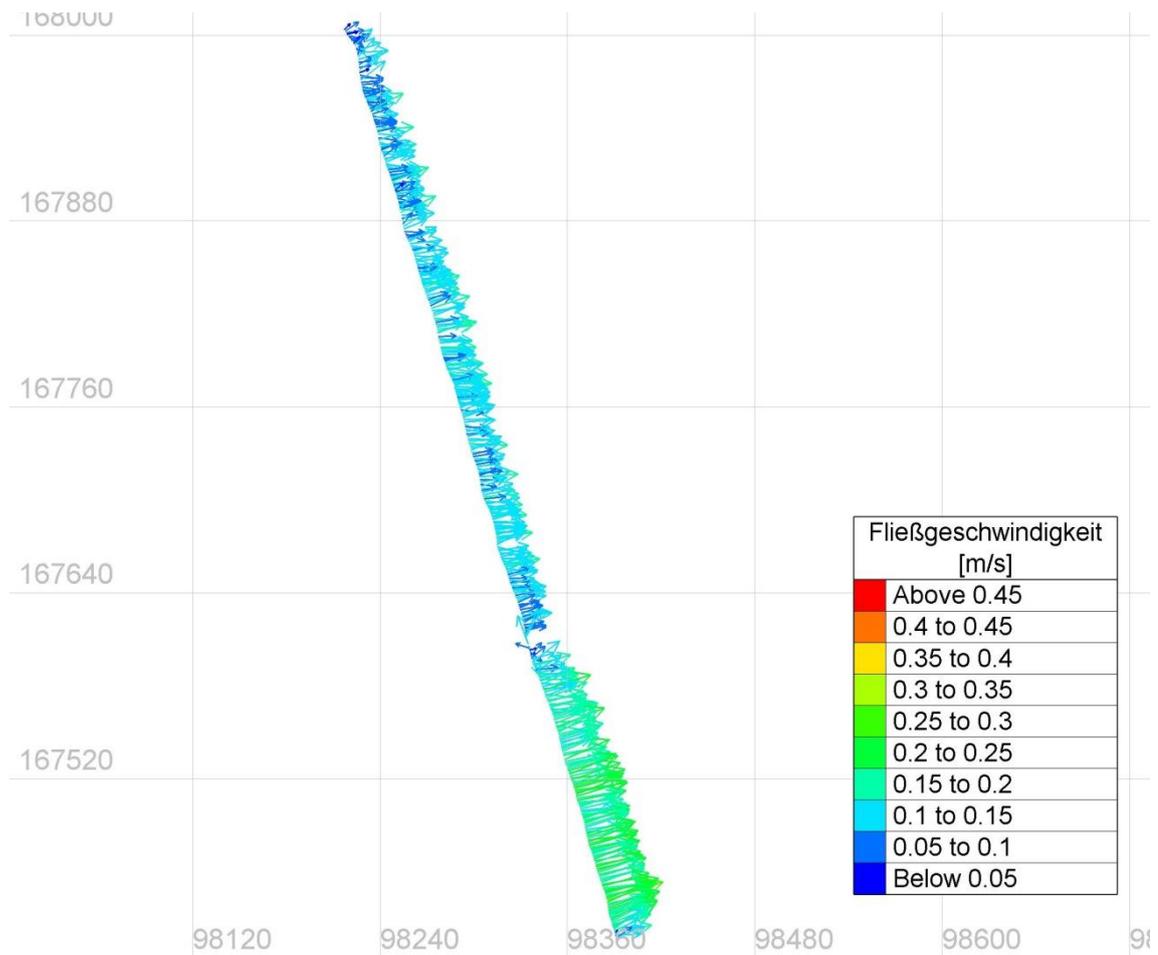


Abbildung 14.8 2D tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2200

In Abb. 14.8. ist zu erkennen, dass die Fließgeschwindigkeiten auf der orthographisch rechten Seite des Profils größer als jene auf der linken Seite sind.

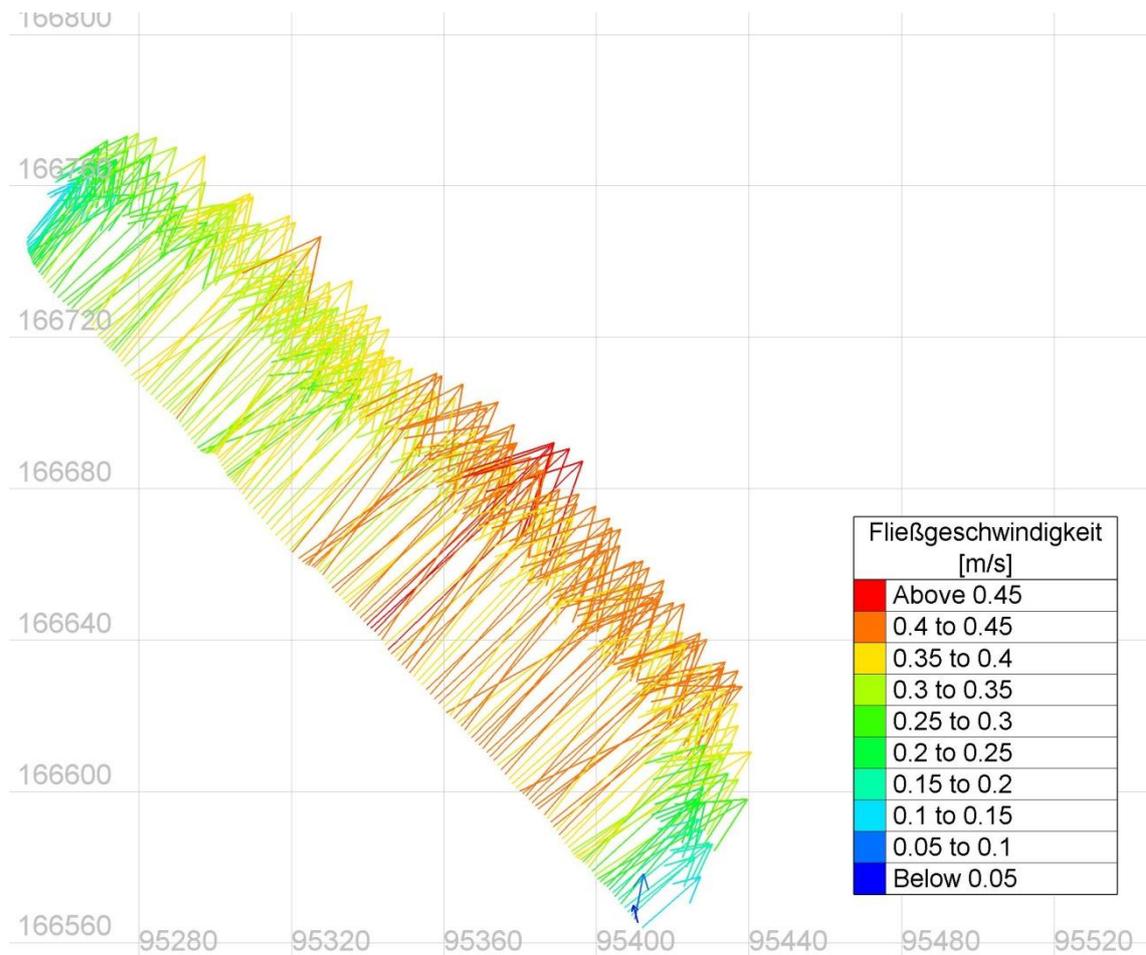


Abbildung 14.9 2D tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 3000

In Abb. 14.9. wird die tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit gezeigt. Dabei ist erkennbar, dass die Fließgeschwindigkeiten am Anfang des Stauraums am größten sind.

14.3.3 3D Auswertung

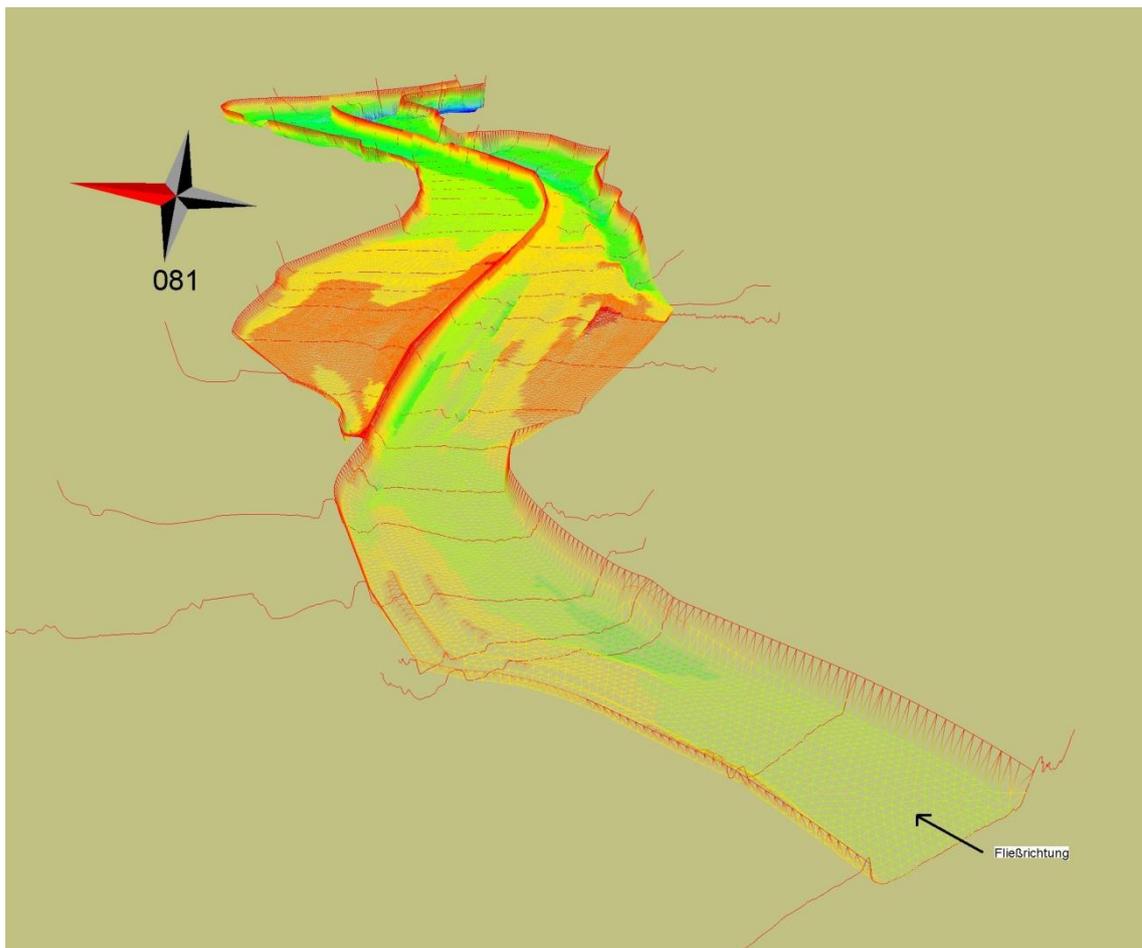


Abbildung 14.10 3D Geländemodell

In Abb 14.10 ist die 10 – fach überhöhte Flusssohle in 3D dargestellt.

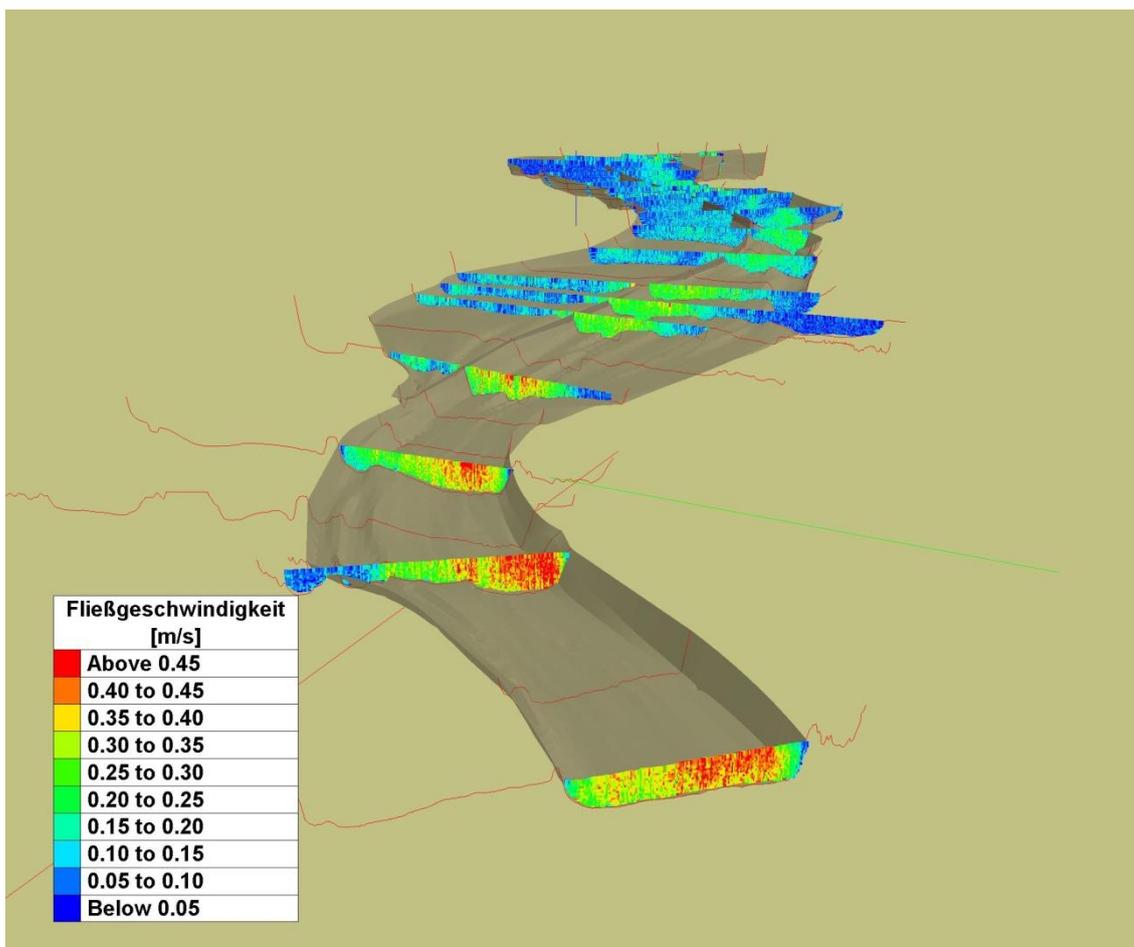


Abbildung 14.11 3D Darstellung der Fließgeschwindigkeiten der gemessenen Profile

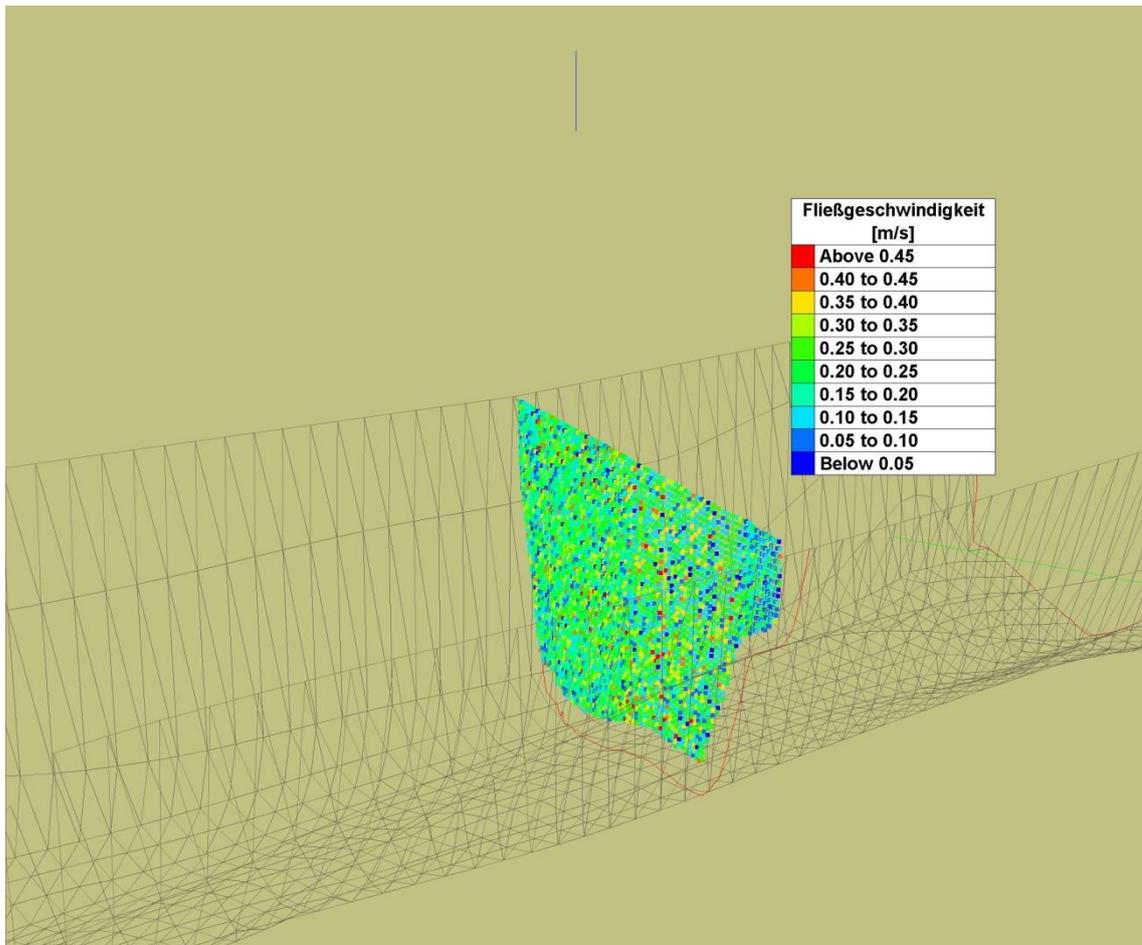


Abbildung 14.12 3D Darstellung der Fließgeschwindigkeiten, Profil 1410

In Abb. 14.12 sind die Fließgeschwindigkeiten jeder einzelnen Tiefenzelle angegeben. Durch diese Darstellung ist deutlich sichtbar, dass bei der Messung der Fließgeschwindigkeit durch das ADCP Gerät einzelne Ungenauigkeiten auftreten können.

In dieser Darstellung ist die starke Streuung der einzelnen Fließgeschwindigkeiten deutlich sichtbar. Durch die Mittelung der Fließgeschwindigkeiten über die Wassertiefe kann das „Scattering“ geglättet werden und es werden plausible tiefgemittelte Fließgeschwindigkeiten berechnet (siehe Abbildung 14.7)

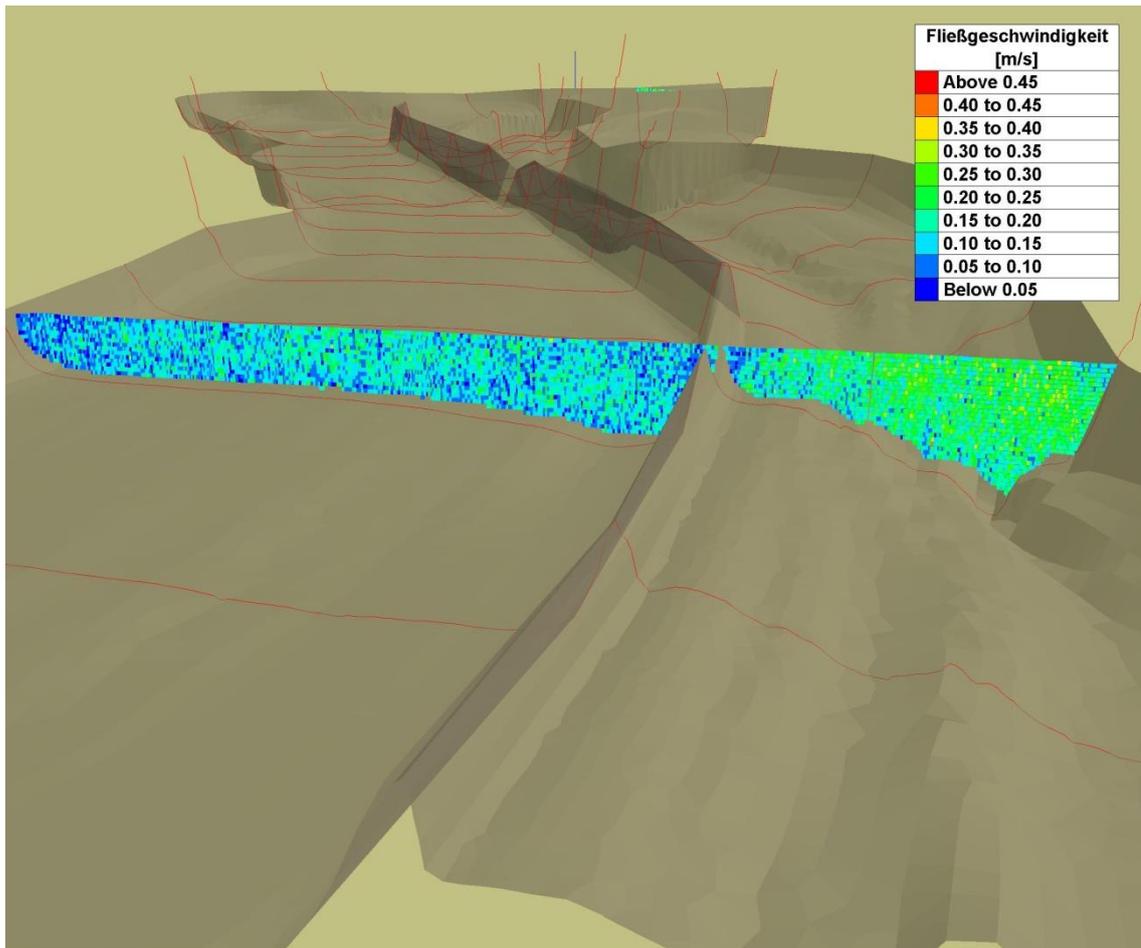


Abbildung 14.13 3D Darstellung der Fließgeschwindigkeiten, Profil 2200

In Abb. 14.13 ist erkennbar, dass aufgrund der Flusstiefe die durchschnittlichen Fließgeschwindigkeiten der Tiefenzellen größer als diejenigen auf der anderen Flussseite sind.

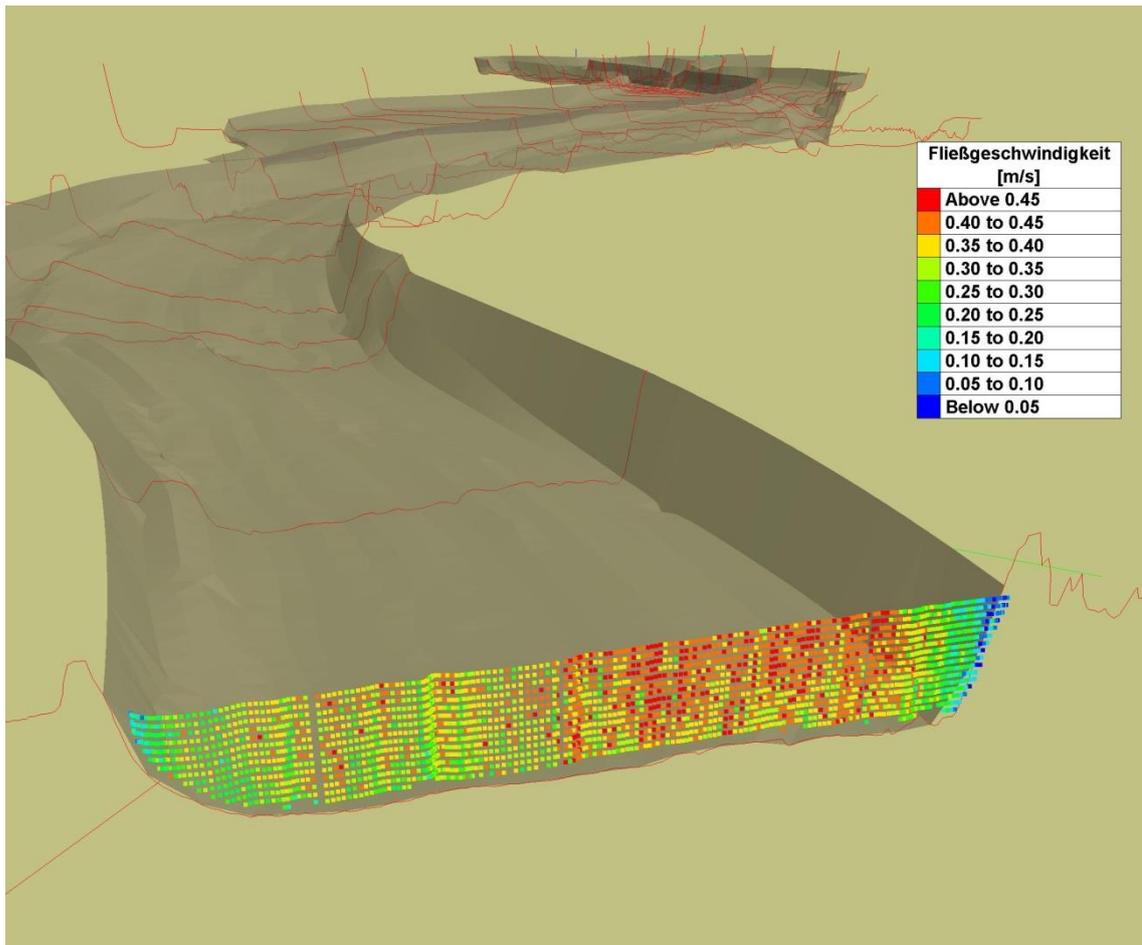


Abbildung 14.14 3D Darstellung der Fließgeschwindigkeiten, Profil 3000

In Abb. 14.14 wird verdeutlicht, dass am Beginn des Stauraumes die Fließgeschwindigkeiten am größten sind.

15. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Grundlagen der ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) Messtechnik vorgestellt. Mit der ADCP Messtechnik können in offenen Oberflächengewässern die Fließgeschwindigkeiten entlang eines Querprofils und über die Wassertiefen mit einer hohen räumlichen Auflösung gemessen werden. Mit der gleichzeitigen Wassertiefenmessung kann somit der Durchfluss bestimmt werden.

Am Beispiel von ADCP Messung im Stauraum Wasserkraftwerkes Edling an der Drau wurden die Fließgeschwindigkeiten ausgewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass durch das sehr langsame Fließverhalten im Stauraum die einzelnen Geschwindigkeiten im Querprofil sehr stark streuen und diese für eine qualitative Analyse nicht herangezogen werden können. Durch die Mittelung der Fließgeschwindigkeiten über die Wassertiefe kann die Streuung wirksam reduziert und plausible tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten berechnet werden. Die Darstellung der georeferenzierten tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten im Lageplan erlaubt die Analyse und Erkennung von Hauptströmungsrichtungen, Rückströmzonen oder auch Stillwasserzonen. Die Auswertungen zeigen, dass ADCP Daten eine exzellente Grundlage für die Kalibrierung von hydrodynamischen numerischen Modellen sein können.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1. Links ADV (Nortek AS) ,rechts Prinzipielle Funktion einer ADV-Sonde (http://www.nortek-as.com/en/products/velocimeters/vector) (http://www.sontek.com/10mhzadv.php)	2
Abbildung 2.2. ADCP Rio Grande (Morgenschweis, 2010)	3
Abbildung 3.1 Doppler-Effekt eines vorbeifahrenden Zuges (RDI, 1996).....	6
Abbildung 3.2 Doppler-Effekt bei bewegtem Sender (Fiedler, 2008)	7
Abbildung 3.3 Doppler-Effekt bei bewegtem Empfänger (Fiedler, 2008)	7
Abbildung 3.4 An der Doppler-Verschiebung beteiligte Geschwindigkeitsanteile (Fiedler, 2008)	9
Abbildung 3.5 Die typischen Partikeln in Ozean (RDI, 1996)	10
Abbildung 3.6 Zurückreflektierter Schall. (A) Gesendete Impuls, (B) eine geringe Menge der Schallenergie wird zurück reflektiert, die größte Menge der Schallenergie wird nicht reflektiert (RDI, 1996).....	11
Abbildung 3.7 Rückgestreute Schall beinhaltet zwei Doppler-Verschiebungen, (A) ein im Weg zu den Partikeln und (B) eine zweite auf dem Weg zurück nach der Reflexion. (RDI, 1996)	12
Abbildung 3.8 Auslenkung der ausgesendeten Messimpulse (Fiedler, 2008)..	13
Abbildung 4.1 Laufzeitverzögerung und Phasenänderung verursacht durch Partikelverschiebung. (RDI, 1996)	14
Abbildung 4.2 Zeitdilatation und Doppler Frequenz Verschiebung (RDI, 1996)	16
Abbildung 4.3 Das Echo aus einem einzigen Teilchen sieht gleich wie der Sendeimpuls aus aber das Echo aus einer Vielzahl der Teilchen ist kompliziert (RDI, 1996)	18
Abbildung 5.1 Das Verhältnis von Wandler und Erd- Geschwindigkeitskomponenten (RDI, 1996).....	21
Abbildung 5.2 Inhomogene Strömung führt zu großen Geschwindigkeitsfehler (RDI, 1996)	22

Abbildung 6.1 Vergleich zwischen ADCP Tiefenzellen und herkömmlichen Flügel (Boiten, 2008).....	23
Abbildung 6.2 Unterteilung in Tiefenzellen durch Time Gating (Fiedler, 2008)	25
Abbildung 6.3 Tiefenzelle Gewichtsfunktionen (RDI, 1996)	26
Abbildung 7.1 Aussicht eines ADCP Wandler. Der Aufbau ist der gleiche für konvexe und konkave Wandler (RDI, 1996)	27
Abbildung 8.1 Schritte im Bearbeitungszyklus (RDI, 1996).....	29
Abbildung 8.2 Häufigkeitsverteilung der Abweichung von ADCP-Messungen von einem Referenzwert beim BfG-Ringversuch 2007. (Adler, 2008a)	31
Abbildung 9.1 Pitch, roll und heading (http://techpubs.sgi.com/library/tpl/cgi-bin/getdoc.cgi/0650/bks/SGI_Developer/books/Perf_GetStarted/sgi_html/ch05.html).....	33
Abbildung 9.2 Stationäres ADCP Gerät (Fiedler, 2008)	35
Abbildung 9.3 Mobiles ADCP Gerät (Fiedler, 2008).....	36
Abbildung 9.4 Trailerbares Kunststoffboot mit ADCP-Messschacht. (Adler, 2008a).....	37
Abbildung 9.5 Aluminiumboot als Geräteträger. a Messung mit Ausleger. b Messboot auf Trailer. (Morgenschweis, 2010)	37
Abbildung 9.6 Ferngesteuertes Boot, Typ Q-Boat von Oceanscience. a ADCP-Gerät und Bootsantrieb b im Messeinsatz. (Morgenschweis, 2010)	38
Abbildung 9.7 Trimaran als ADCP-Geräteträger mit a 1200 kHz- ADCP Workhorse Rio Grande b im Einsatz am Seil geschleppt von einer Brücke (Morgenschweis, 2010).....	39
Abbildung 9.8 RiverCat als Geräteträger für ein SonTek Mini-ADCP montiert an einer Seilkrananlage (Morgenschweis, 2010)	39
Abbildung 9.9 Flachwasser-ADCP StreamPro. (Morgenschweis, 2010)	40
Abbildung 9.10 a Definitionsskizze zur Durchflussermittlung mit dem ADCP. b Detail zur Definitionsskizze (Adler, 1993).	41

Abbildung 9.11 Beeinflussung der Fließgeschwindigkeitsermittlung durch Geschiebetrieb (Fiedler, 2008)	43
Abbildung 10.1 Entfernung - Verhältnis Signaldämpfung (RDI, 1996)	46
Abbildung 11.1 Veränderung der Schallausbreitung abhängig von der Tiefen. Die horizontale Komponente der Schallgeschwindigkeit bleibt jedoch durch die Reflektion unverändert. (RDI, 1996).....	49
Abbildung 12.1. Diese Region umfasst eine 15° Kegel um den Wandler (RDI, 1996).....	51
Abbildung 12.2 Grenzen von ADCP-Messungen in einem Querschnitt. (Morgenschweis, 2010).....	52
Abbildung 12.3 Fließgeschwindigkeiten mit WinRiver	53
Abbildung 12.4 Berücksichtigung des nicht gemessenen Durchflussanteils in den oberen und unteren Profilbereichen. (Adler, 1993)	54
Abbildung 12.5 Konkaven und konvexen Wandlern. (RDI, 1996)	57
Abbildung 13.1 Messprinzip der ADCP Strömungsmessung vom Schiff aus. (Cyseweski, 2011)	58
Abbildung 13.2 Ein langer Impuls ist für die Strahlen erforderlich, um den gesamten Boden auf einmal zu erleuchten (RDI, 1996).	59
Abbildung 14.1 Standort Wasserkraftwerk Edling (Verbund, 2013)	60
Abbildung 14.2 Luftaufnahme Kraftwerk Edling (Verbund, 2013).....	61
Abbildung 14.3 Querschnitt durch ein Wehrfeld (Verbund, 2013)	62
Abbildung 14.4 Querschnitt durch das Krafthaus (Verbund, 2013)	63
Abbildung 14.5 Geländemodell dargestellt in Lageplan	65
Abbildung 14.6 2D tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten der gemessenen Profile.....	66
Abbildung 14.7 2D tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1410	67
Abbildung 14.8 2D tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2200	68
Abbildung 14.9 2D tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 3000	69

Abbildung 14.10 3D Geländemodell.....	70
Abbildung 14.11 3D Darstellung der Fließgeschwindigkeiten der gemessenen Profile.....	71
Abbildung 14.12 3D Darstellung der Fließgeschwindigkeiten, Profil 1410	72
Abbildung 14.13 3D Darstellung der Fließgeschwindigkeiten, Profil 2200	73
Abbildung 14.14 3D Darstellung der Fließgeschwindigkeiten, Profil 3000	74
Abbildung 15.1 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1410	85
Abbildung 15.2 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1500	85
Abbildung 15.3 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1510	85
Abbildung 15.4 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1600	86
Abbildung 15.5 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1610	86
Abbildung 15.6 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1700	86
Abbildung 15.7 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1720	87
Abbildung 15.8 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1800	87
Abbildung 15.9 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1900	87
Abbildung 15.10 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2000	88
Abbildung 15.11 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2010	88
Abbildung 15.12 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2100	88
Abbildung 15.13 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2200	89
Abbildung 15.14 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2300	89
Abbildung 15.15 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2400	89
Abbildung 15.16 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2410	90
Abbildung 15.17 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2500	90
Abbildung 15.18 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2600	90
Abbildung 15.19 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2700	91
Abbildung 15.20 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2910	91

Abbildung 15.21 Fließgeschwindigkeiten, Profil 3000	91
Abbildung 15.22 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1500.....	92
Abbildung 15.23 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1510.....	93
Abbildung 15.24 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1600.....	94
Abbildung 15.25 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1610.....	95
Abbildung 15.26 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1700.....	96
Abbildung 15.27 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1720.....	97
Abbildung 15.28 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1800.....	98
Abbildung 15.29 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1900.....	99
Abbildung 15.30 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2000.....	100
Abbildung 15.31 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2010.....	101
Abbildung 15.32 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2100.....	102
Abbildung 15.33 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2300.....	103
Abbildung 15.34 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2400.....	104
Abbildung 15.35 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2410.....	105
Abbildung 15.36 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2500.....	106
Abbildung 15.37 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2600.....	107
Abbildung 15.38 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2700.....	108
Abbildung 15.39 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2910.....	109
Abbildung 15.40 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1500	110
Abbildung 15.41 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1510	111
Abbildung 15.42 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1600	112
Abbildung 15.43 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1610	113
Abbildung 15.44 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1700	114
Abbildung 15.45 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1720	115
Abbildung 15.46 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1800	116

Abbildung 15.47 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1900	117
Abbildung 15.48 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2000	118
Abbildung 15.49 Fließgeschwindigkeiten Profil 2010	119
Abbildung 15.50 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2100	120
Abbildung 15.51 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2300	121
Abbildung 15.52 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2400	122
Abbildung 15.53 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2410	123
Abbildung 15.54 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2500	124
Abbildung 15.55 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2600	125
Abbildung 15.56 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2700	126
Abbildung 15.57 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2910	127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Schallausbreitungsgeschwindigkeit in Luft und Wasser bei verschiedenen Temperaturen (Fiedler, 2008).....	5
Tabelle 2 Übersicht der Messmodi in Abhängigkeit der Strömungsverhältnisse im Messgebiet.(RDI,2009)	19
Tabelle 3 Schallabsorption (bei 4 ° C, 35 ‰ und auf Meereshöhe) und nominale Reichweite eines Breitband ADCP. Die aufgeführte Sendeleistung ist die maximale Leistung, die übertragen unterliegen Beschränkungen durch Schockbildung verursacht werden können.	45
Tabelle 4 Typische Ringing-Zeiten als Abstände vor dem Wandler ausgedrückt (RDI, 1996)	56
Tabelle 5 Allgemeine Daten	62
Tabelle 6 Technische Daten.....	63

Literaturverzeichnis

- Adler, M. 2008a. ADCP-Acoustic Doppler Current Profiler. Durchflussmessungen mit akustischen Doppler Geräten. *Koblenz: Unterlagen Abflussmesslehrgang, 2008a.*
- Adler, M. 1992. Messung von Geschwindigkeitsprofilen und Durchflussermittlung mit einem mobilen Ultraschall-Doppler-Gerät(ADCP). *Bonn: 17. DVWK-Fortbildungslehrgang Hydrologie: „Durchflusserfassung in offenen Gerinnen – Klassische Verfahren und neue Entwicklungen“, 1992.*
- Adler, Matthias. 1993. *s.l. : Messungen von Durchflüssen und Strömungsprofilen mit einem Ultraschall-Doppler-Gerät (ADCP), 1993, Zeitschriften fuer Wasser und Umwelt -Wasserwirtschaft, S. 192-196.*
- Belliveau, D.J., G.L. Bugden, and S.G.K. Melrose. 1989. Measurement of sea ice motion using bottom mounted Acoustic Doppler Current Profilers. *s.l. : Sea Technology,, 1989. S. 10-12.*
- Bernard, H. 1990. Ultraschall-Durchflussmessung. 1990. S. 67-80.
- Boiten, W. 2008. Hydrometry . *s.l. : CRC Press/Balkena, 2008.*
- Borucki, H. 1989. Einführung in die Akustik. *s.l. : Wissenschaftsverlag, 1989.*
- Cyseweski, M.C. 2011. Charakterisierung von Strukturen im Stroemungsfeld gemessen mit einem Acoustic Doppler Current Profiler. *Hamburg : s.n., 2011.*
- DIN ISO/TS, 25377. 25377. Leitfaden zu Messunsicherheiten in der Hydrometrie (HUG). *Berlin 2008 : Beuth Verlag, 25377.*
- Fiedler, Katharina. 2008. *Doktor-Ingenieurs.* Erfassung hydromorphologischer Vorgaenge bei Hochwasser mit Hilfe von ADCP-Messungen. *Muenchen : s.n., 2008, S. 33-48.*
- Frizell, K. W. u. Vermeyen, T. B. 2004. Comparing Apples and Oranges: Teledyne/RDI StreamPro ADCP and the OTT Qliner River Discharge Measurement System. *Denver/Colorado : Bureau of Reclamation, Water Resources Research Lab. Denver/Colorado, 2004.*
- Grosso, V. A. Del und Mader, C. W. Grosso, V. A. Del und Mader, C. W. 1972. *s.l. : Speed of Sound in Pure Water, 1972, Journal of the Acoustical Society of America, S. 1442–1446.*
- Hersch, R. W. 2009 . Streamflow Measurement. *s.l. : 3. Aufl., 2009 .*

- http://techpubs.sgi.com/library/tpl/cgi-bin/getdoc.cgi/0650/bks/SGL_Developer/books/Perf_GetStarted/sgi_html/ch05.html. sgi. [Online]
- <http://www.nortek-as.com/en/products/velocimeters/vector>. Nortek AS. [Online]
- <http://www.sontek.com/10mhzadv.php>. Sontek. [Online]
- Jonson, Chr. 2006. Experience using the Stream Pro in the Swedish Hydrological Network. Cannes : *Proceedings RDI-Seminar „ADCPs in Action“* , 2006.
- Kinsler, L. E., A. R. Frey, A. B. Coppins and J. V. Sanders. 1980. Fundamentals of Acoustics,. New York : John Wiley and Sons, 1980.
- Marsden, R. *Hydrometrie, Accuracy of ADCP measurement. Seminar „Akustische Doppler Geräte (ADCPs) in der* 2005. Koblenz : *Seminar „Akustische Doppler Geräte (ADCPs) in der Hydrometrie.Möglichkeiten und Perspektiven einer innovativen Technik, 2005.*
- Morgenschweis, Gerd. 2010. *Prof Dr. Hydrometrie. 1. Auflage. Essen : Theorie und Praxis der Durchflussmessung in offenen Gerinnen, 2010.*
- Muste, M., Yu, K., Gonzales-Castro, J. u. Starzmann, E. *Methodology for estimating ADCP measurement uncertainty in open channel flows. Proceedings World Water & Environmental Research Congress (EWRI) Salt Lake City. 2004a,b. 2004a,b.*
- RDI. 1996. s.l. : *Principles of Operation - A Practical Primer, 1996, Second edition for broadband.*
- RDI. 1999. When to Use Differential GPS in Place of Bottom Track. *Acoustic doppler current profilers application note fsa-006 : s.n., 1999.*
- Simpson, M. R. 2001. Discharge Measurements Using a Broad-Band Acoustic Doppler Current Profiler. s.l. : *United States Geological Survey, 2001.*
- Urlick, R.J. 1983. Principles of Underwater Sound. New York. : McGraw-Hill, 1983. *Third Edition.*
- Verbund. 2013. <http://www.verbund.com/pp/de/laufkraftwerk/edling>. [Online] 2013.

Anhang

- 2D Auswertung im „WinRiver II“

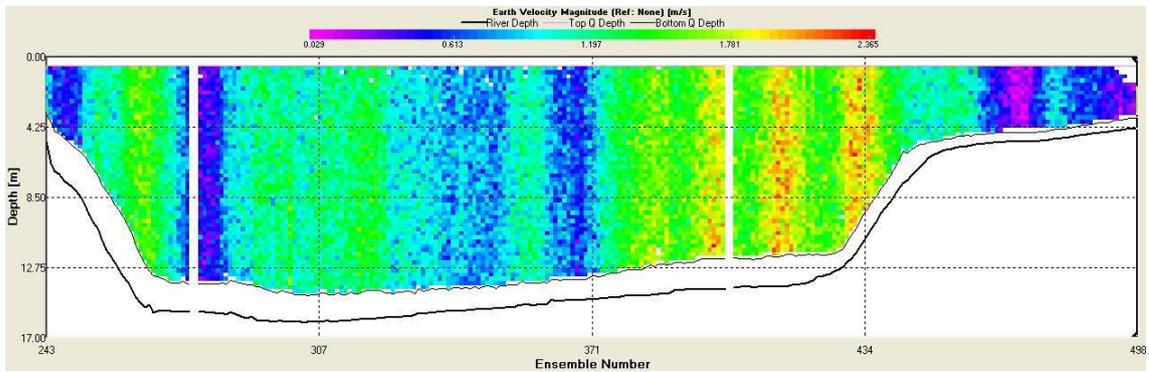


Abbildung 15.1 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1410

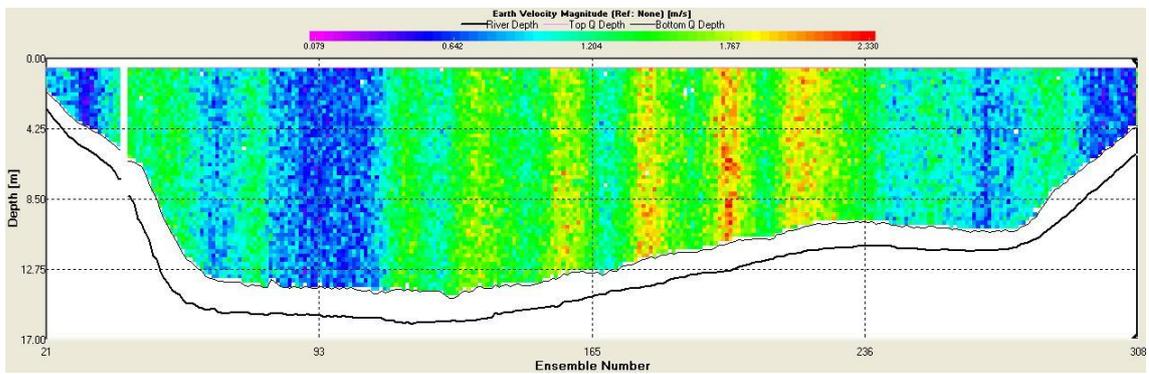


Abbildung 15.2 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1500

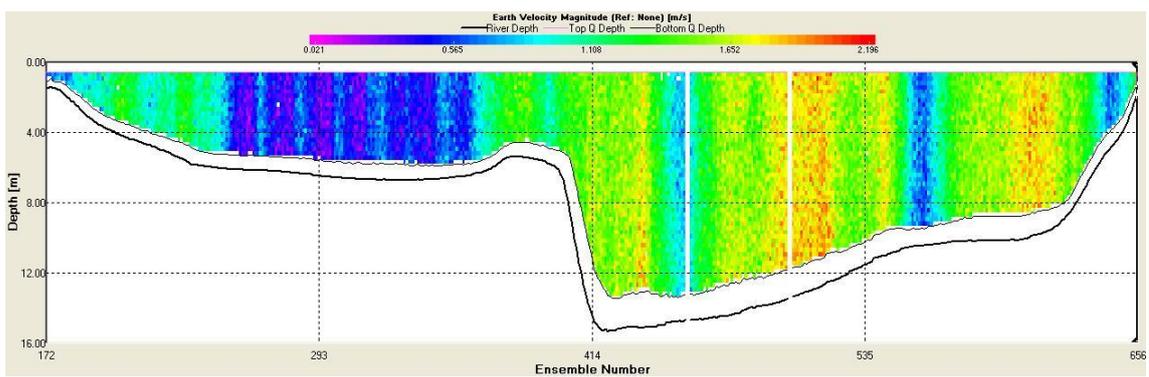


Abbildung 15.3 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1510

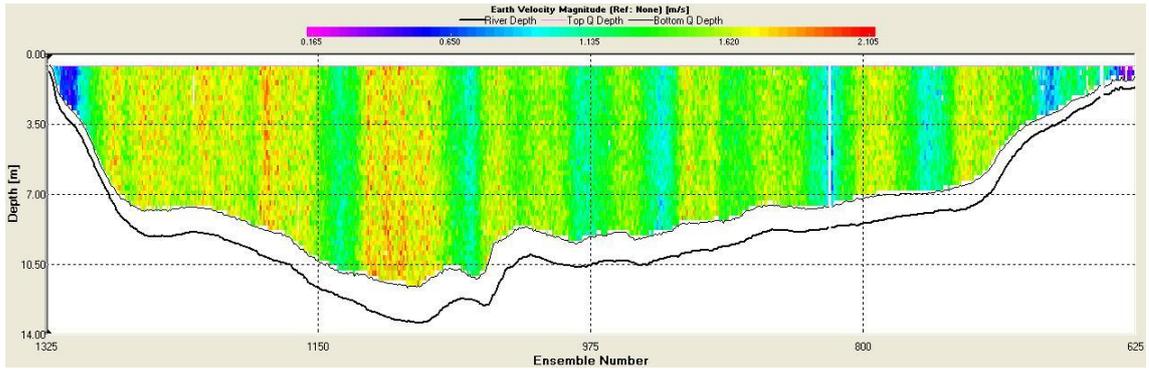


Abbildung 15.4 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1600

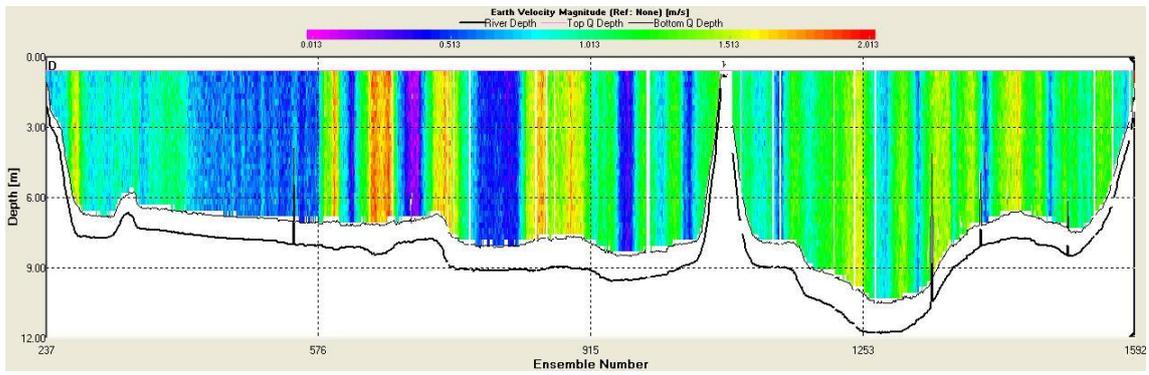


Abbildung 15.5 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1610

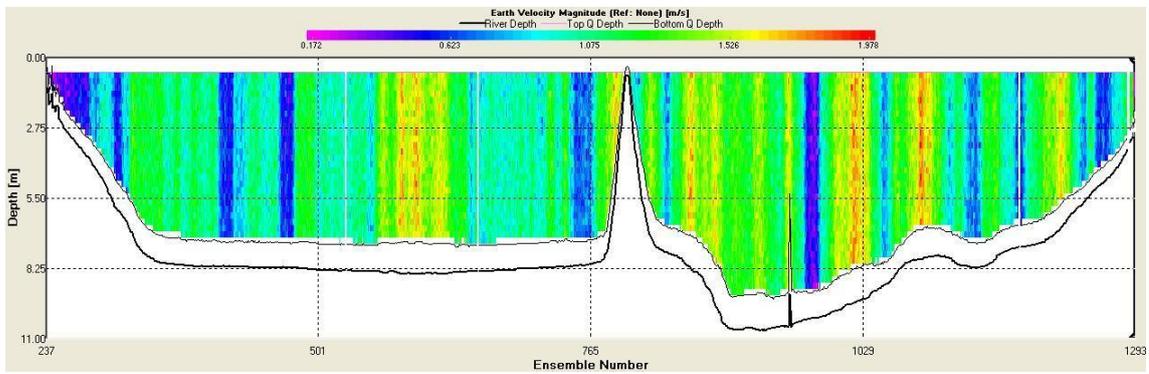


Abbildung 15.6 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1700

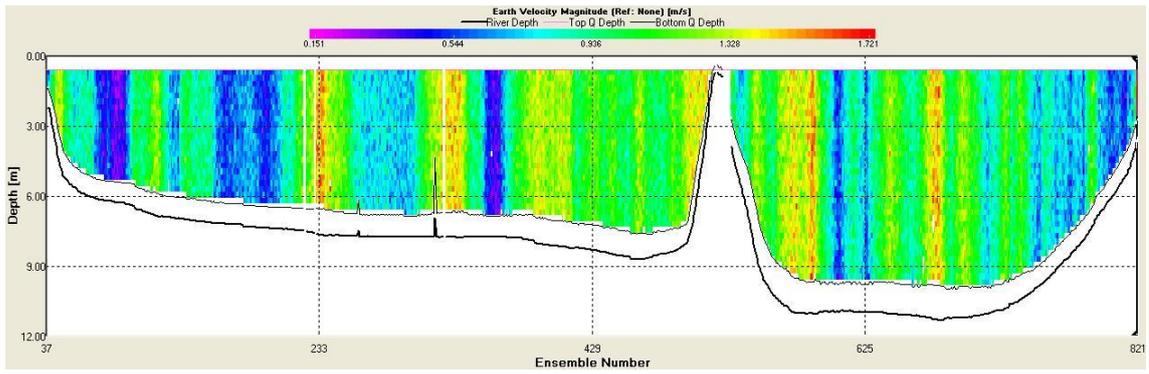


Abbildung 15.7 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1720

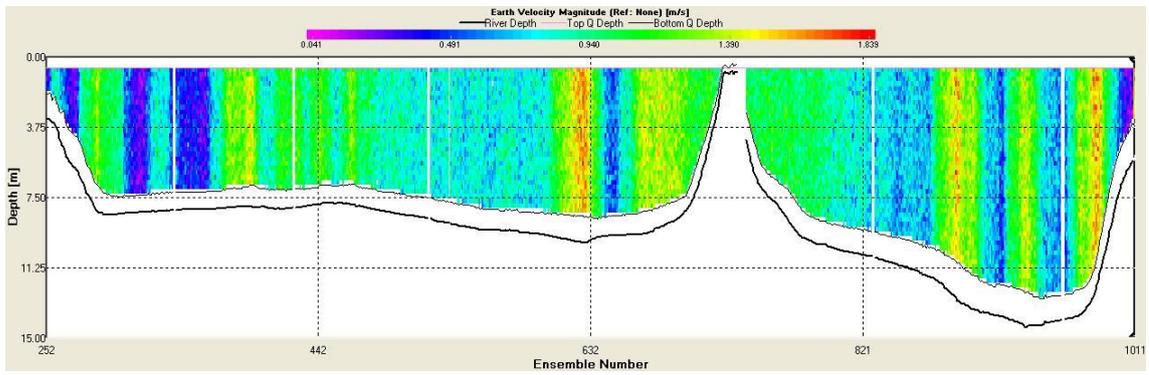


Abbildung 15.8 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1800

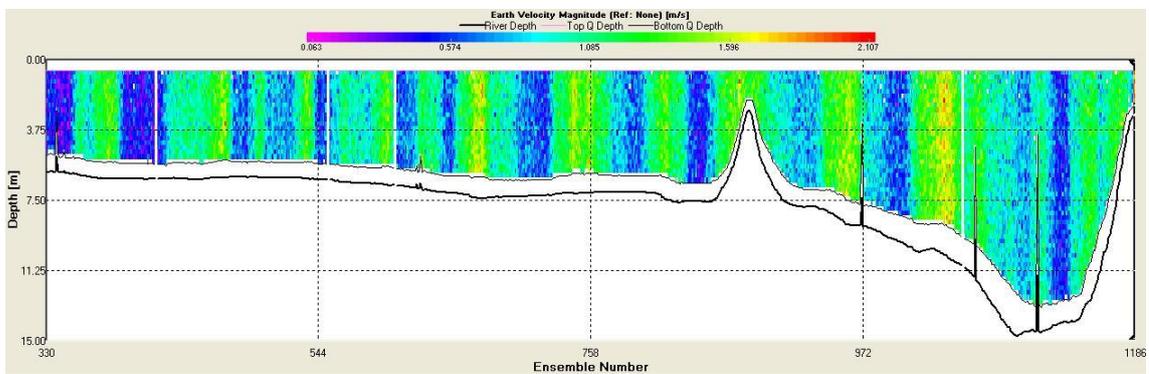


Abbildung 15.9 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1900

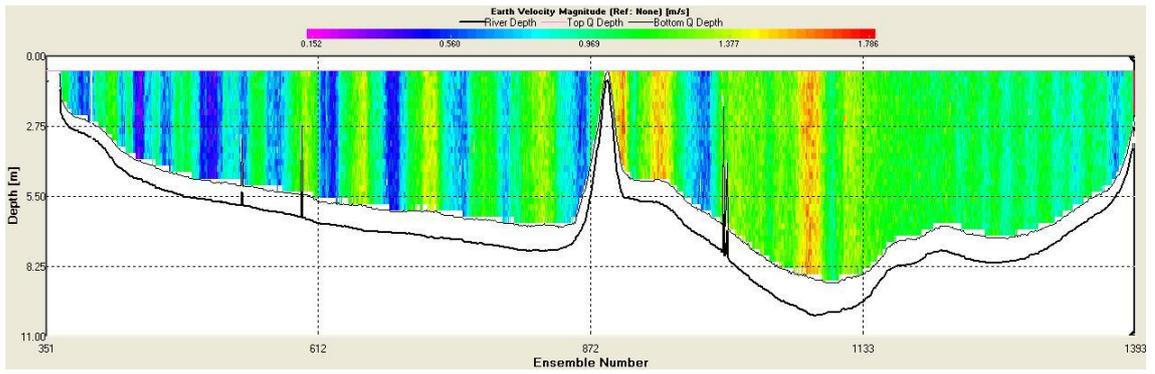


Abbildung 15.10 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2000

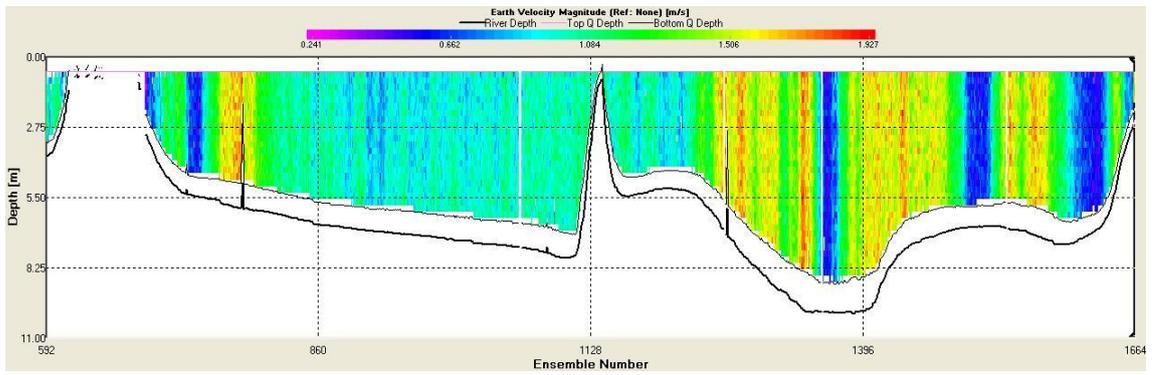


Abbildung 15.11 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2010

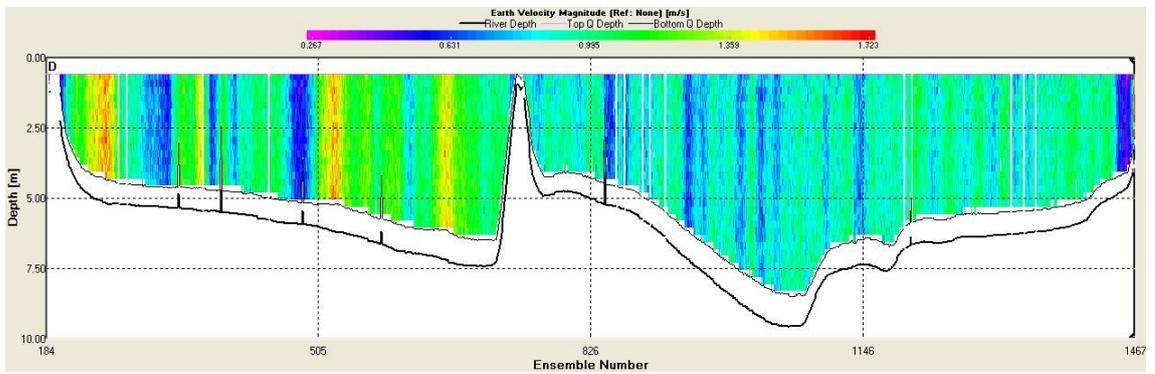


Abbildung 15.12 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2100

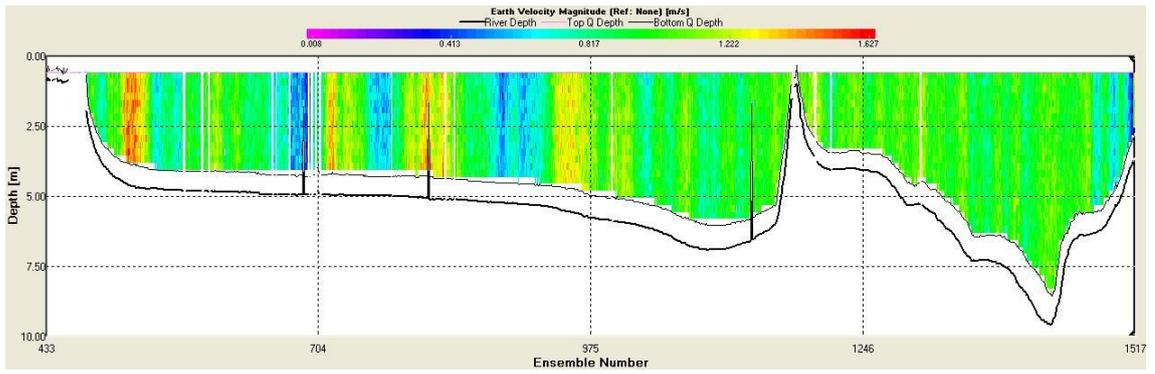


Abbildung 15.13 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2200

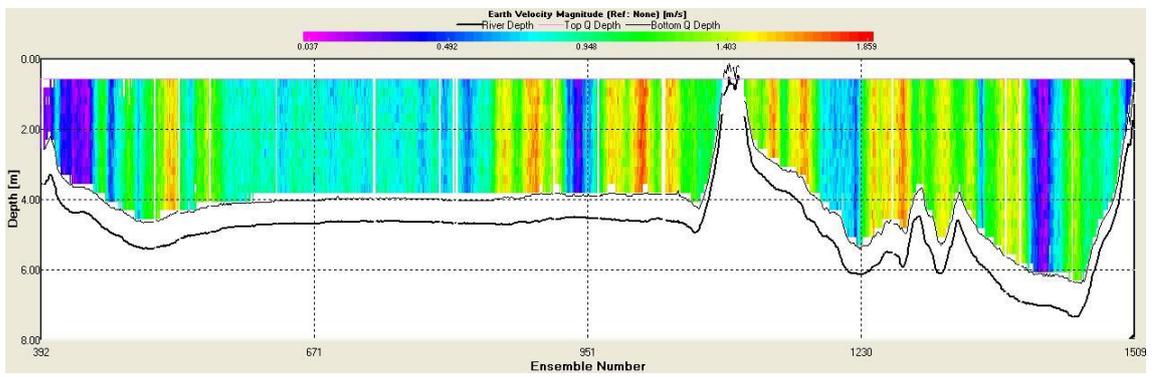


Abbildung 15.14 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2300

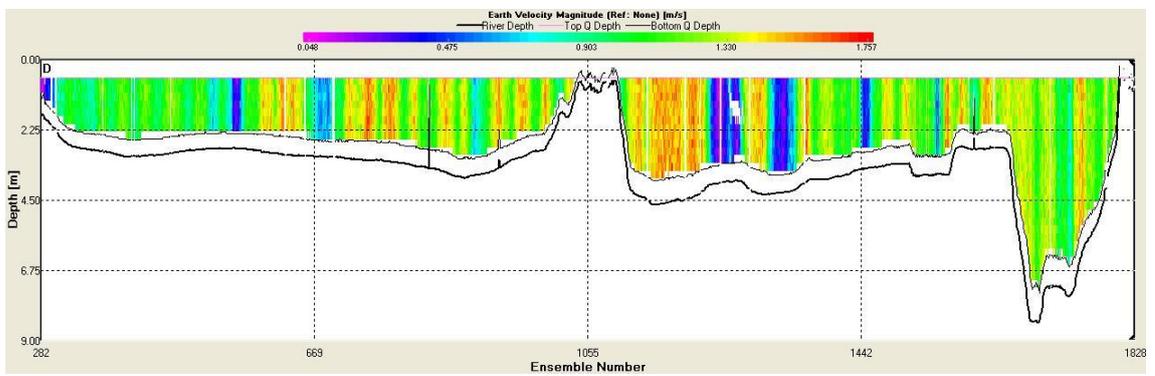


Abbildung 15.15 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2400

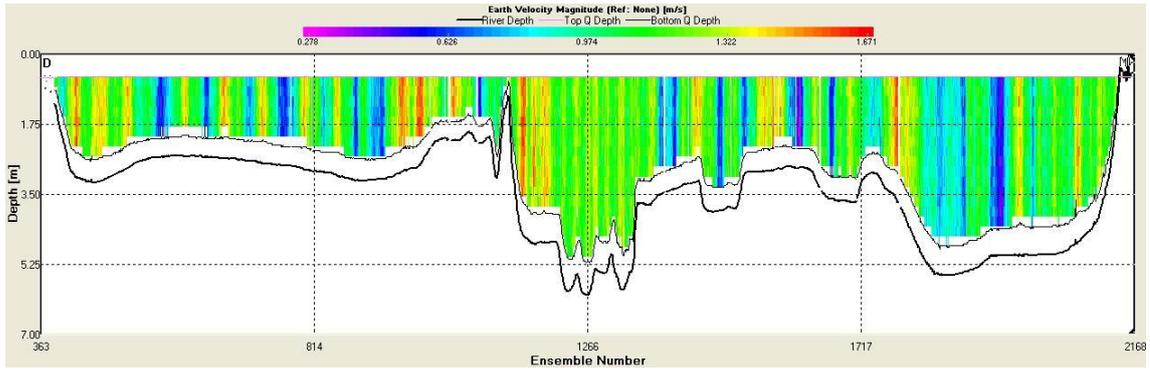


Abbildung 15.16 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2410

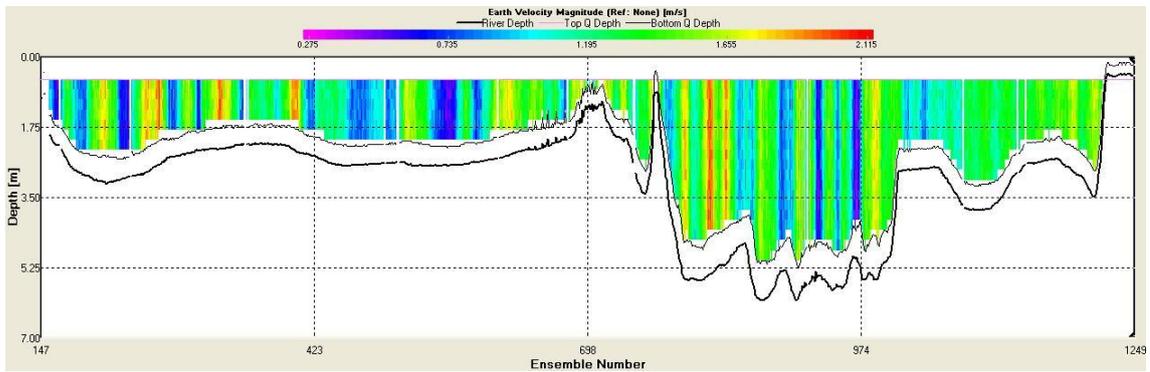


Abbildung 15.17 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2500

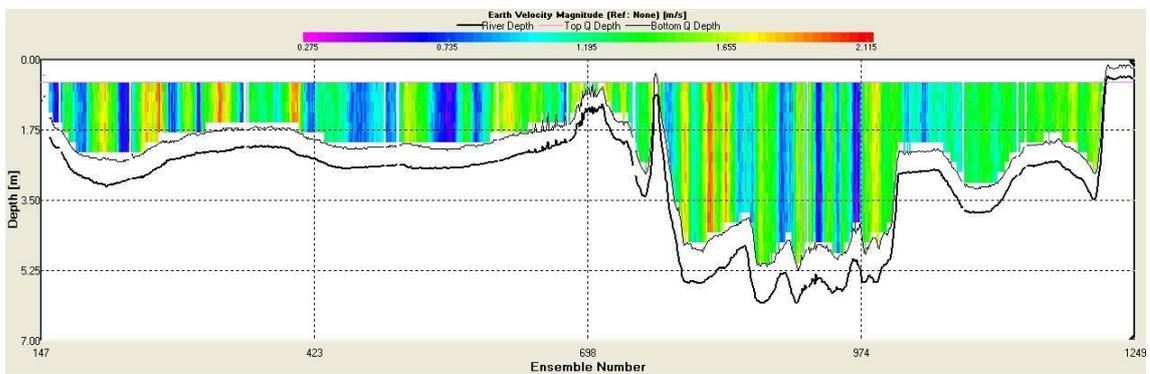


Abbildung 15.18 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2600

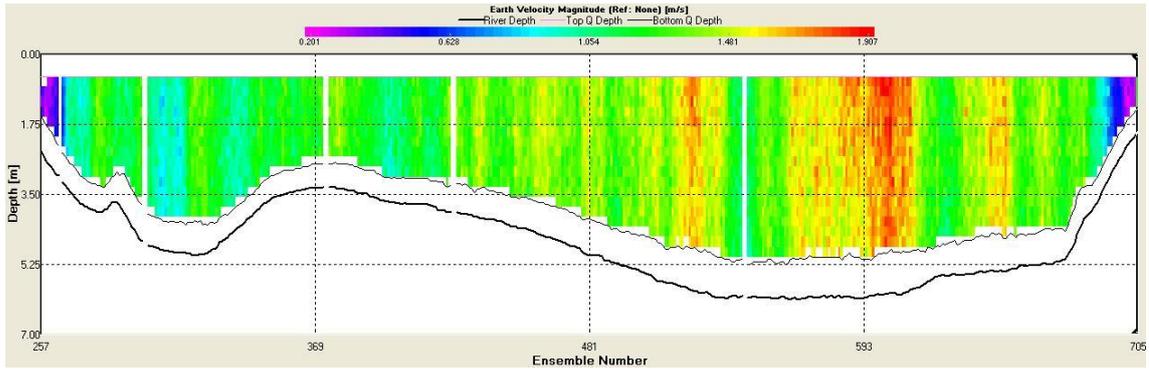


Abbildung 15.19 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2700

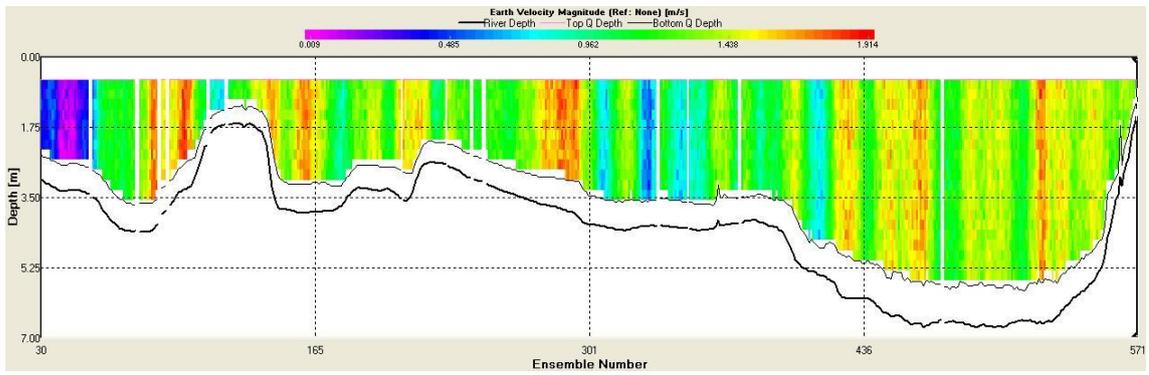


Abbildung 15.20 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2910

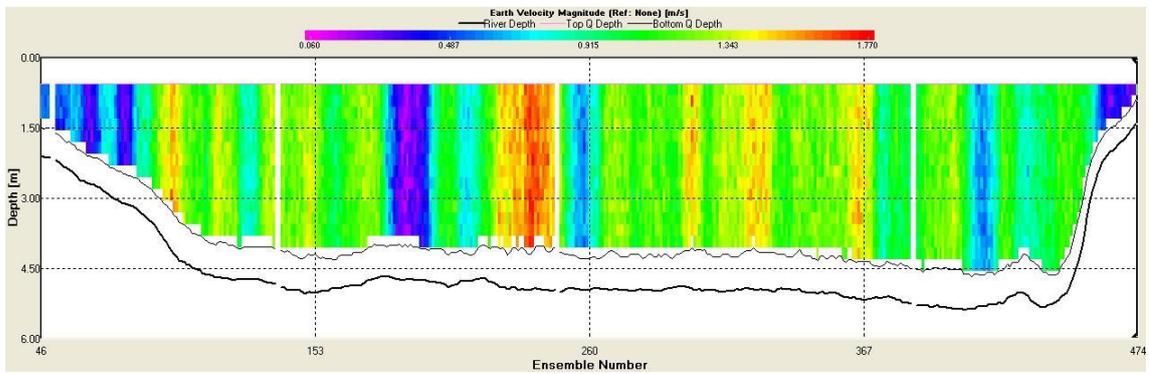


Abbildung 15.21 Fließgeschwindigkeiten, Profil 3000

- 2D Auswertung mit „BlueKanue“

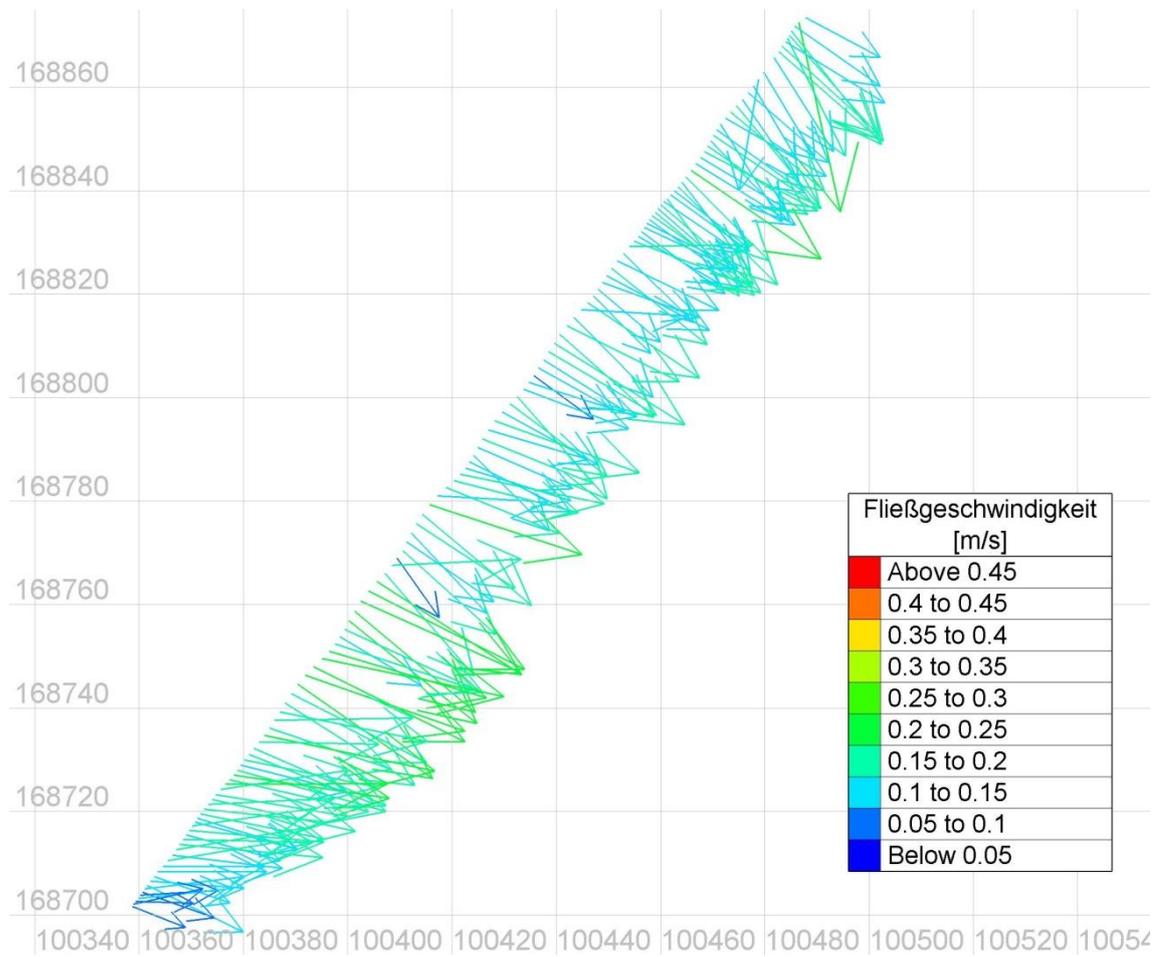


Abbildung 15.22 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1500

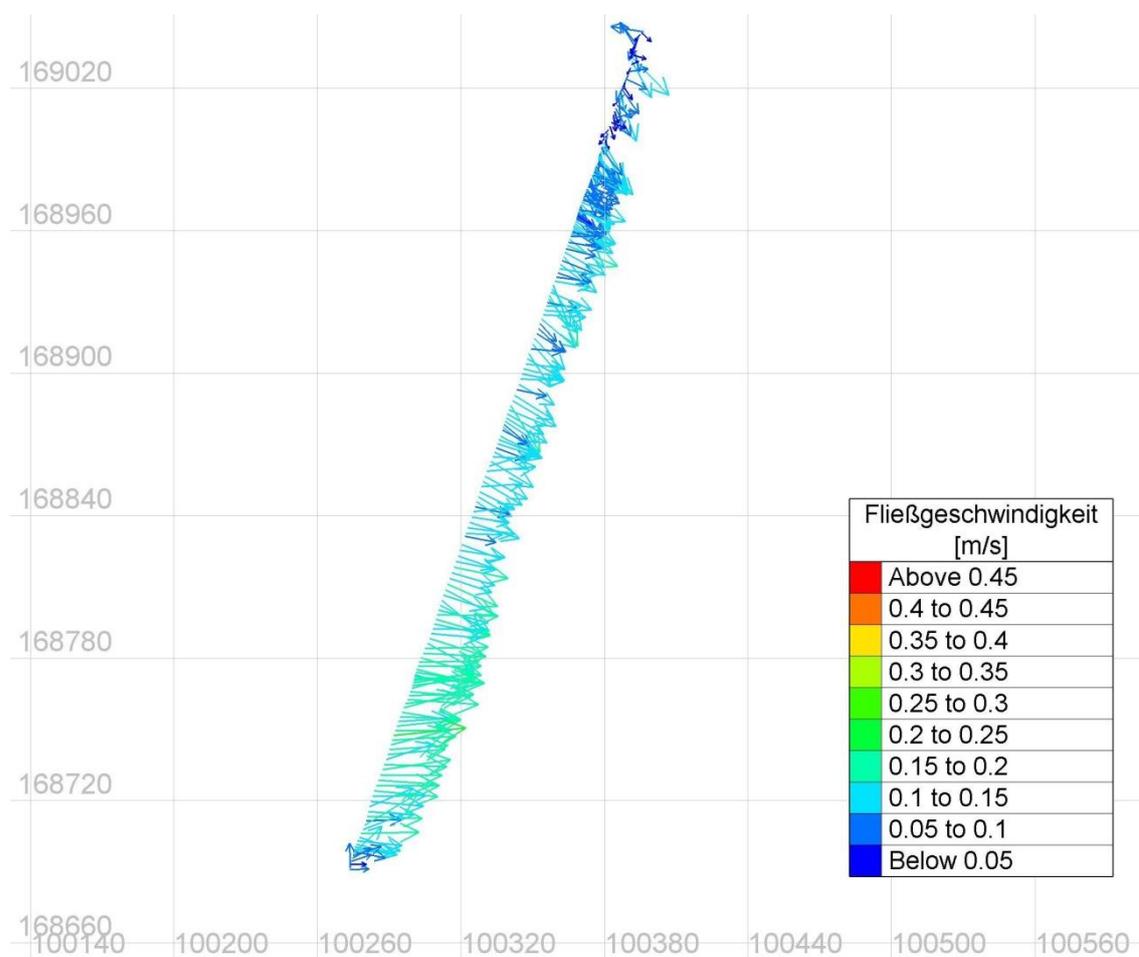


Abbildung 15.23 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1510

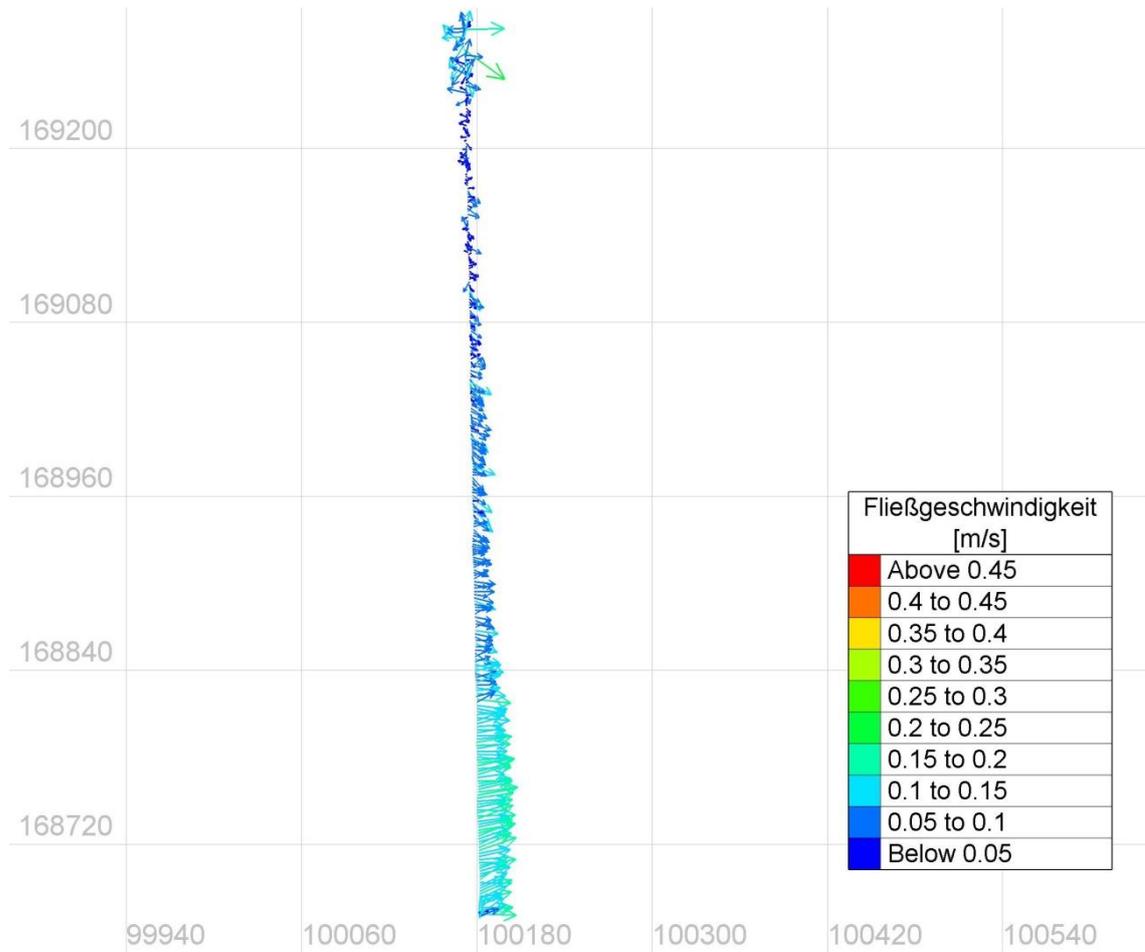


Abbildung 15.24 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1600

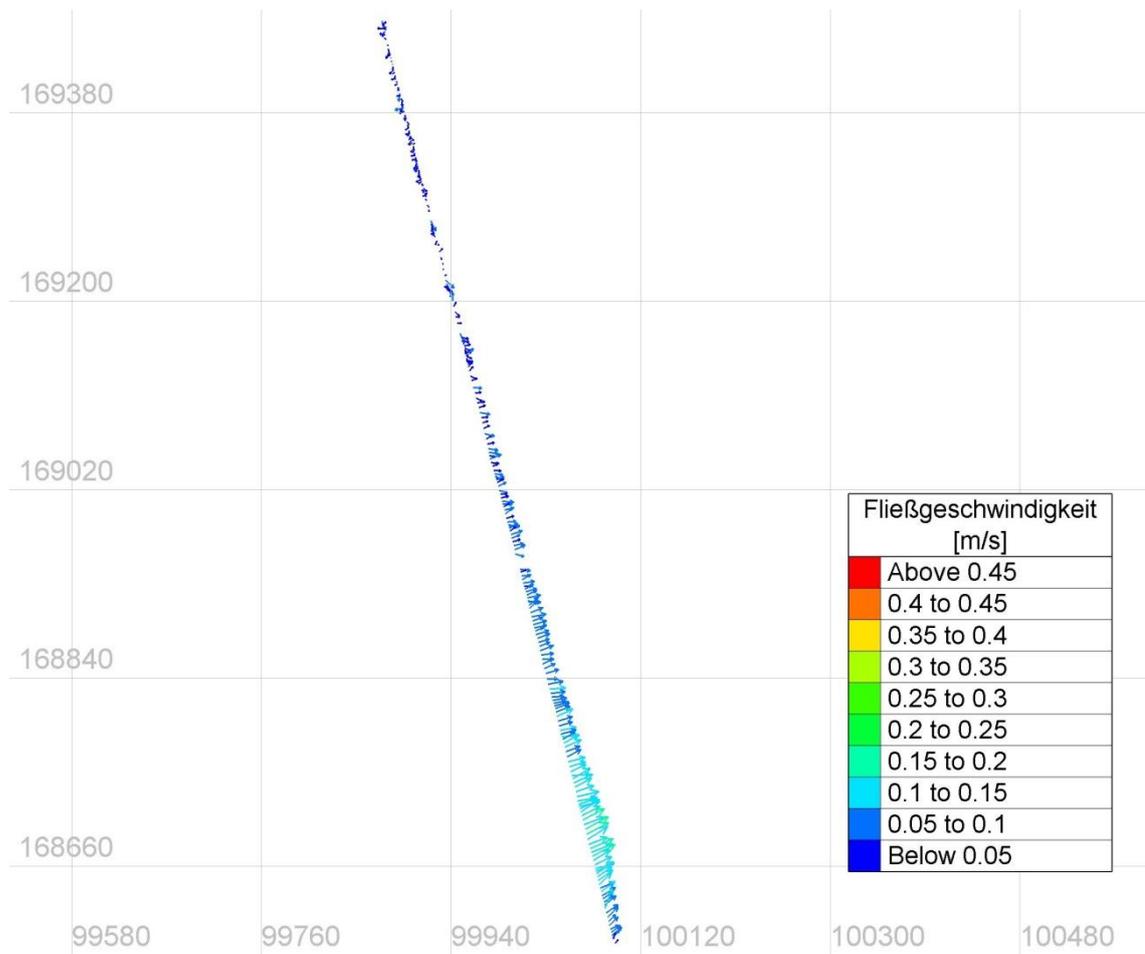


Abbildung 15.25 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1610

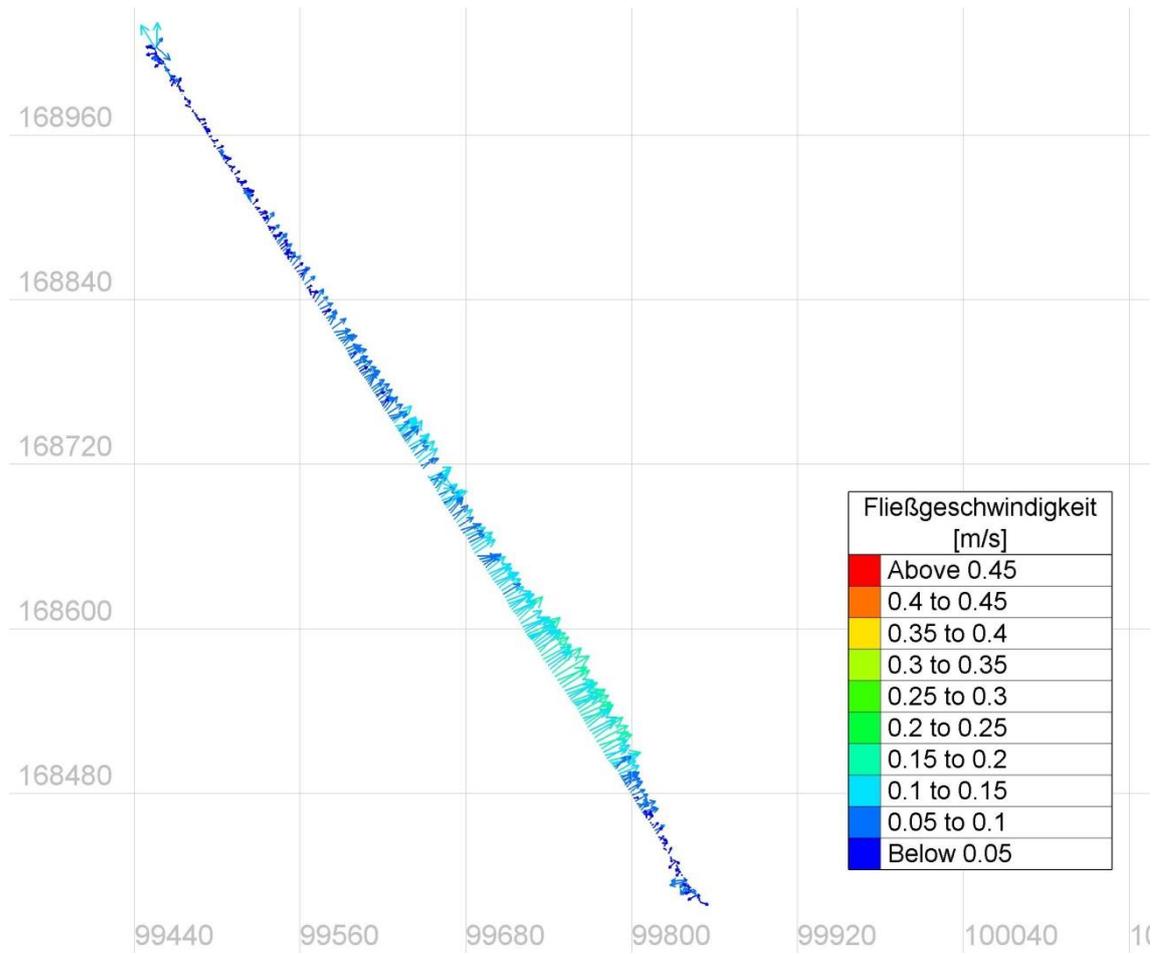


Abbildung 15.26 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1700

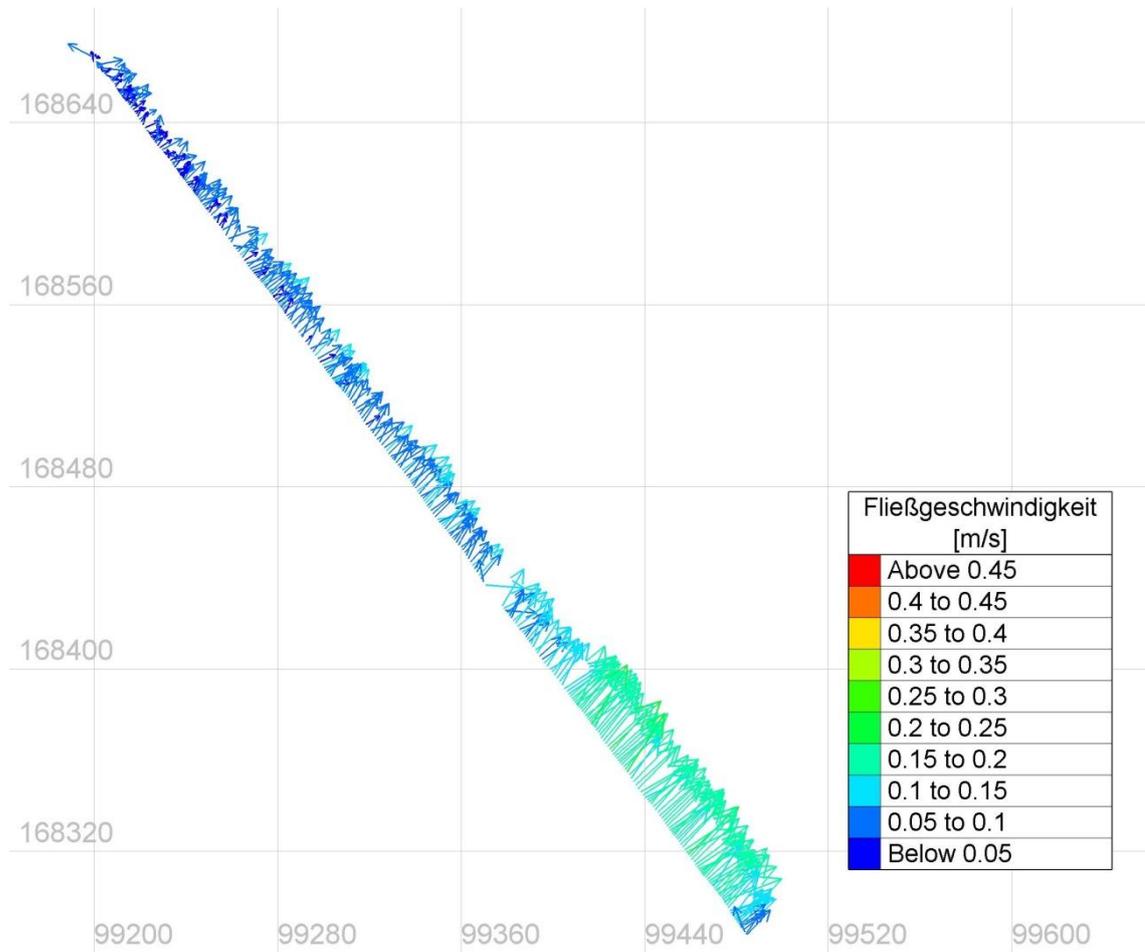


Abbildung 15.27 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1720

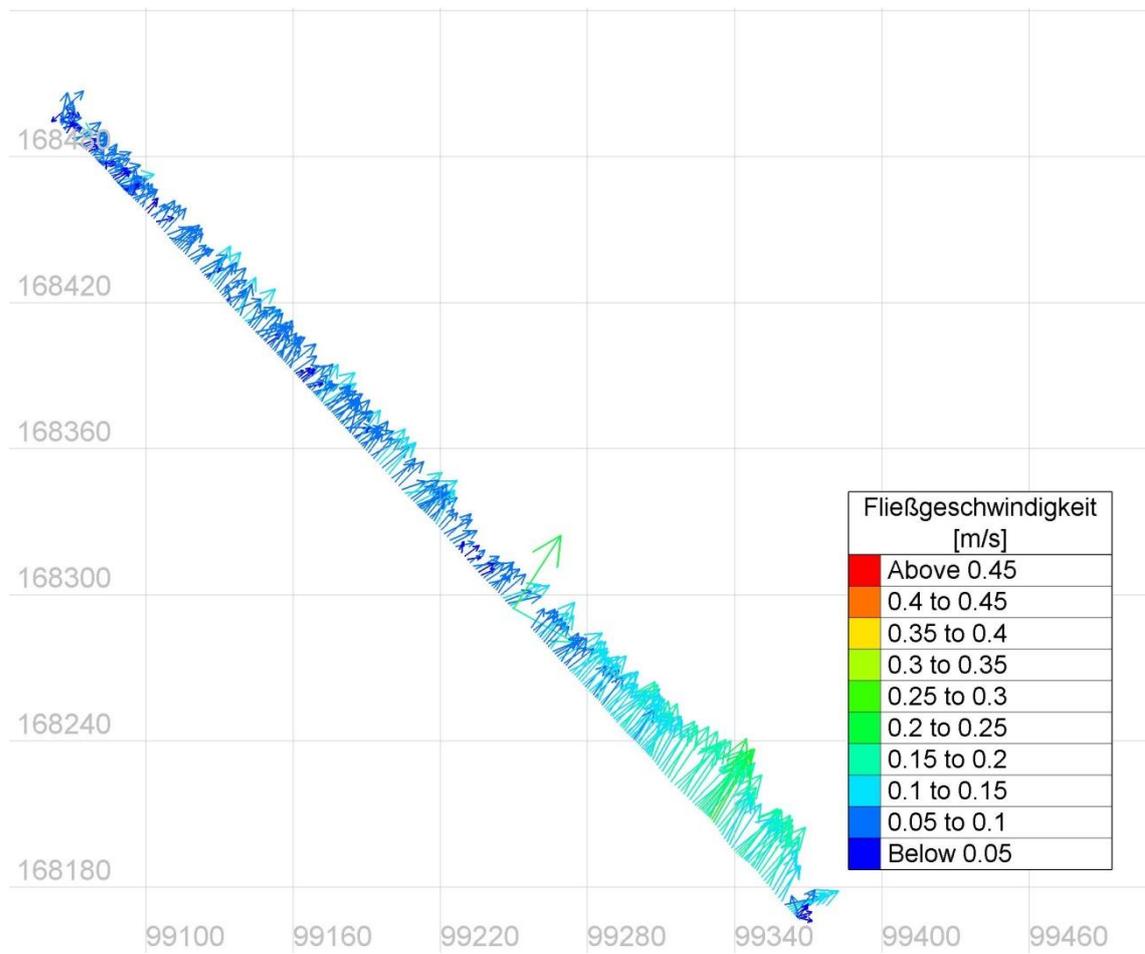


Abbildung 15.28 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1800

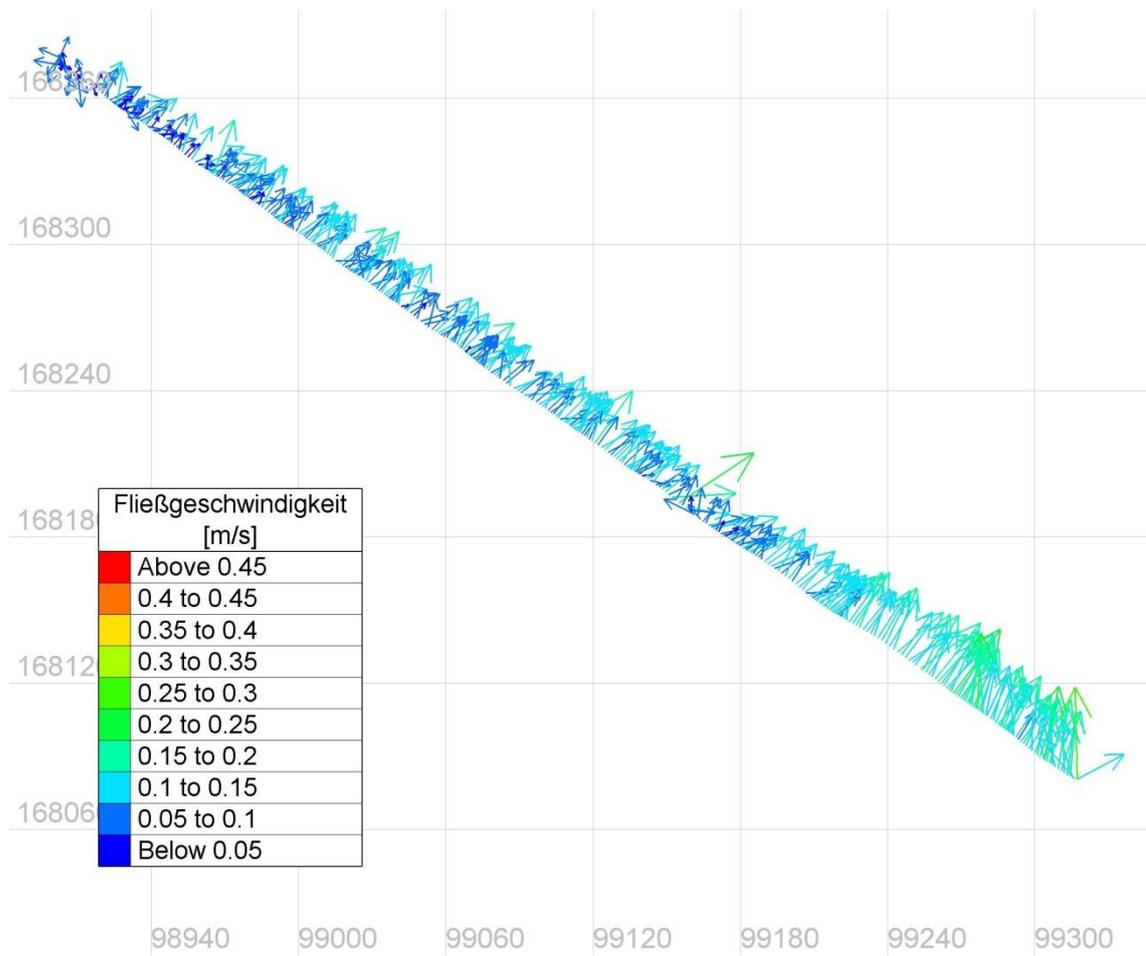


Abbildung 15.29 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 1900

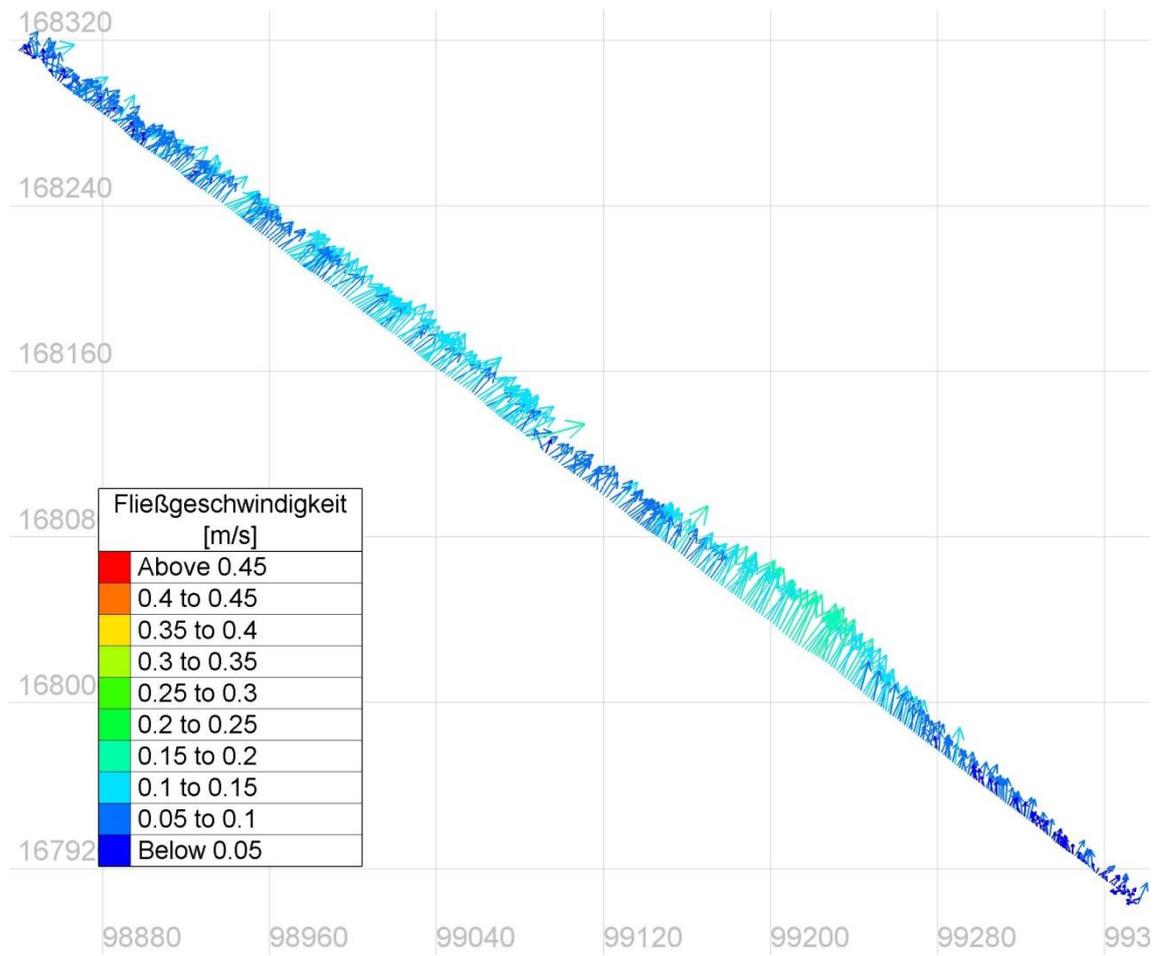


Abbildung 15.30 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2000

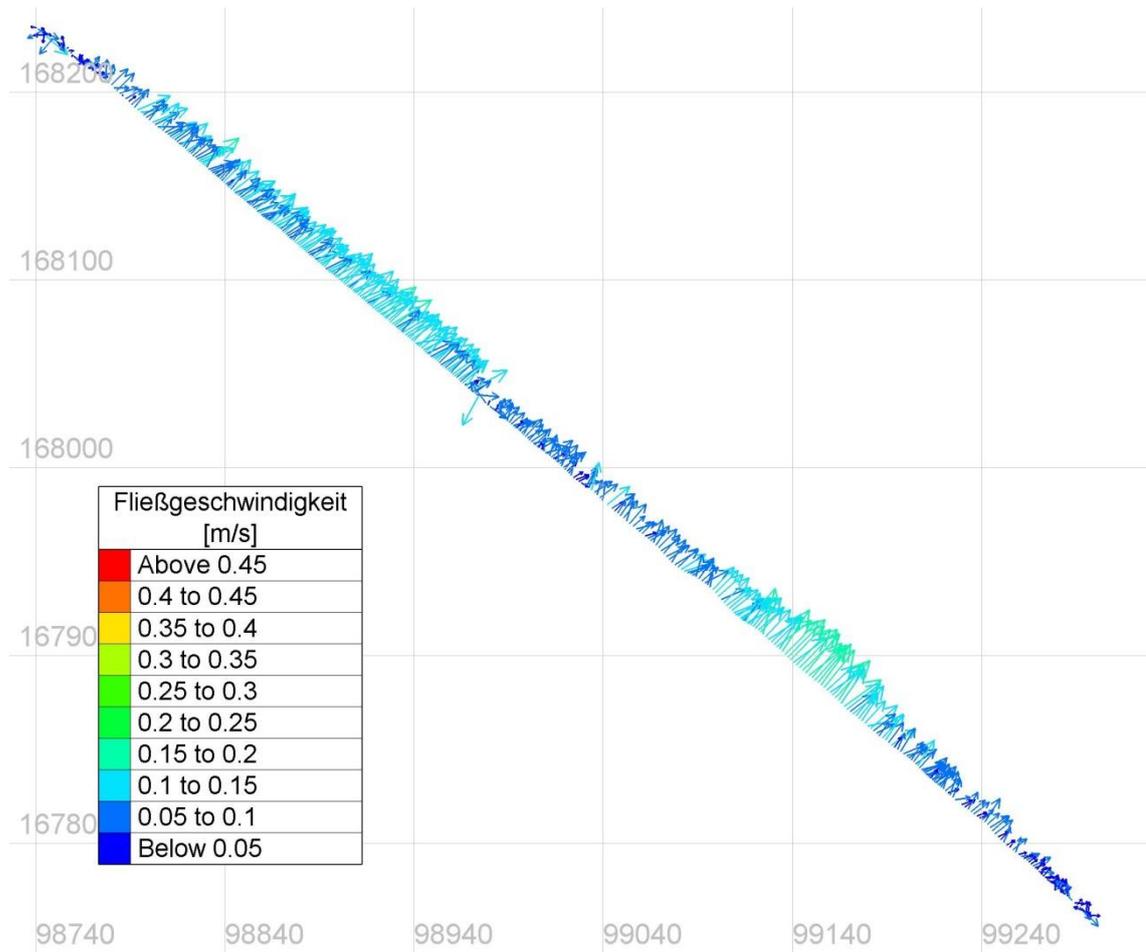


Abbildung 15.31 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2010

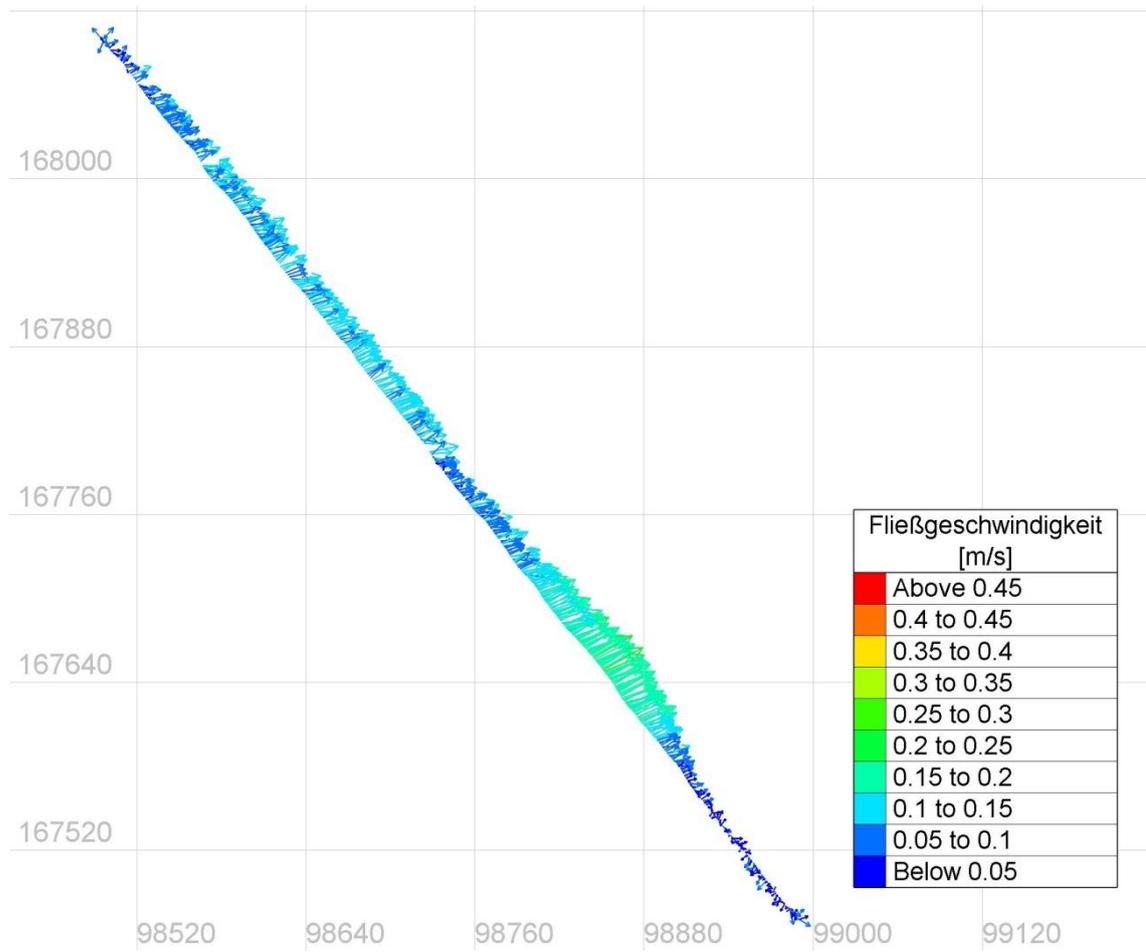


Abbildung 15.32 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2100

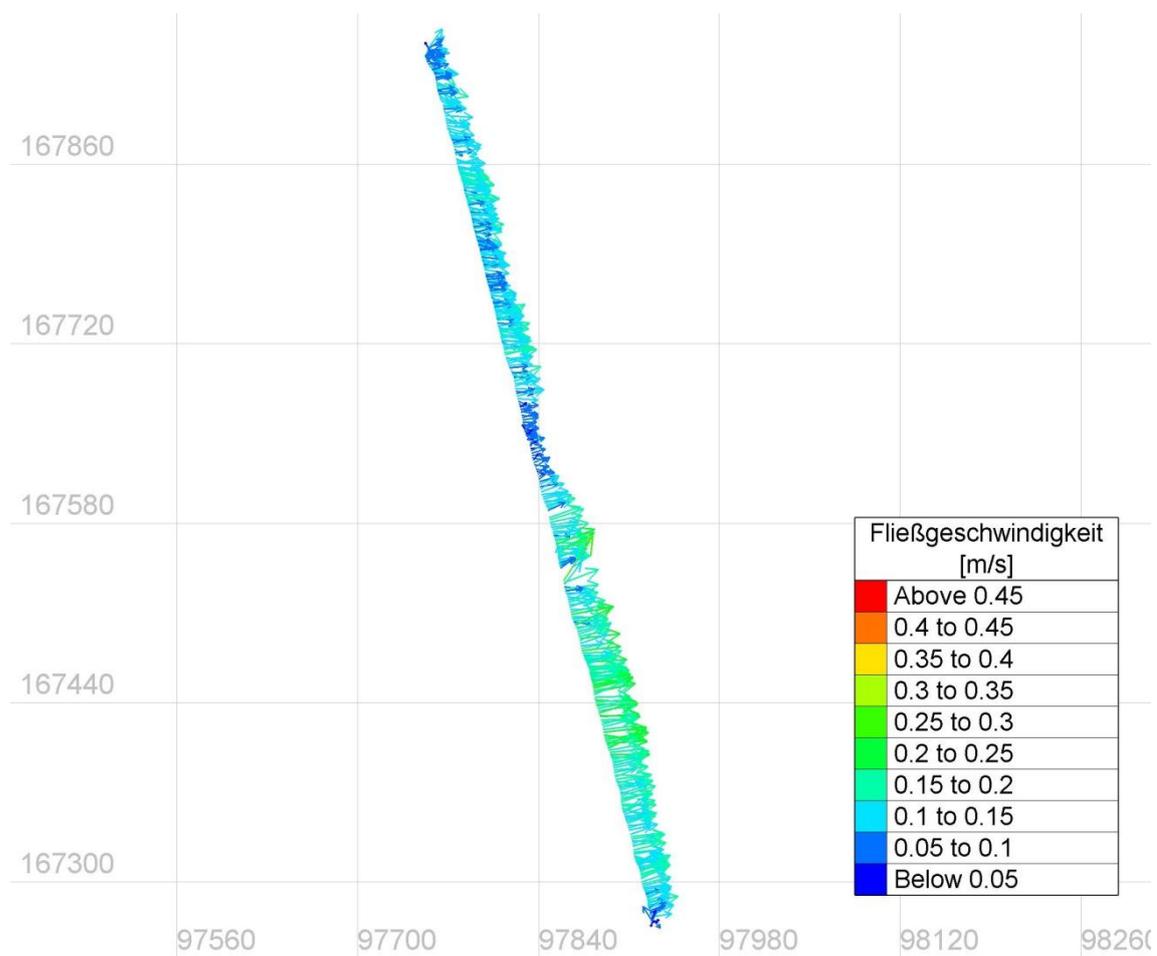


Abbildung 15.33 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2300

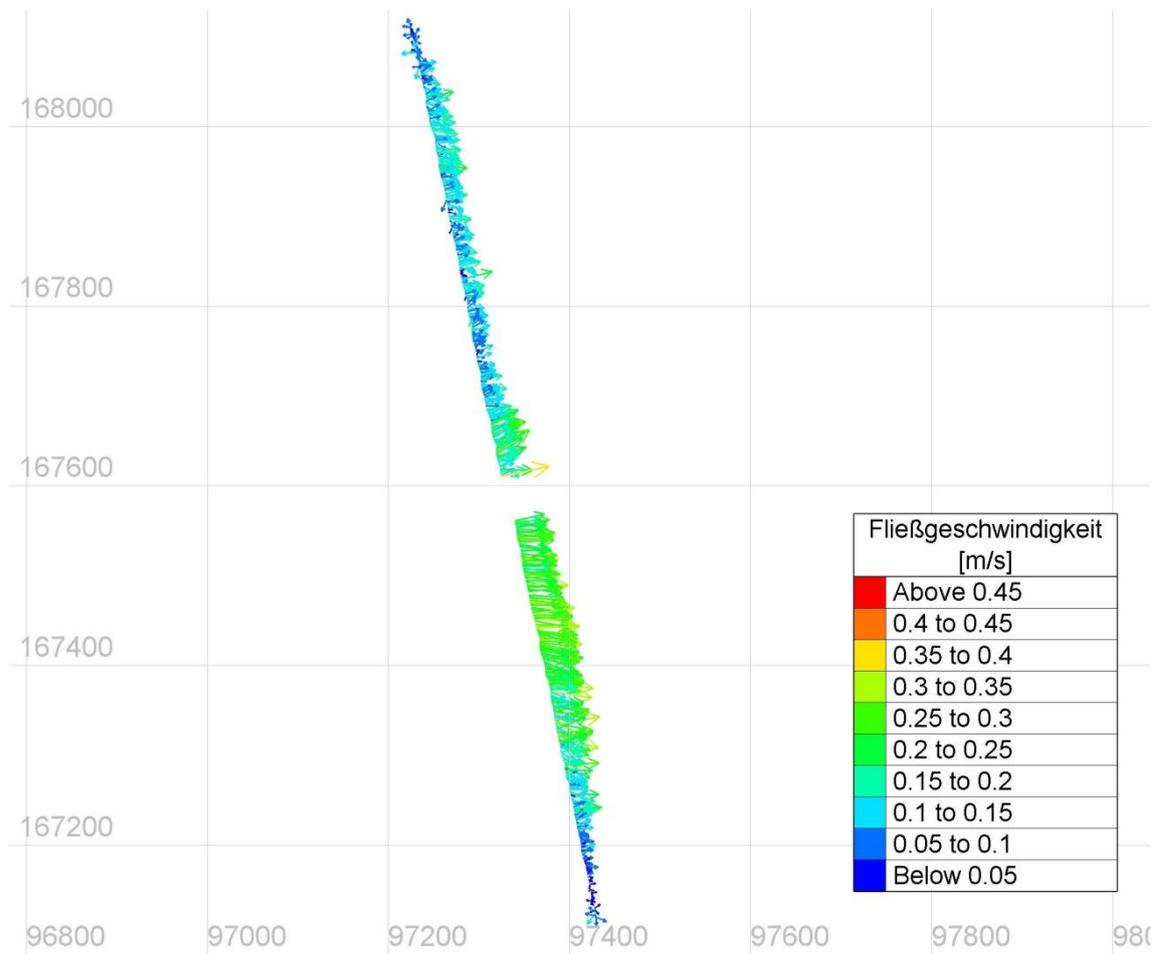


Abbildung 15.34 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2400

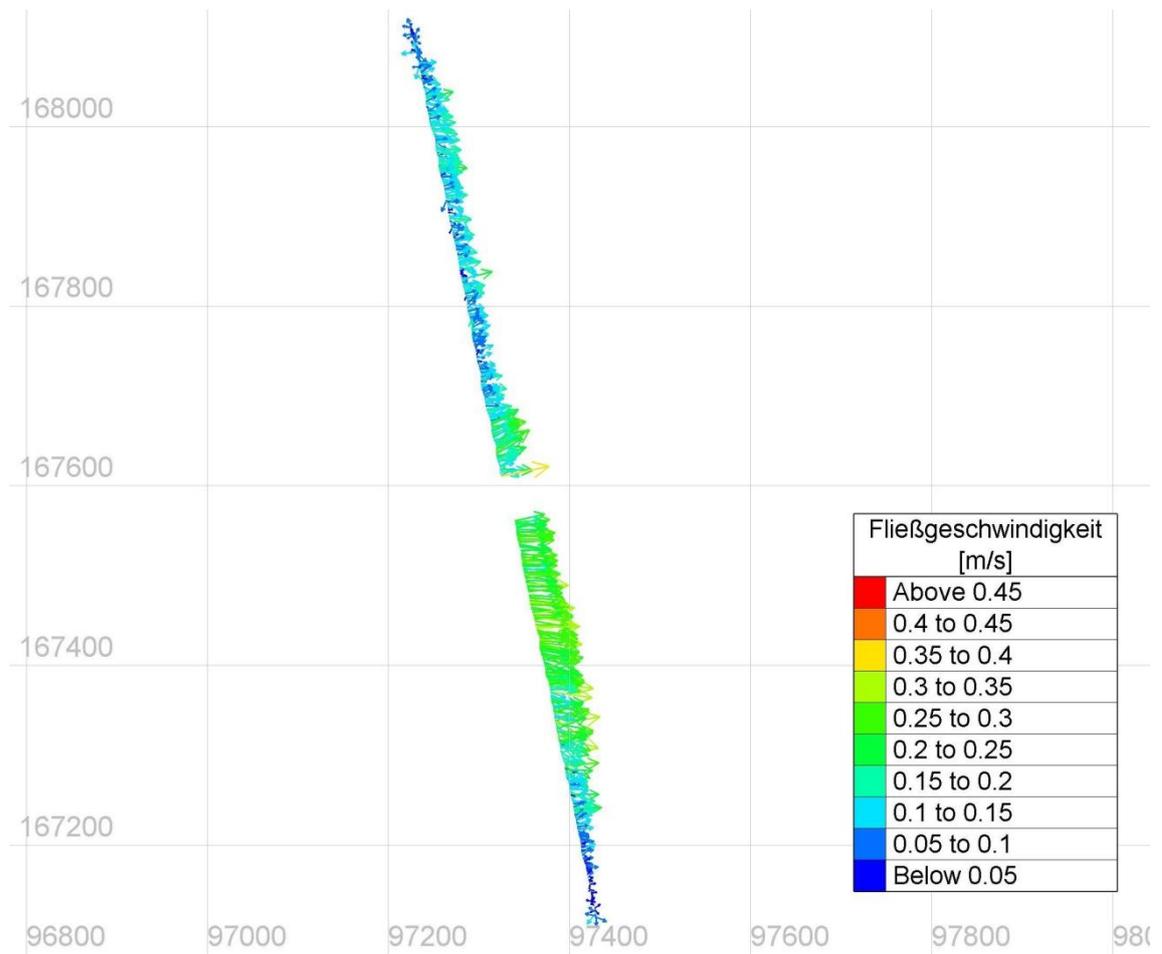


Abbildung 15.35 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2410

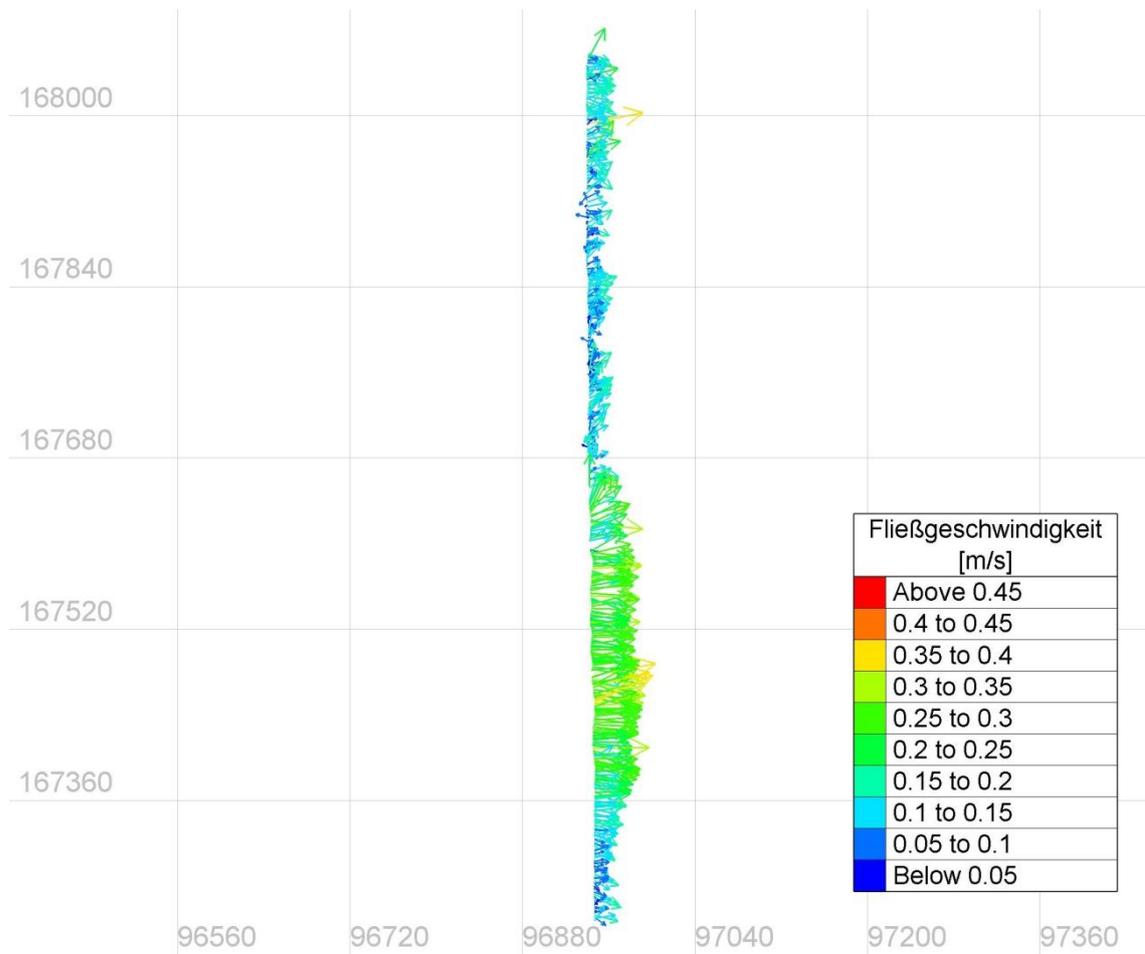


Abbildung 15.36 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2500

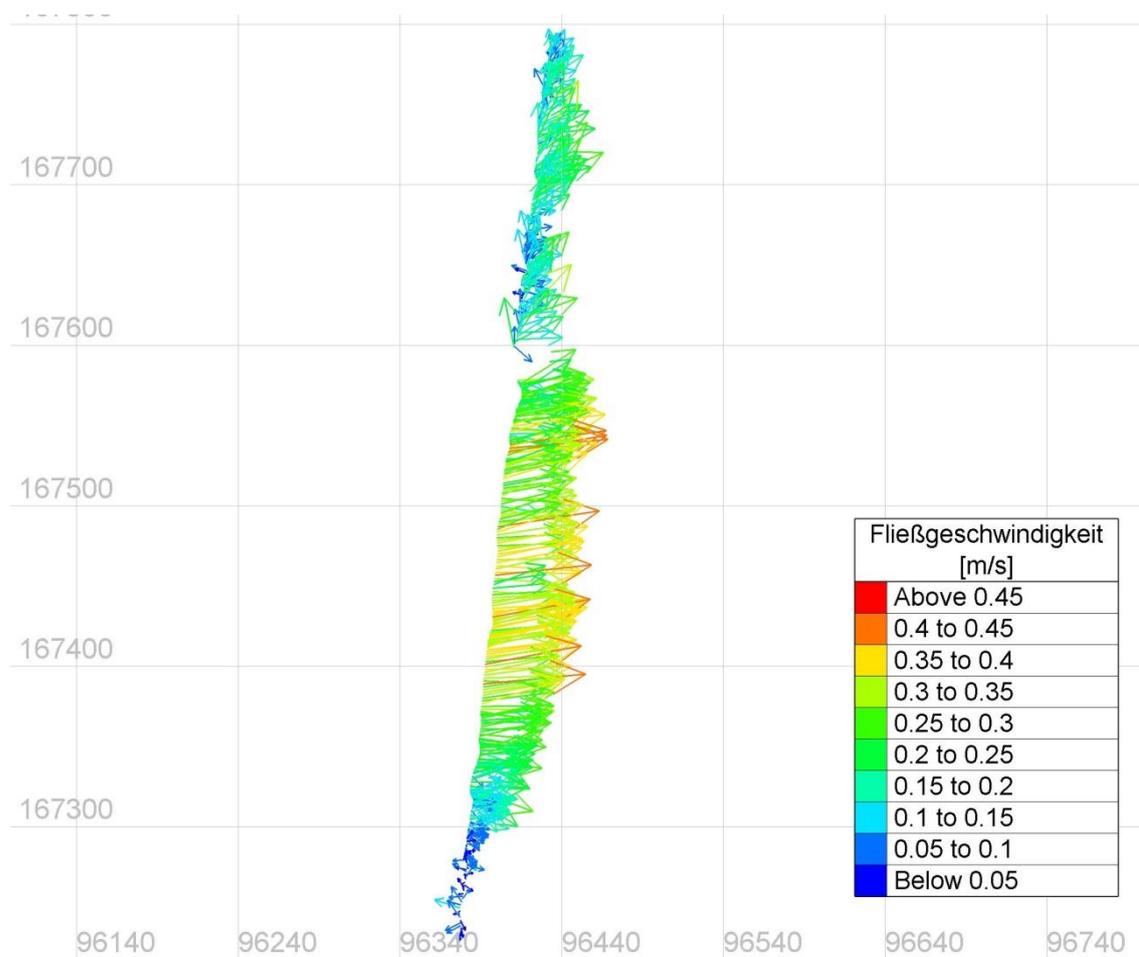


Abbildung 15.37 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2600

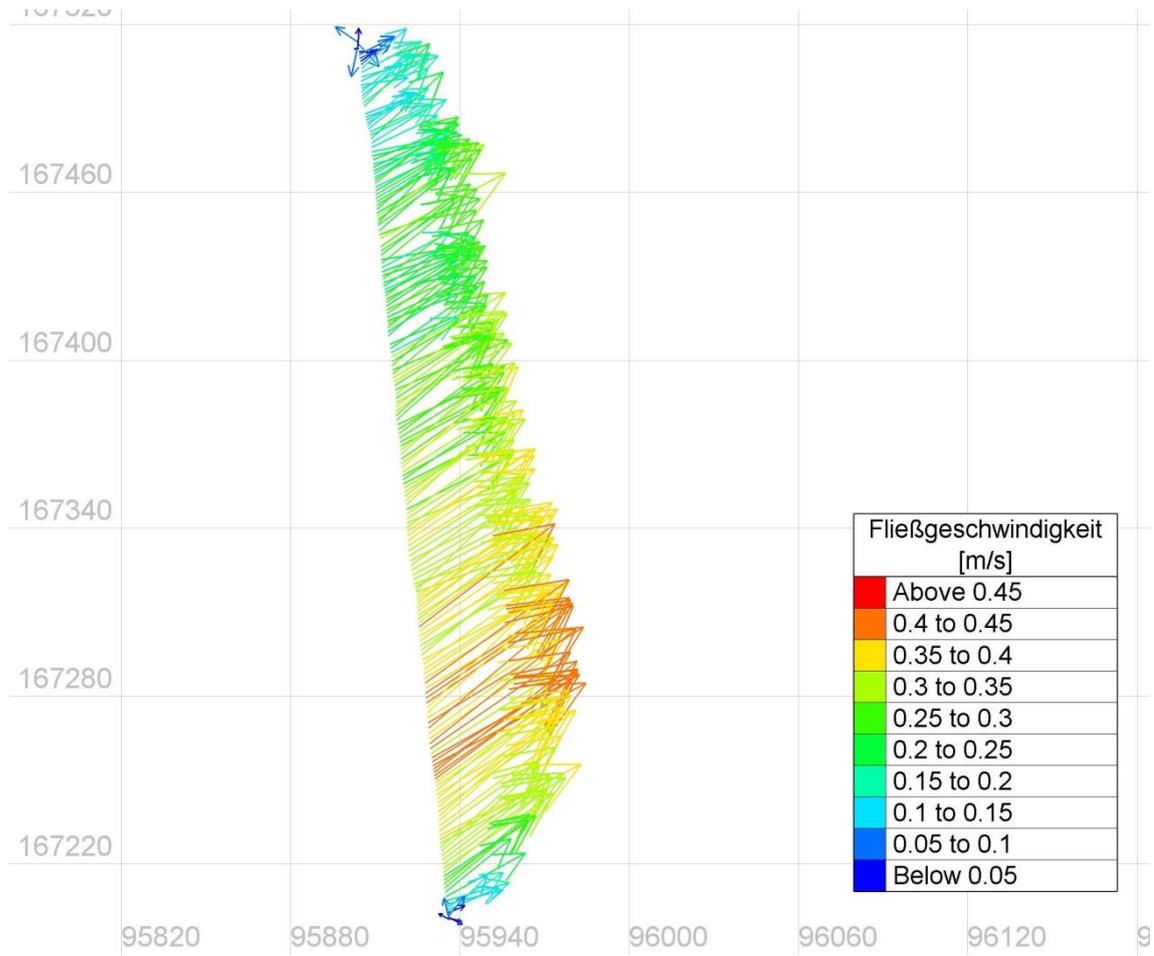


Abbildung 15.38 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2700

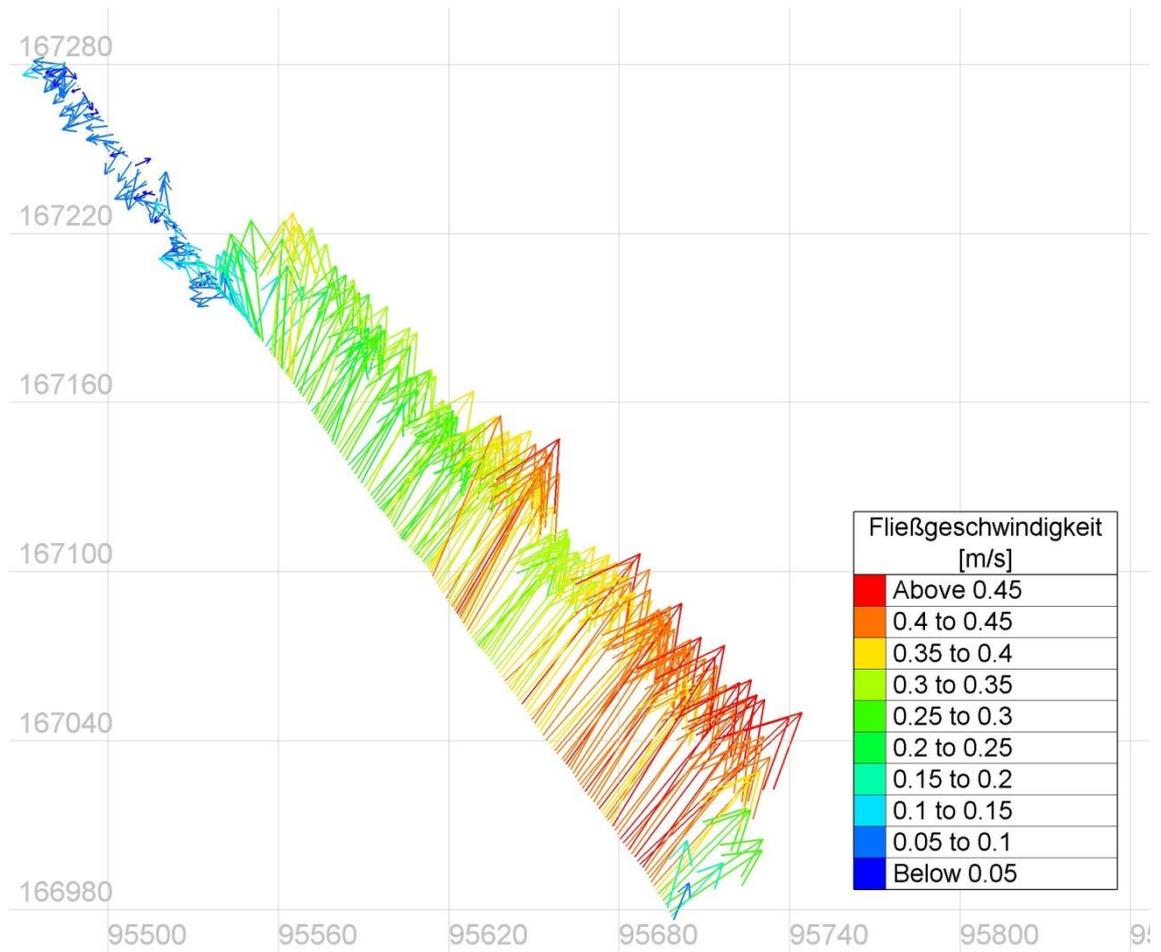


Abbildung 15.39 Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Profil 2910

- 3D Auswertung mit BlueKanue

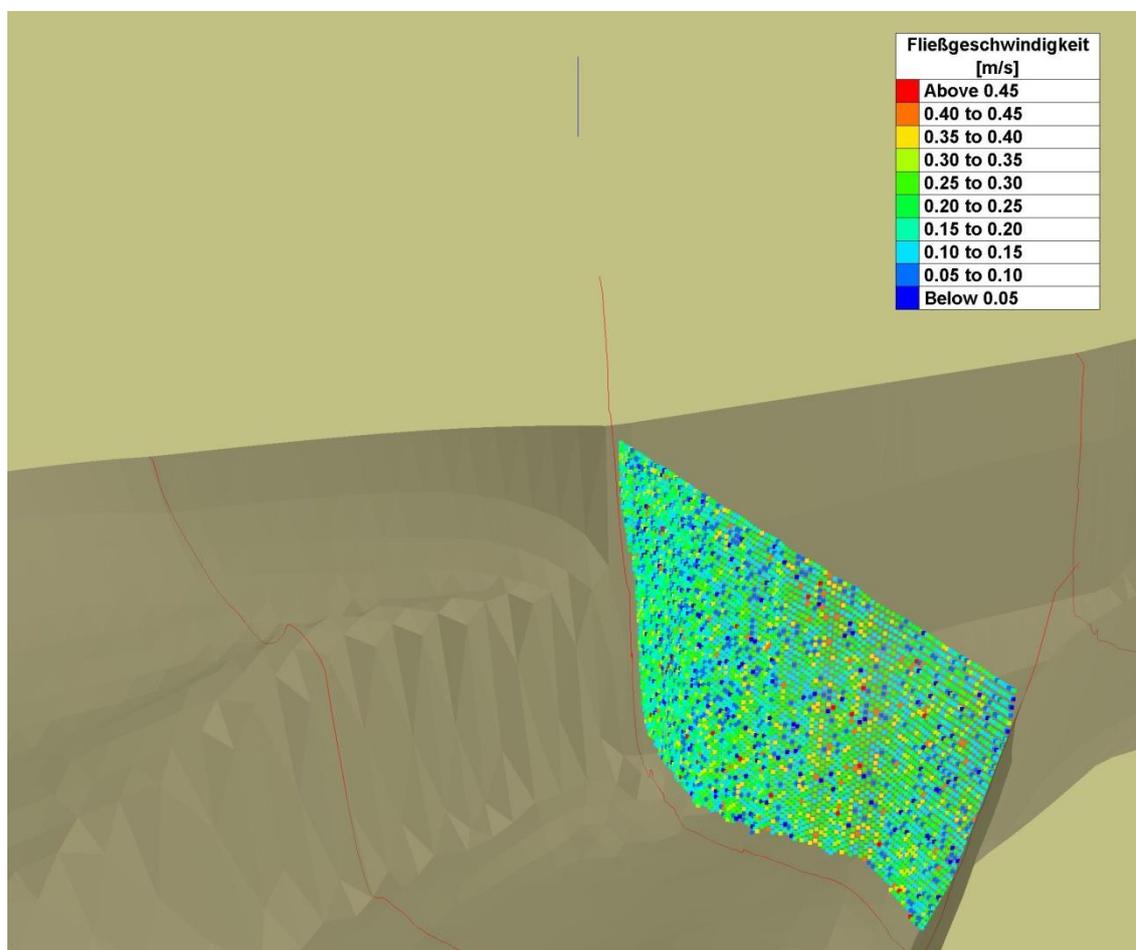


Abbildung 15.40 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1500

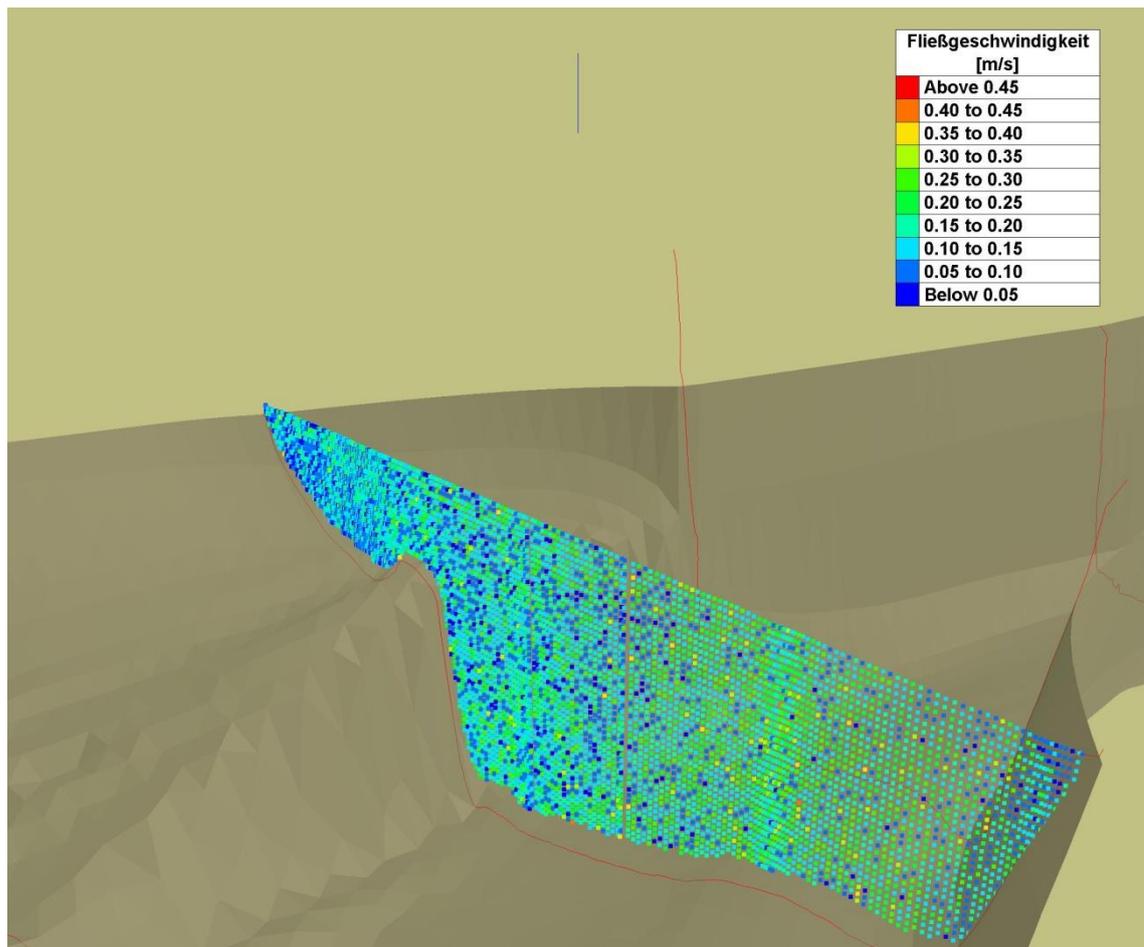


Abbildung 15.41 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1510

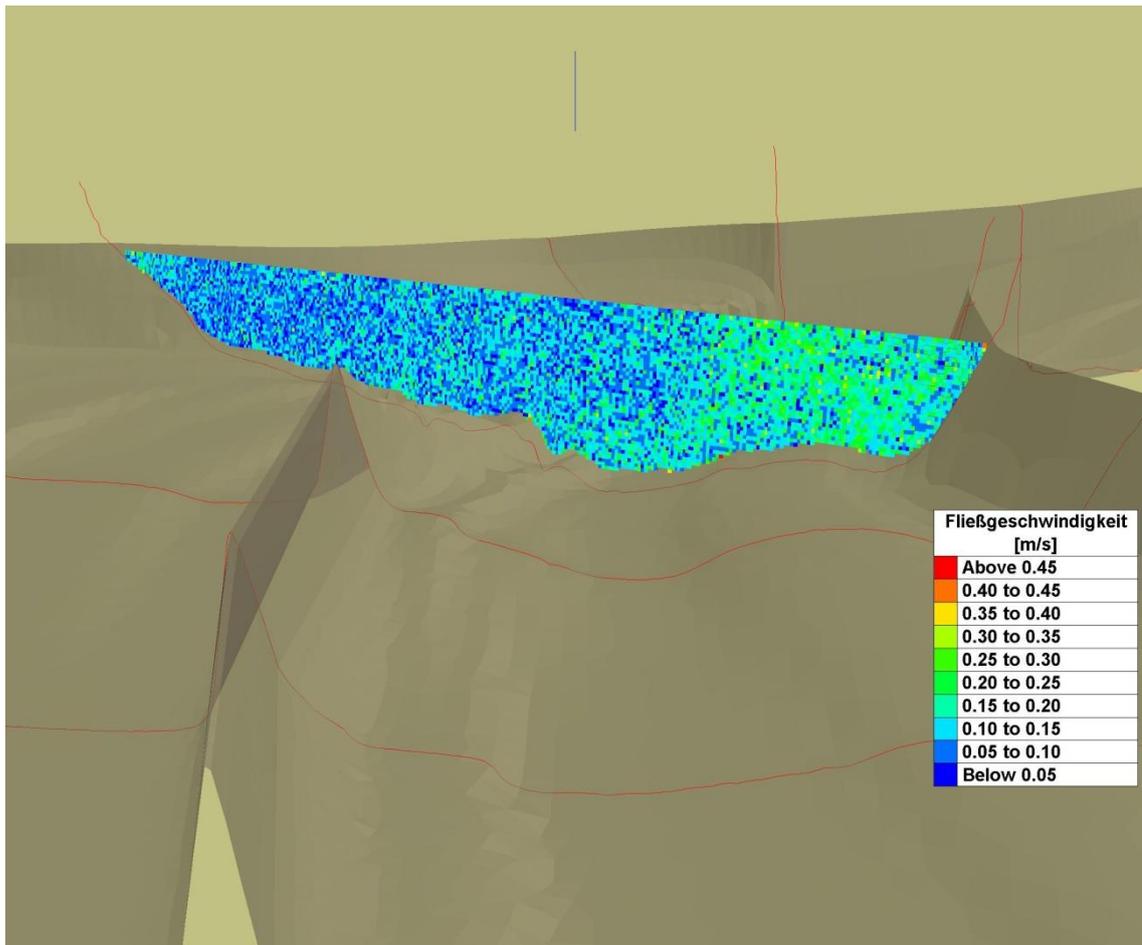


Abbildung 15.42 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1600

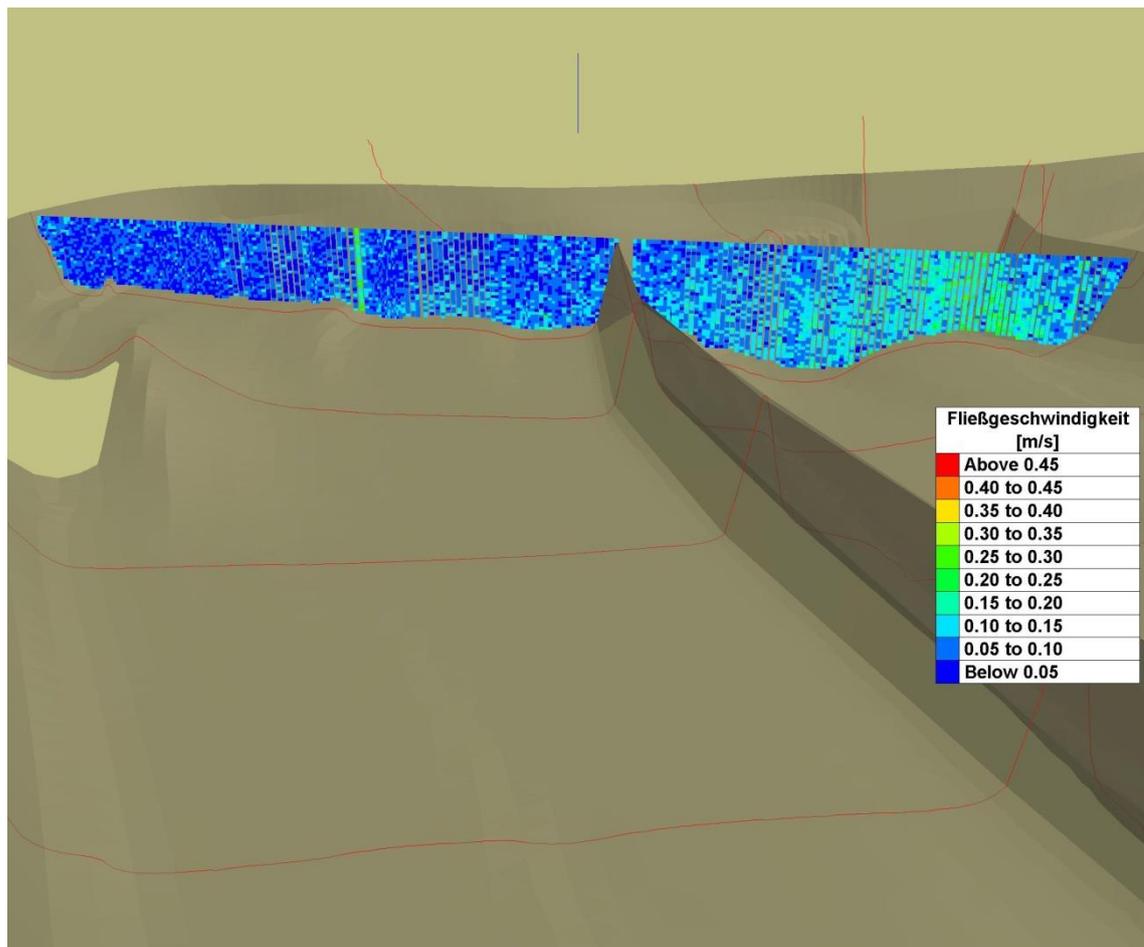


Abbildung 15.43 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1610

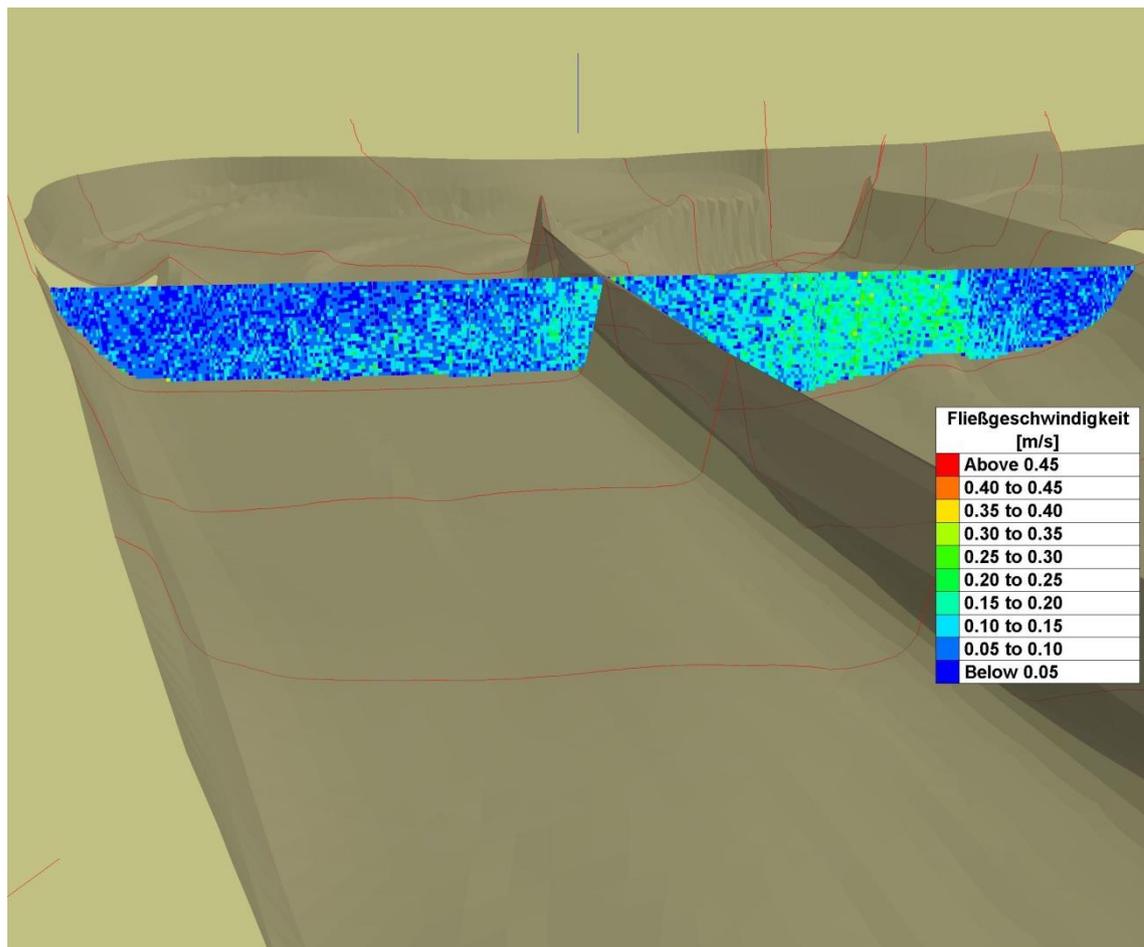


Abbildung 15.44 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1700

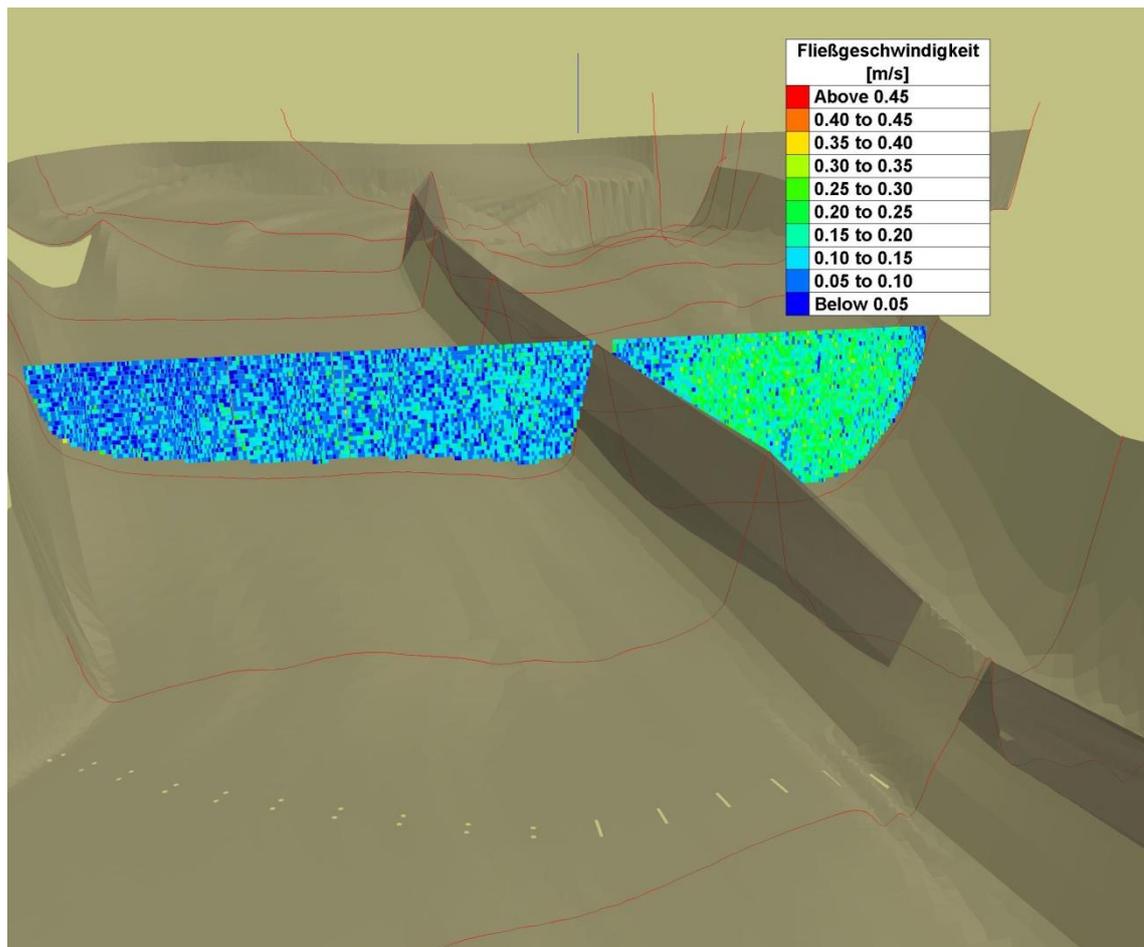


Abbildung 15.45 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1720

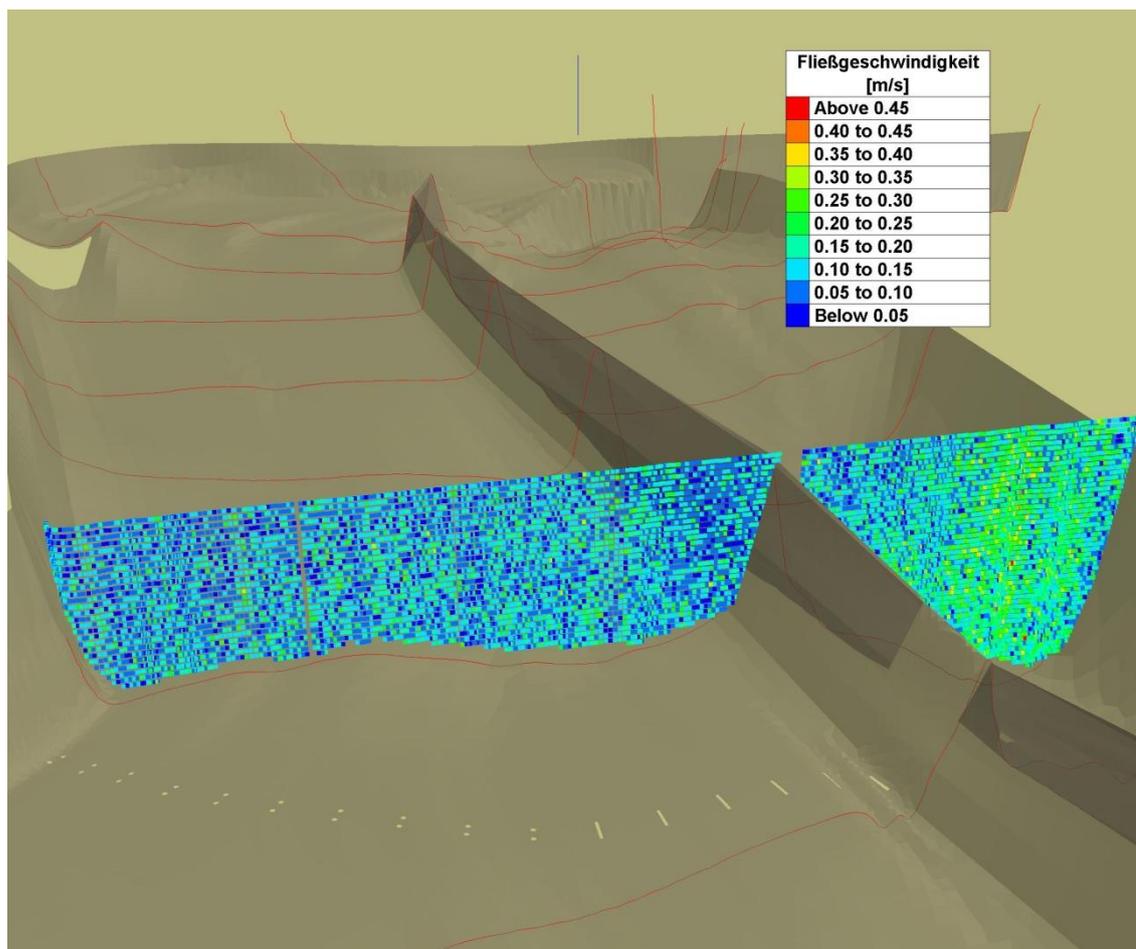


Abbildung 15.46 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1800

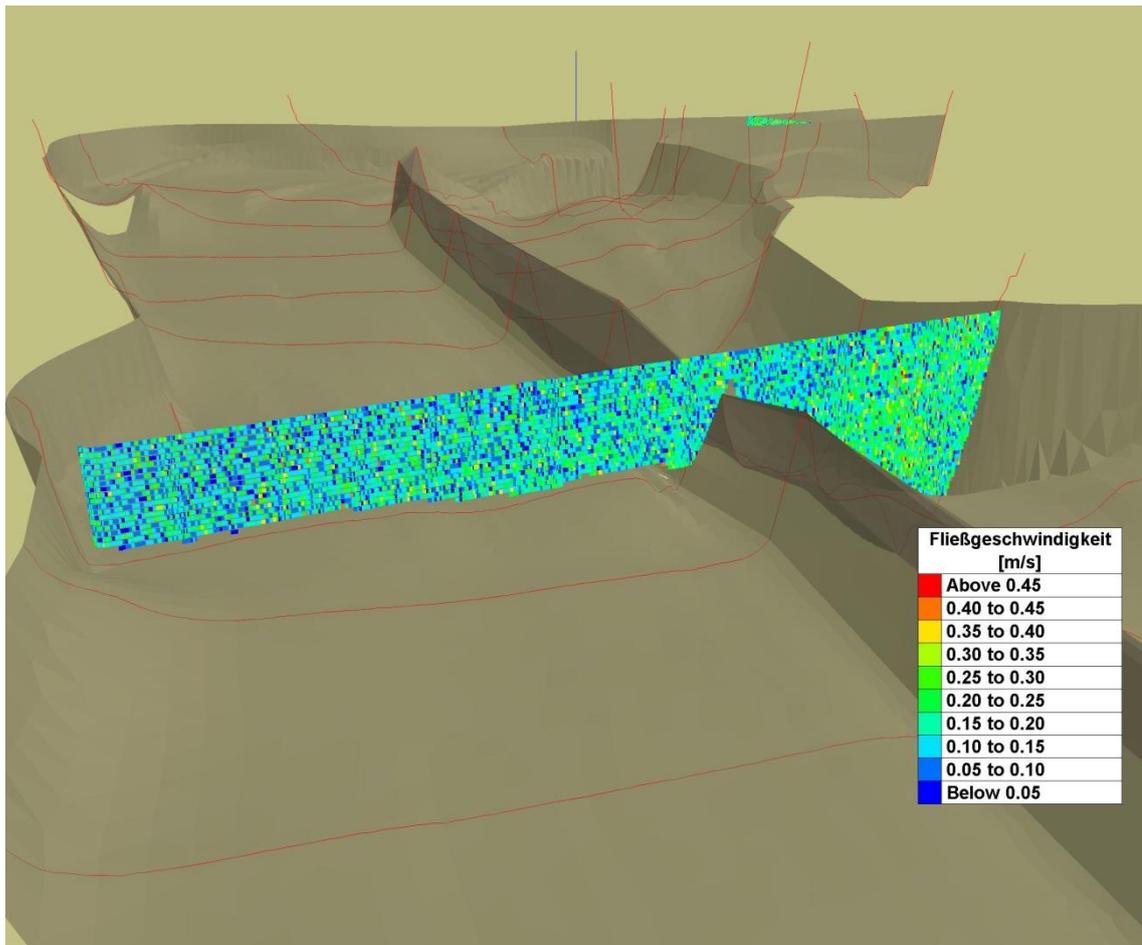


Abbildung 15.47 Fließgeschwindigkeiten, Profil 1900

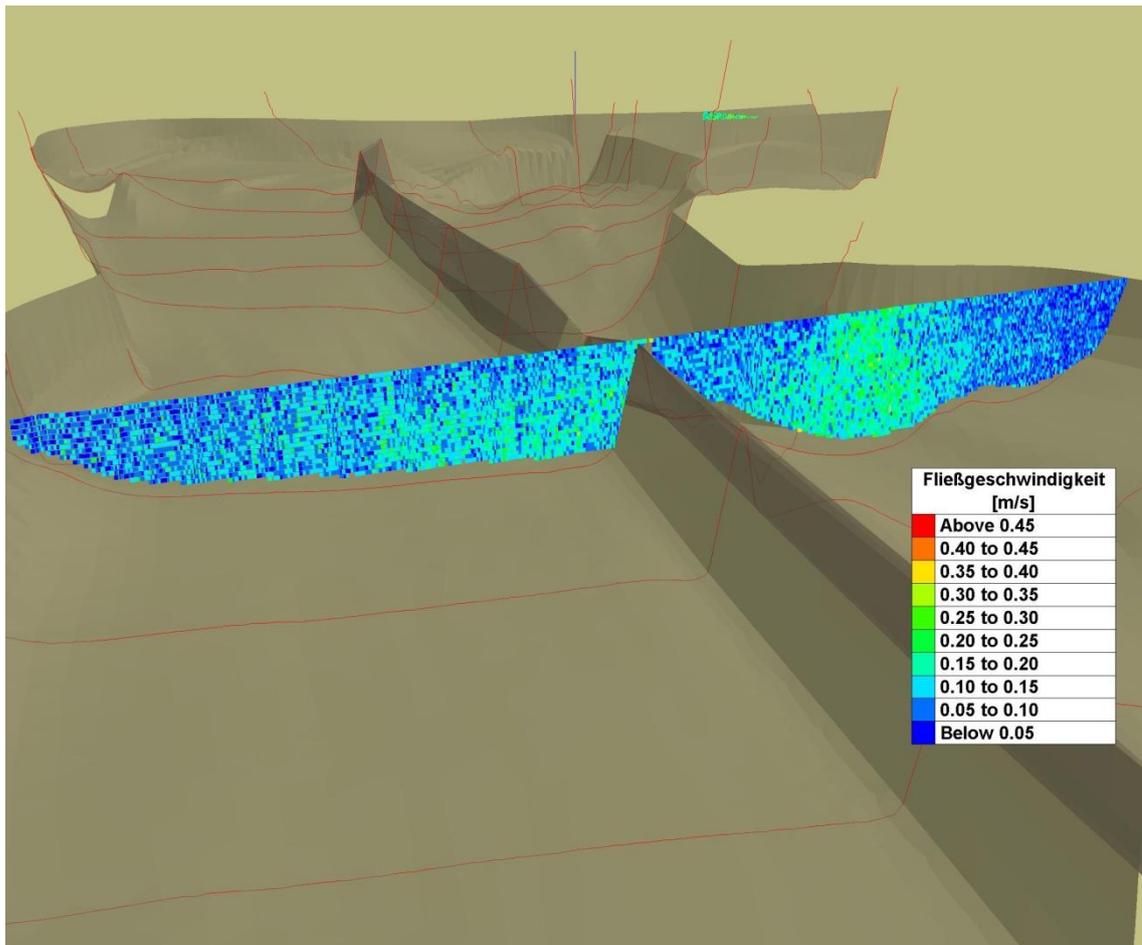


Abbildung 15.48 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2000

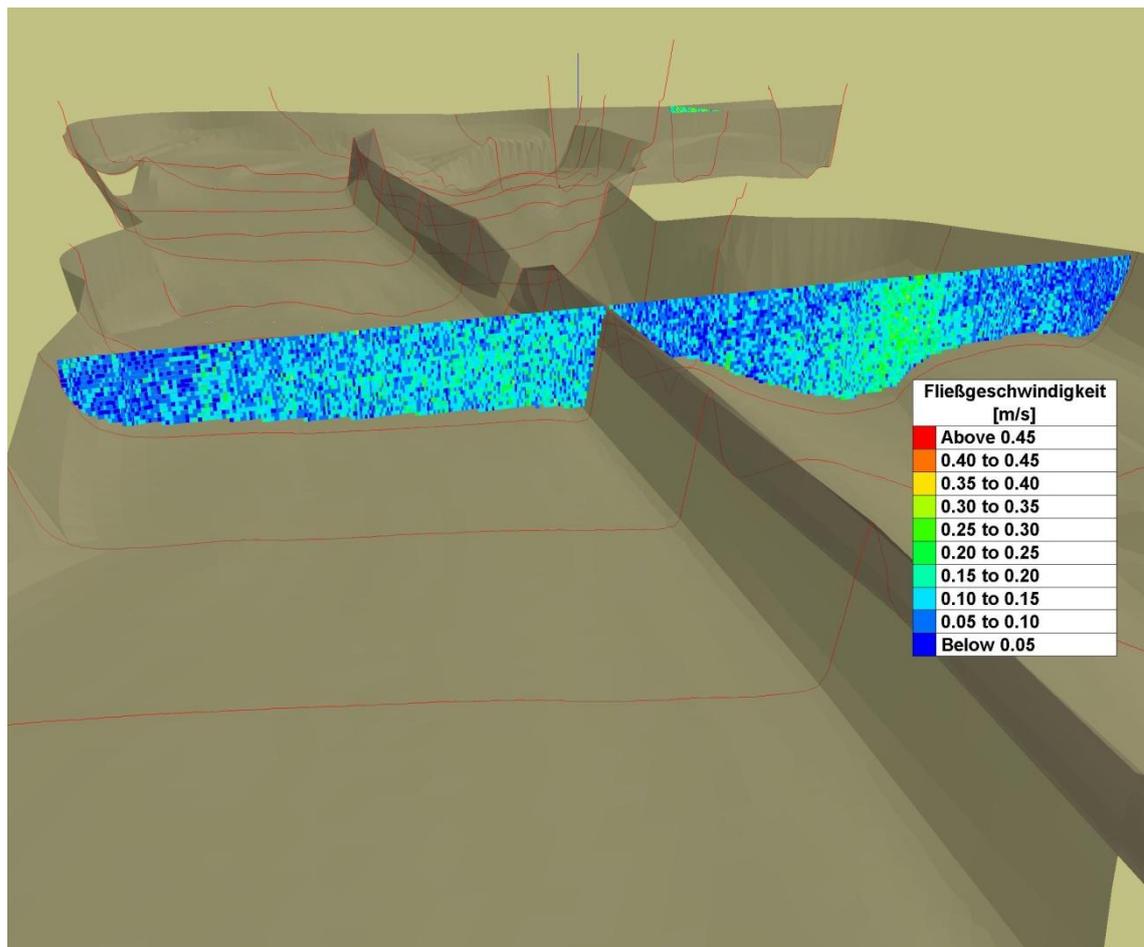


Abbildung 15.49 Fließgeschwindigkeiten Profil 2010

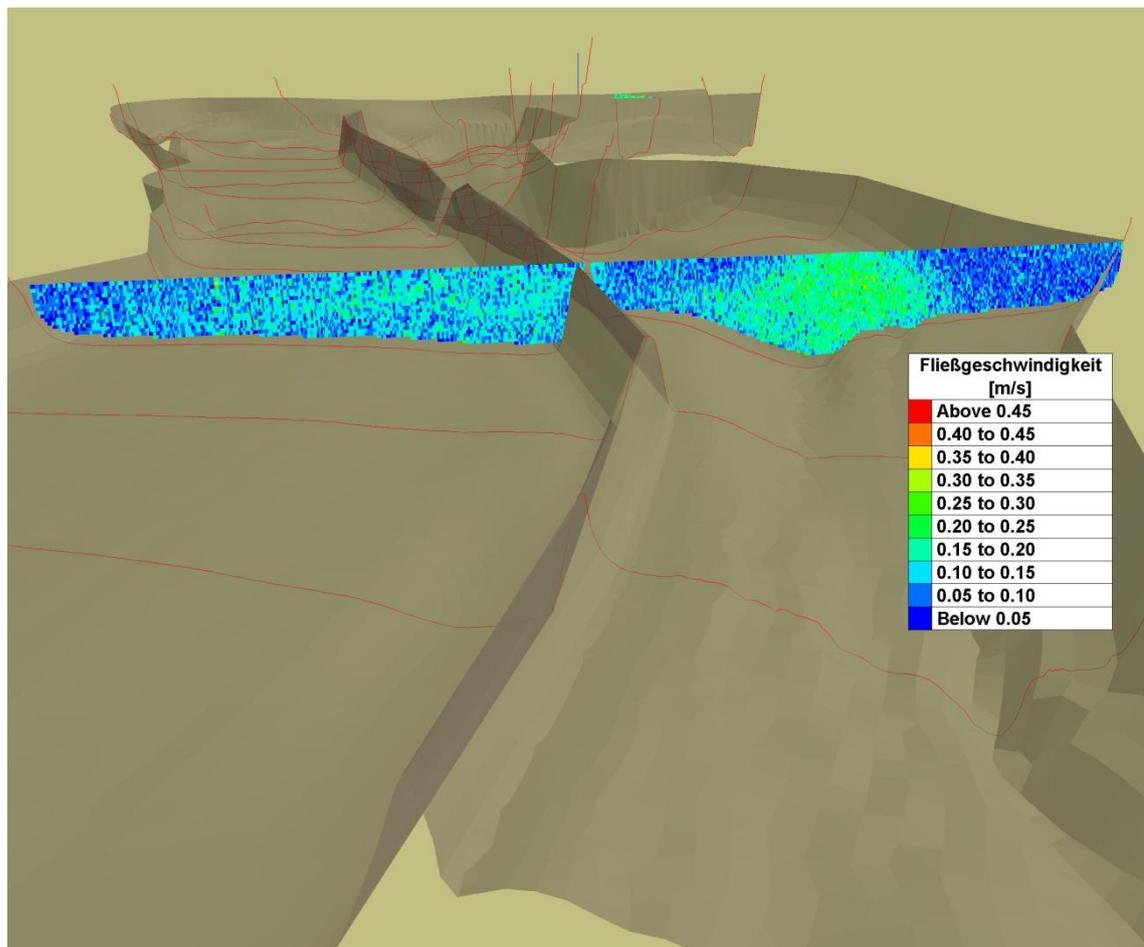


Abbildung 15.50 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2100

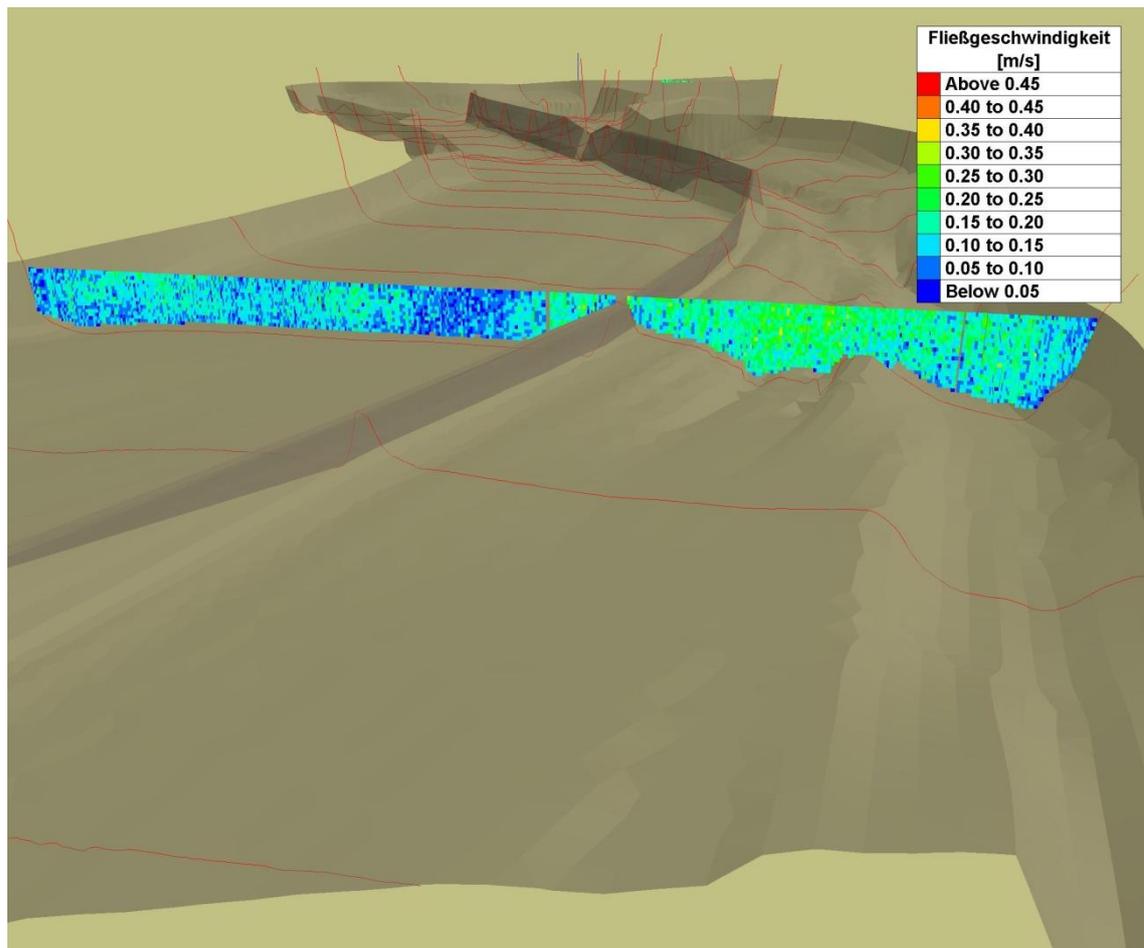


Abbildung 15.51 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2300

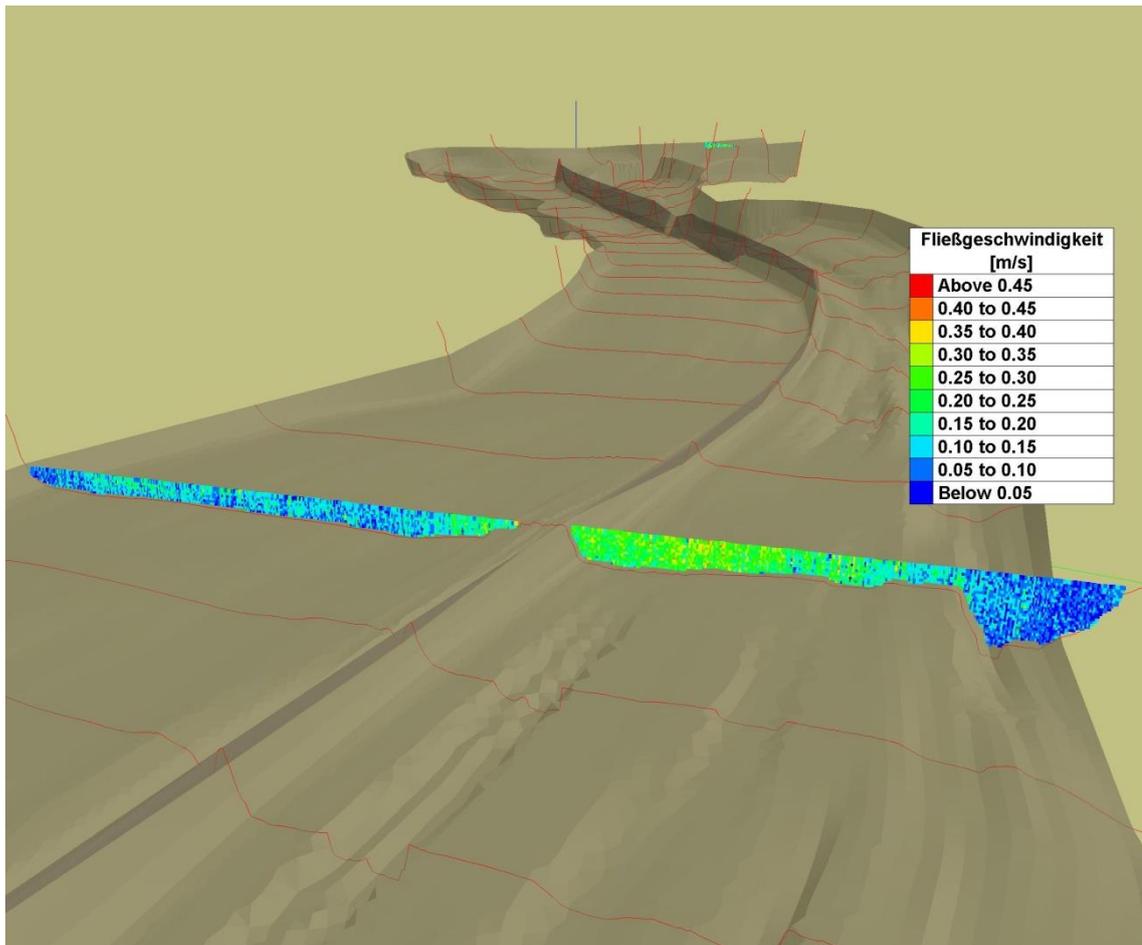


Abbildung 15.52 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2400

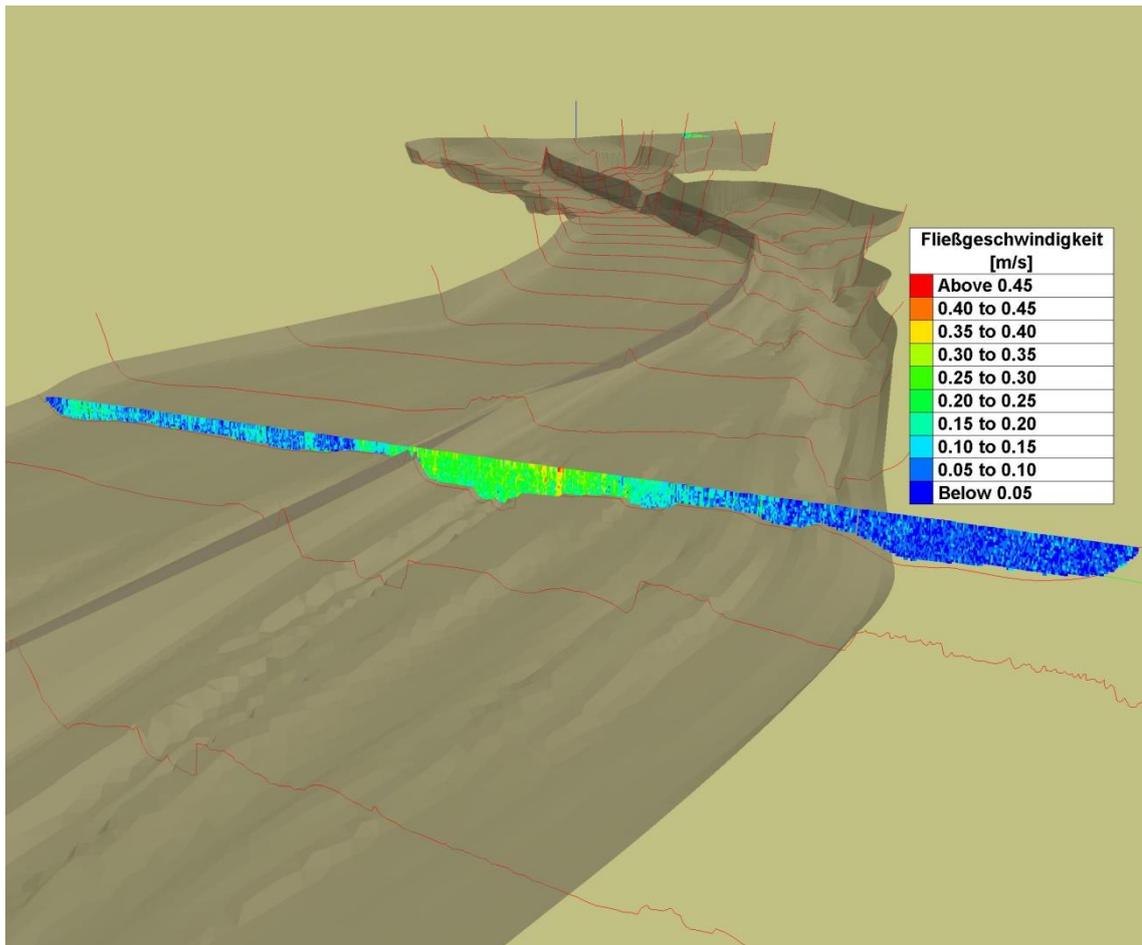


Abbildung 15.53 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2410

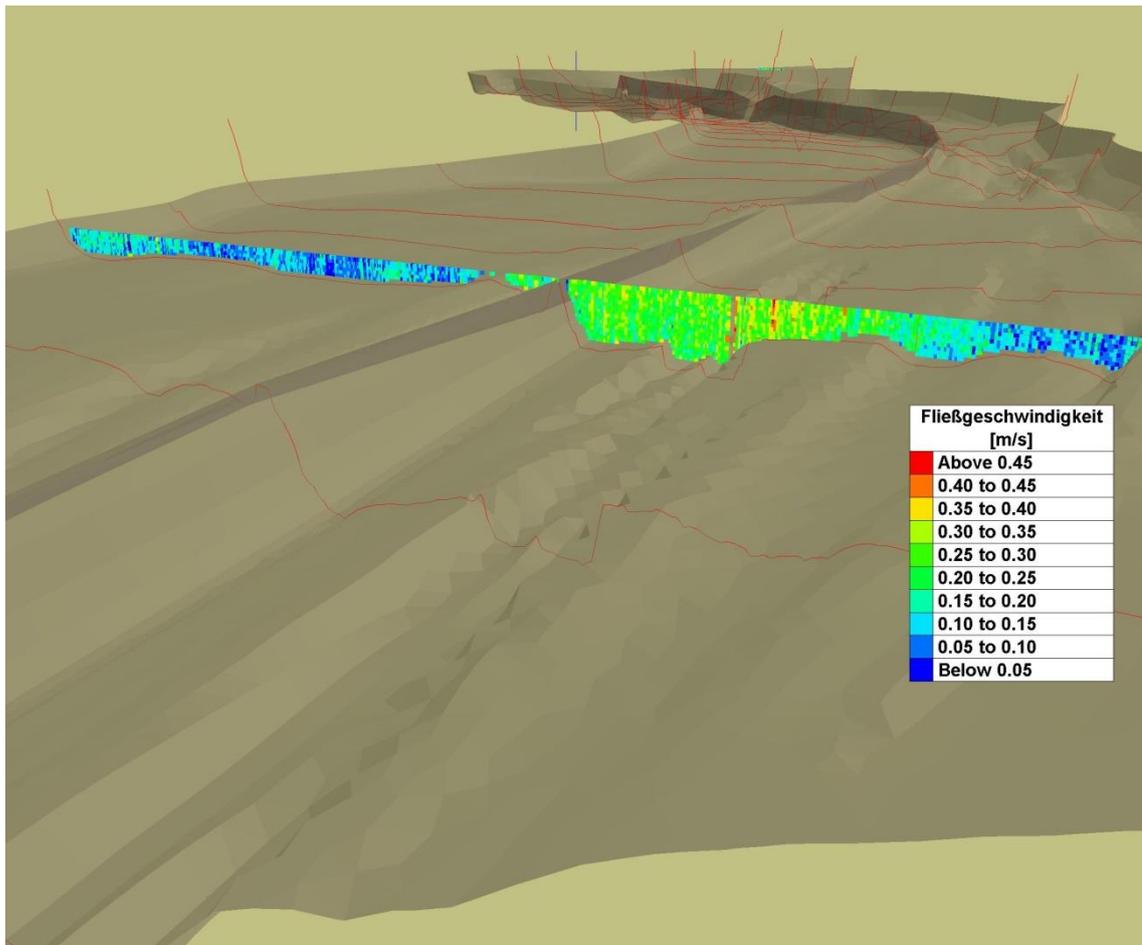


Abbildung 15.54 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2500

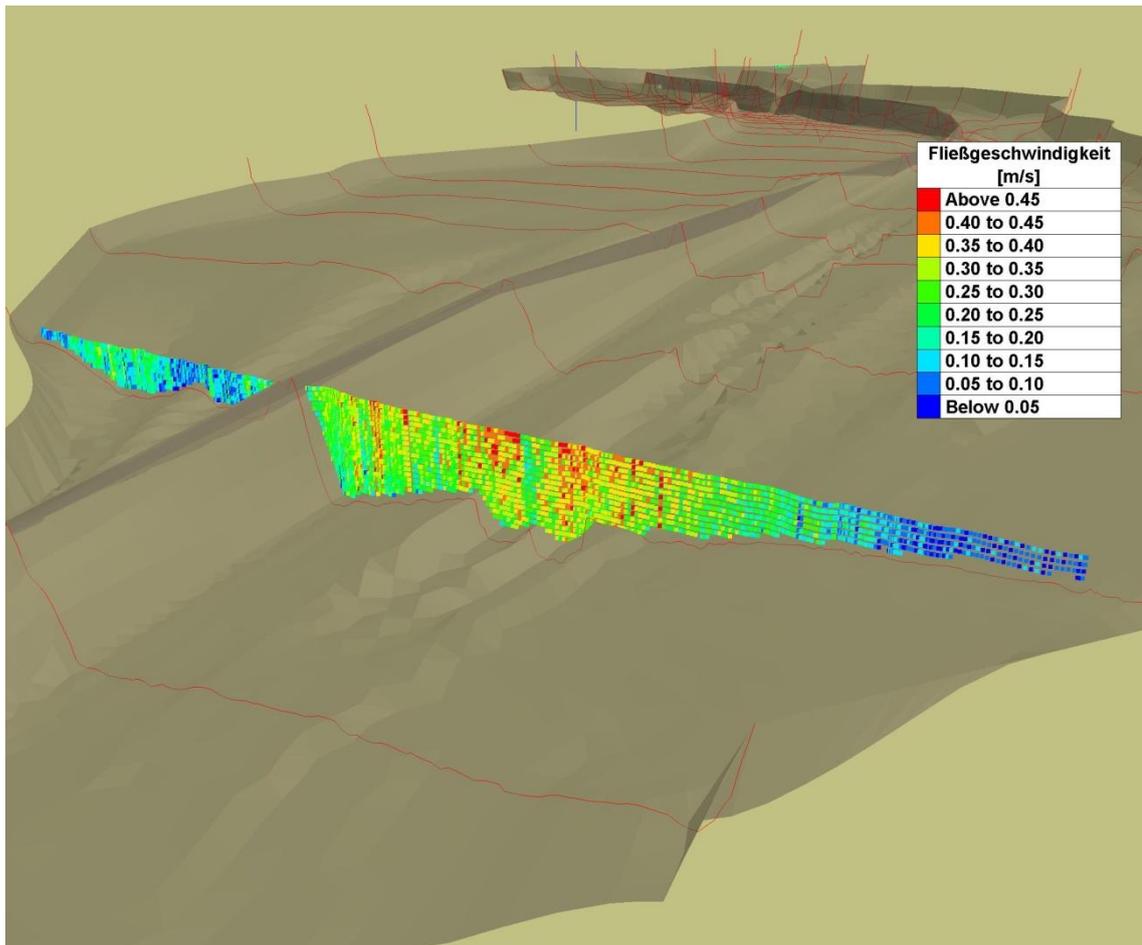


Abbildung 15.55 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2600

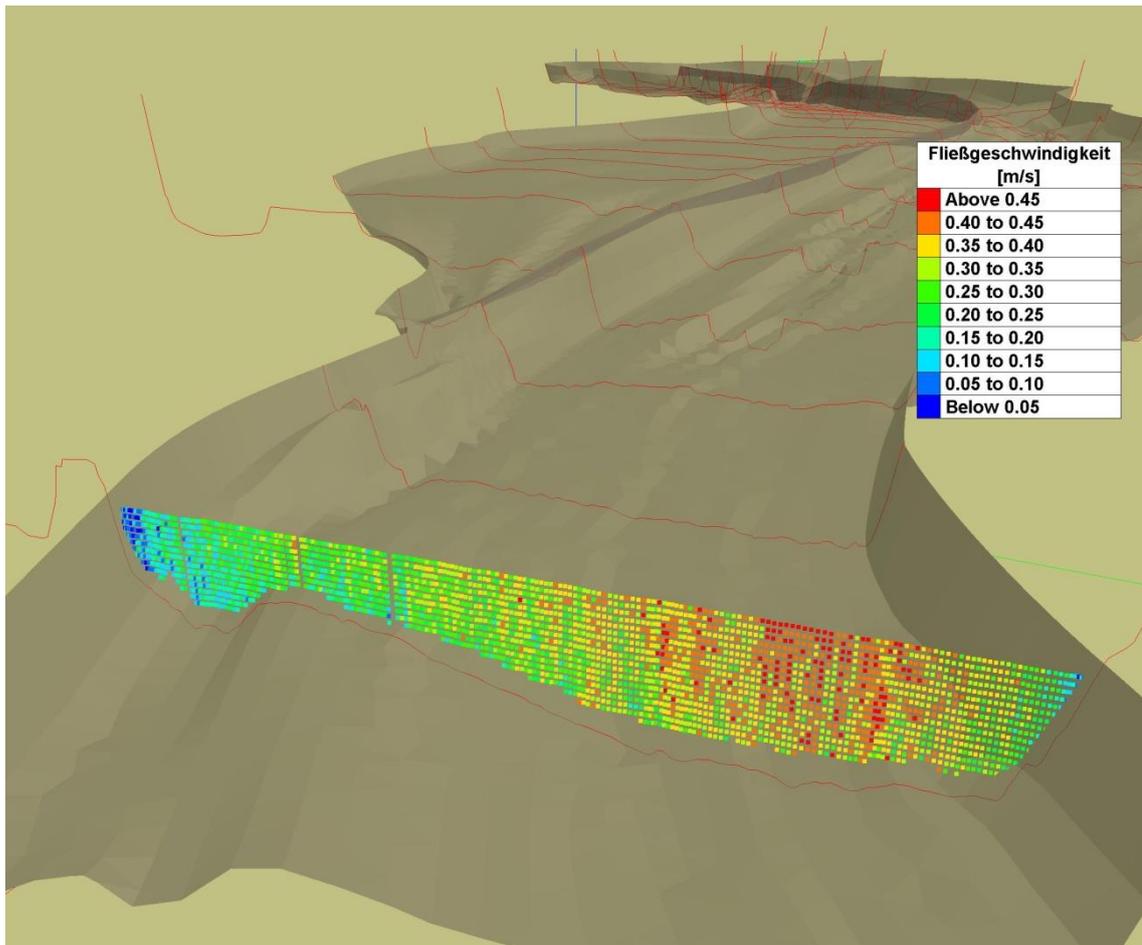


Abbildung 15.56 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2700

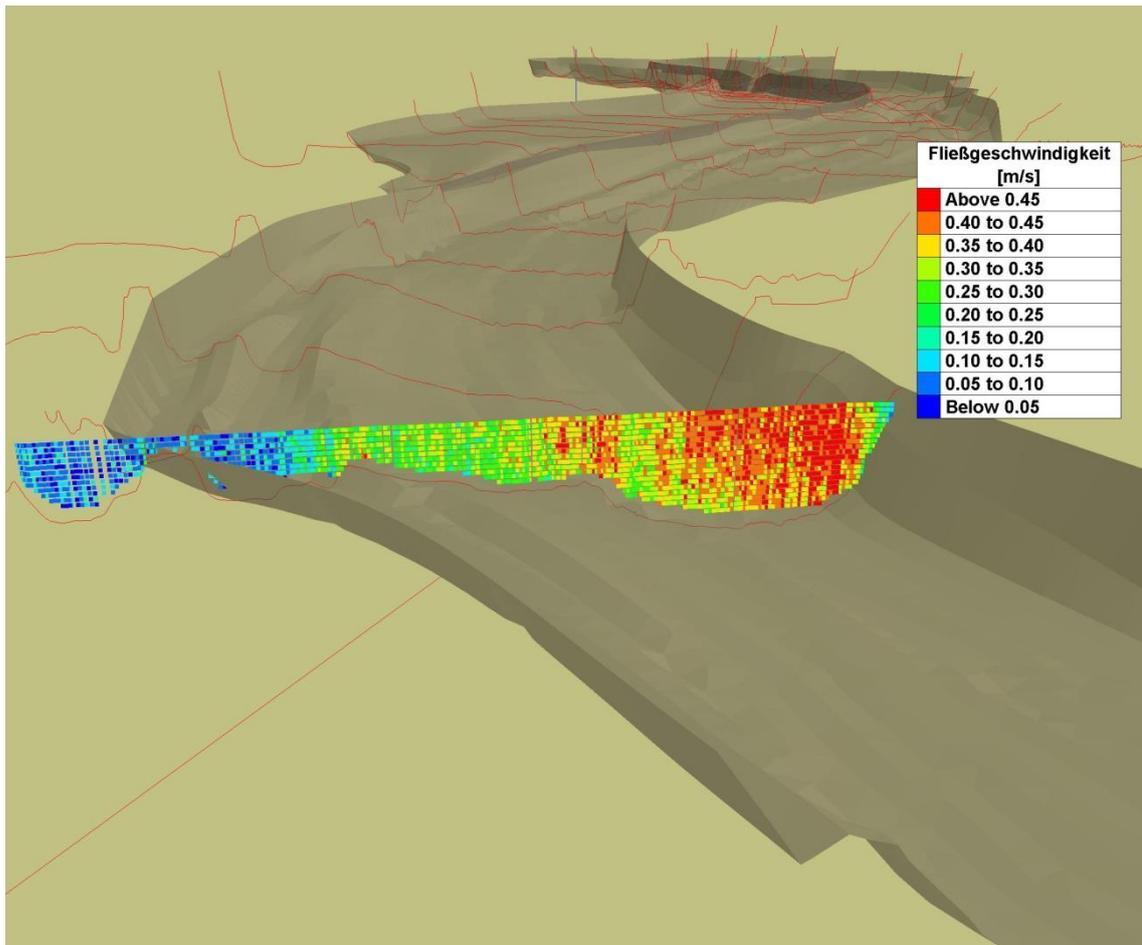


Abbildung 15.57 Fließgeschwindigkeiten, Profil 2910