

Technische Universität Graz  
Dekanat für Bauingenieurwissenschaften  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft

# **ADCP - Messungen im Hochgebirgsspeicher Wasserfallboden**

**Masterarbeit**  
von  
**Jakob STEIDL**

Vorgelegt zur Erlangung des  
akademischen Grades eines Diplomingenieurs  
der Studienrichtung Bauingenieurwesen

Graz, im Mai 2014

Betreuer der Diplomarbeit:  
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Knoblauch

Mitbetreuender Assistent:  
Dipl.-Ing. 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 Mai 2014

---

## Danksagung

Mein Dank gilt allem voran Helmut Knoblauch und Clemens Dorfmann für den Themenvorschlag und die erstklassige Betreuung dieser Arbeit.

Weiters bin ich Willibald Kerschbaumsteiner von der Verbund AHP AG für das Auftreiben der nötigen Ressourcen für die Messungen und der Organisation derselben dankbar.

Gleichermaßen möchte ich mich auch bei Stefan Haun für die äußerst motivierende Zusammenarbeit während der Messungen bedanken.

Für die finanzielle Ermöglichung meines Studiums habe ich meinen Eltern zu danken. Mein ganz spezieller Dank geht an Shermin und ihre unschätzbare wertvolle Unterstützung und Geduld während des Verfassens der vorliegenden Masterarbeit.

## Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit wird die hydraulische und sedimentologische Auswertung von ADCP-Messungen im Hochgebirgsspeicher Wasserfallboden behandelt.

Ausgangspunkt der Untersuchung bildet der von Verlandung betroffene Speicher Margaritze, aus dem über eine Transportleitung Sedimente in den südlichen Bereich des Speichers Wasserfallboden eingeleitet werden. Um zu klären, ob diese Sedimente durch den Pump-Speicher-Betrieb bis zu den Betriebsorganen nahe der Limbergsperrre transportiert werden können, sollen die Strömungssituation, die Transportprozesse sowie das Absetzverhalten der eingeleiteten Schwebstoffe untersucht werden.

Da vor Beginn dieser Untersuchung noch keine Erfahrungen mit Messungen in einem Stauraum dieser Art gemacht wurden, sind die Auswertungen und Ergebnisse experimenteller Natur und sollen Ausgangsbasis für weitere Messungen sein.

Allgemein ergaben die Messungen der Betriebsführung entsprechend eine schwache Strömung, welche aber im Verhältnis zu den zufälligen Messabweichungen sehr schwach ausgeprägt war. Die niedrigen gemessenen Schwebstoffkonzentrationen korrelierten größtenteils gut mit den Backscatter-Werten, wodurch eine Berechnung des Schwebstofftransportes unter den richtigen betrieblichen Rahmenbedingungen möglich wäre.

## **Abstract**

The present thesis examines ADCP measurements carried out in the high altitude reservoir Wasserfallboden.

Starting point of the investigation is the Margaritze reservoir located at the foot of the Austrian Pasterze glacier, which suffers from silting. Its sediments are pumped into the Wasserfallboden reservoir for final deposition. The aim of the investigation is to determine if these sediments can be transported to operating organs near the Limberg dam under pump storage operation. Therefore the flow situation and the transport processes and the settling of suspended solids should be introduced were examined.

Lacking experience with this kind of measurements in this regime, the results and analysis are intended to be the basis for further measurements.

The results show a weak flow in accordance to turbine flow data, which however is magnitudes smaller than the usual measurement errors and measured turbulence. The measured low suspended sediment concentration showed a good correlation to the backscatter values in most situations. Hence, given the required load case, a computation of the mass flux would be possible.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Aufgabenstellung . . . . .	1
1.2	Vorstellung Projektgebiet . . . . .	1
1.2.1	Kraftwerksgruppe Kaprun . . . . .	1
1.2.2	Speicher Wasserfallboden und Margaritze . . . . .	1
1.3	Ziele dieser Masterarbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>ADCP Messtechnik</b>	<b>4</b>
2.1	Grundlagen der ADCP Messung . . . . .	4
2.1.1	Der Doppler-Effekt . . . . .	4
2.1.2	Geschwindigkeitsmessungen mit dem Doppler-Effekt . . . . .	5
2.2	Backscatter-Analyse . . . . .	7
2.2.1	Grundlagen der Sonargleichung . . . . .	7
2.2.2	Ermittlung der Schwebstoffkonzentration . . . . .	10
2.3	Auswertung von Messdaten mit dem ADCPtool . . . . .	11
<b>3</b>	<b>Durchführung der Messkampagnen</b>	<b>13</b>
3.1	Messgeräte und Messvorrichtungen . . . . .	13
3.1.1	Messboote . . . . .	13
3.1.2	ADCP Geräte . . . . .	14
3.1.3	Schwebstoffsammler . . . . .	16
3.1.4	LISST-Gerät . . . . .	17
3.1.5	Temperatursonde . . . . .	18
3.2	Durchführung der Messkampagnen . . . . .	19
3.2.1	Messkampagne 1 (8. - 9.7.2013) . . . . .	19
3.2.2	Messkampagne 2 (29. - 30.7.2013) . . . . .	19
3.2.3	Messkampagne 3 (25. - 26.9.2013) . . . . .	19
3.3	Organisation der Messdaten . . . . .	24
3.3.1	Definition der Messprofile . . . . .	24
3.3.2	Bezeichnung der einzelnen Messdaten . . . . .	24

<b>4 Hydrodynamische Messergebnisse</b>	<b>26</b>
4.1 Übersicht . . . . .	26
4.2 Fließgeschwindigkeiten . . . . .	26
4.2.1 Auffälligkeiten . . . . .	26
4.2.2 Ergebnisse Messkampagne 1 . . . . .	28
4.2.3 Ergebnisse Messkampagne 2 . . . . .	30
4.2.4 Ergebnisse Messkampagne 3 . . . . .	33
4.2.5 Zusammenfassende Statistik . . . . .	36
4.3 Durchflüsse . . . . .	36
4.3.1 Ermittlung . . . . .	36
4.3.2 Auswertung . . . . .	37
<b>5 Auswertung der Schwebstoffkonzentrationen</b>	<b>39</b>
5.1 Auswertung LISST und Temperaturprofile . . . . .	39
5.1.1 LISST-Daten . . . . .	39
5.1.2 Temperaturprofile . . . . .	40
5.2 Auswertung Schwebstoffproben . . . . .	41
5.3 Auswertungen Backscatter . . . . .	43
5.3.1 Allgemeines . . . . .	43
5.3.2 Diskussion der Ergebnisse . . . . .	43
5.3.3 Vergleich ADCP-Geräte . . . . .	45
5.4 Korrelation und Kalibrierung . . . . .	48
5.4.1 Unterteilungsstrategien . . . . .	48
5.4.2 Untersuchung der Sonargleichung . . . . .	51
5.4.3 Ergebnisse der Korrelation . . . . .	55
<b>6 Schlussfolgerungen</b>	<b>58</b>
6.1 Fließgeschwindigkeiten im Speicher . . . . .	58
6.2 Schwebstoffe und Backscatter . . . . .	58
6.3 Empfehlungen für künftige Messungen . . . . .	59
<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>61</b>
<b>A Darstellung Messergebnisse</b>	<b>62</b>
A.1 Verwendete Nachbearbeitungsparameter . . . . .	62
A.2 Profilweise ADCP-Auswertung . . . . .	62
A.3 Schwebstoffproben . . . . .	117
A.4 Berechnete profilweise Schwebstoffkonzentrationen . . . . .	120
A.5 Temperaturprofile . . . . .	131

# 1 Einleitung

## 1.1 Aufgabenstellung

In der vorliegenden Masterarbeit wird im Hochgebirgsstausee Wasserfallboden der Kraftwerksgruppe Kaprun Schwebstoffkonzentration und die Strömungssituation studiert werden. Dazu werden neben zwei verschiedenen ADCP-Geräten auch ein optisches Laser-Diffraktions-Insstrument (LISST) eingesetzt. Zusätzlich werden Flaschenproben zur direkten Bestimmung der Schwebstoffkonzentration genommen, wobei an jedem Entnahmepunkt auch Wassertemperaturprofile genommen werden.

## 1.2 Vorstellung Projektgebiet

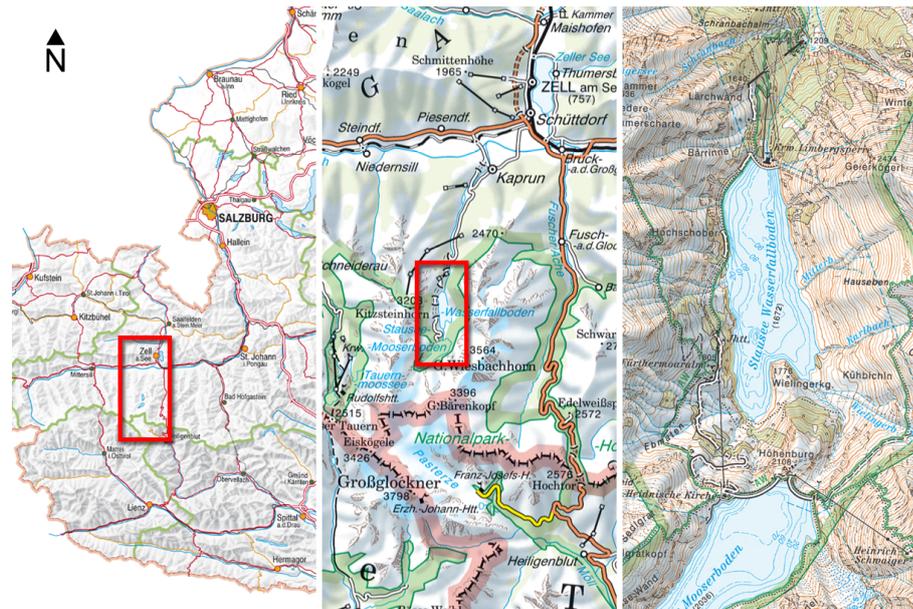
### 1.2.1 Kraftwerksgruppe Kaprun

Die nördlich der Glockner-Gruppe in den Hohen Tauern gelegene Kraftwerksgruppe setzt sich im Wesentlichen aus den Kraftstufen Kaprun Hauptstufe, Oberstufe, Limberg II sowie den Speicherseen Mooserboden, Wasserfallboden und Margaritze zusammen. Mit einem gesamten Regeljahresarbeitsvermögen von  $668,5 \cdot 10^6$  kWh zählt die Kraftwerksgruppe Kaprun zu den größten in Österreich. In Abbildung 1.1 ist eine Übersicht über die Kraftwerksgruppe zu finden, während Tabellen 1.1 und 1.2 die wichtigsten Kennwerte der einzelnen Kraftstufen und Speicher geben.

### 1.2.2 Speicher Wasserfallboden und Margaritze

---

<sup>1</sup>Kartenquelle: Austrian Map 5, *Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen*

Abbildung 1.1: Übersicht Projektgebiet<sup>1</sup>

	Oberstufe	Hauptstufe	Limberg II
Typ	Pumpspeicher	Jahresspeicher	Pumpspeicher
Inbetriebnahme	1955	1952	2011
Bruttofallhöhe	m	365	858
Ausbauwassermenge	m <sup>3</sup> /s	36	32,5
max. Leistung	MW	112,8	240
Arbeitsvermögen	10 <sup>6</sup> kWh/a	166,1	499

Tabelle 1.1: Kennwerte der Kraftstufen

Der Speicher Wasserfallboden dient als Unterbecken für die Kraftstufen Oberstufe und Limberg II. Gleichzeitig dient der Speicher als Oberbecken für die Hauptstufe und als Lager für Sedimente aus dem Speicher Margaritze.

Der Speicher Margaritze liegt am Fuße des Pasterzengletschers und ist seit der Verlandung des „Sandersees“ besonders stark vom Sedimenteintrag durch den

Speicher Sperr	Mooserboden		Wasserfallboden
	Mooser	Drossen	Limberg
Sperrtyp	Gewichtsmauer mit Bogenwirkung		Gewichtsmauer
Kronenlänge	m	494	357
max. Basisbreite	m	70,0	25,0
Stauziel	m ü.A.	2036	1672
Absenkziel	m ü.A.	1960	1590
nat. Einzugsgebiet	km <sup>2</sup>	27,0	15,0
Gesamtinhalt	hm <sup>3</sup>	87,0	86,0
Nutzinhalt	hm <sup>3</sup>	85,0	81,0
Spiegelfläche bei STZ	km <sup>2</sup>	1,66	1,53

Tabelle 1.2: Kennwerte der Speicher

Gletscherschliff betroffen. Zur Aufrechterhaltung der Betriebssicherheit wird über eine 12 km lange Pumpleitung das Sediment in einer Suspension in den Speicher Wasserfallboden gepumpt. Auf diese Art werden jährlich rund 35 000 m<sup>3</sup> Sediment in den Speicher befördert. (Hohenwarter, 2004)

Die Überleitung aus dem Speicher Margaritze mündet am südlichen Ende in den Wasserfallboden, während die Ein- bzw. Ausläufe der Kraftstufen im nördlichen Bereich nahe der Sperre situiert sind.

## **1.3 Ziele dieser Masterarbeit**

Als Ziel dieser Arbeit wurde festgelegt einerseits herauszufinden, wie sich die unter 1.1 genannten Methoden für den Einsatz in Hochgebirgsspeichern eignen. Dabei soll dabei auch versucht werden ein grundlegendes Bild über die Schwebstoffsituation im Speicher Wasserfallboden zu zeichnen.

## 2 ADCP Messtechnik

### 2.1 Grundlagen der ADCP Messung

#### 2.1.1 Der Doppler-Effekt

Die Wellenausbreitung ist bekanntermaßen durch die Wellenlänge  $\lambda$  – der Abstand zwischen den Wellenbergen, der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  und der Amplitude  $A$  definiert. Die Beziehung zwischen der Wellenlänge und der Ausbreitungsgeschwindigkeit ist über die Frequenz

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad \left[ \frac{1}{s} \right] \quad (2.1)$$

gegeben. Das nach dem österreichischen Mathematiker Christian Doppler benannte Wellenphänomen liefert eine Erklärung für Frequenzänderungen zwischen Sender und Empfänger.

Über Gleichung 2.2 ist ersichtlich, was passiert, wenn sich Beobachter oder Schallquelle relativ zueinander bewegen. Die wahrgenommene Frequenz für den Beobachter lässt sich über die Einführung der relativen Geschwindigkeitsdifferenz mit der sich Sender und Empfänger einander annähern als

$$f_R = f \left( 1 + \frac{v_R}{c} \right) \quad (2.2)$$

anschreiben.

Der Doppler-Effekt kann nicht nur an vorbeifahrenden Fahrzeugen, sondern auch an Oberflächenwellen in Gewässern mit Strömenden Abfluss beobachtet werden. Letzteres Beispiel zeigt auch auf, dass die Geschwindigkeit des umgebenden Mediums zu berücksichtigen ist.

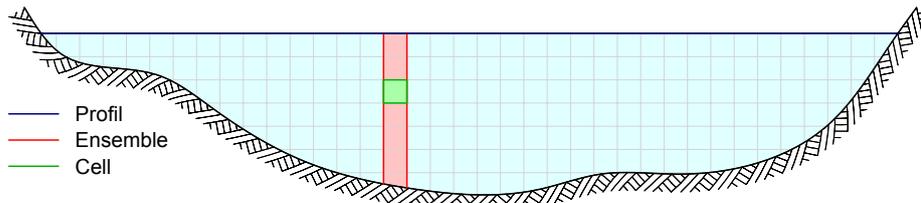


Abbildung 2.1: Definition von räumlichen Unterteilungen

## 2.1.2 Geschwindigkeitsmessungen mit dem Doppler-Effekt

Sogenannte *ADCP*-Geräte<sup>1</sup> (*Acoustic Doppler Current Profiler*) machen sich den Doppler-Effekt zu Nutze um Fließgeschwindigkeiten in einer Wassersäule quasi-simultan zu messen. In der Regel bestehen diese Geräte aus einem kleinen Boot mit abnehmbaren Sensor.

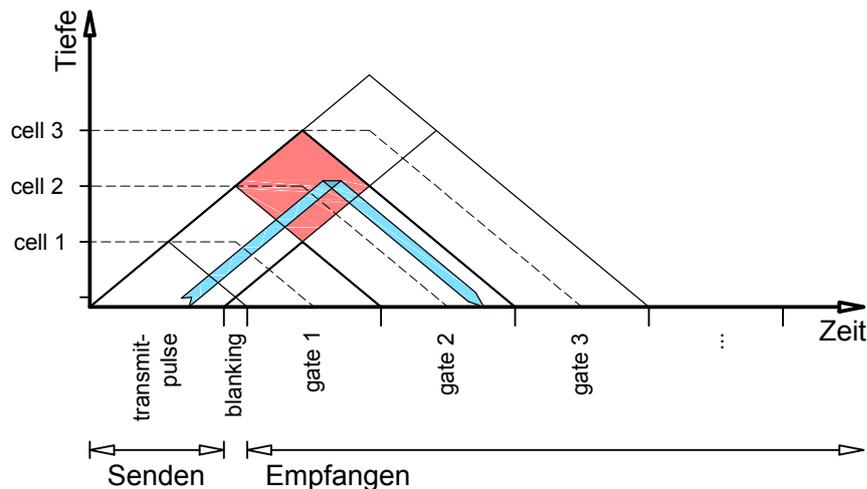
Am Beginn einer Messung sendet dieser Ultraschallwellen aus. In einem Folgeschritt schaltet der Sensor auf Empfang, um nach definierten Zeiten die von Teilchen im Wasser reflektierten Schallwellen zu empfangen. Aus der Frequenzverschiebung lässt sich die relative Geschwindigkeit der Partikel im Wasser messen.

Hätten ADCP-Geräte nur einen Sender bzw. Schallgeber, so könnte nur die radiale Geschwindigkeit gemessen werden. Für die dreidimensionale Fließgeschwindigkeitsmessung sind ADCPs deshalb mit vier solcher Sensoren symmetrisch in einem Winkel  $\theta$  zur Symmetrieachse angeordneten Schallgebern bestückt. Für eine räumliche Messung sind zwar nur drei Sender notwendig, aber ohne zusätzlichen Sensor wäre keinerlei Fehler-Abschätzung möglich. Bei der räumlichen Messung werden die einzelnen Geschwindigkeitskomponenten nicht im selben Punkt gemessen, deshalb muss von einer lokalen Homogenität des Geschwindigkeitsfeldes ausgegangen werden. Durch den zusätzlichen vierten Schallgeber kann diese Annahme überprüft werden.

### Begriffsdefinitionen

Quert man mit einem ADCP-Gerät ein Gewässer, kann praktisch flächendeckend die Fließgeschwindigkeit ermittelt werden. Die einzelnen Messpunkte werden Zellen (*cells*, auch *bins*) genannt. Eine vertikale Reihe von Zellen wird Ensemble genannt. (Siehe Abbildung 2.1)

<sup>1</sup>ADCP ist eine eingetragene Marke der Firma Teledyne RD Instruments, Poway, CA, USA. Die Bezeichnung wird aber in der Literatur für Geräte aller Hersteller verwendet.



**Abbildung 2.2:** *Range Gating* Methode: Das Zeit-Weg Diagramm zeigt den Weg der Schallwellen vom Sender bis zur Reflexion und wieder zurück.

### Messung in den Zellen

Innerhalb eines Ensembles werden mittels *Range Gating* die Fließgeschwindigkeiten der Zellen ermittelt. Nachdem der *transmit pulse* ausgesendet wurde beginnt das Gerät nach der *blanking*-Zeit, in welcher Schwingungen des Gerätes abklingen, mit dem Empfang der reflektierten Signale. Die Zeit wird in *gates* unterteilt, deren Länge der über die Zeit umgelegten Zellohne entspricht.

In Abbildung 2.2 ist der Vorgang beispielhaft für eine Zelle in einem Ensemble illustriert: Alle Signale die innerhalb des *gate 2* eingehen, werden der zweiten Zelle zugeordnet. Aufgrund der über die Schallgeschwindigkeit aufgestellten Beziehung zwischen räumlichen Abstand und Zeit müssen alle Signale innerhalb dieses Zeitfensters zwischen den Mittelpunkten der ersten und dritten Zelle reflektiert worden sein.

Betrachtet man die rot markierte Raute in der Abbildung, so erkennt man auch, dass Reflexionen, die näher beim Zell-Mittelpunkt stattfinden, einen größeren Einfluss auf den gemittelten Wert haben, da diese am meisten „Zeitanteil“ innerhalb der Zelle besitzen. Es ist auch erkennbar, dass sich die einem *gate* zugehörigen Tiefen überlappen. Daraus ergibt sich eine Dreieck-Gewichtungsfunktion der Daten, wie sie etwa aus der Methode der Finiten Elemente bekannt ist. Diese Gewichtung kann über die Änderung der *transmit length* variiert werden. (RDI, 2006)

## 2.2 Backscatter-Analyse

Neben den Fließgeschwindigkeiten wird vom ADCP-Gerät auch die empfangene Signalstärke (RSSI, *Received Signal Strength Indication*) aufgezeichnet. In der Regel wird diese Zusatzinformation bei der Fehlersuche verwendet oder kann als Hilfe dienen um Messergebnisse besser zu interpretieren.

Allerdings lassen sich nach Abzug von Übertragungsverlusten auch Rückschlüsse über die Verteilung von Schwebstoffen schließen. Das sich daraus ergebende Rückstreumaß (Backscatter) kann als Maß für die Schwebstoffkonzentration verwendet werden.

### 2.2.1 Grundlagen der Sonargleichung

Die Grundlage für die Bestimmung der Schwebstoffkonzentrationen mittels ADCP bildet die aktive Sonargleichung, aufgestellt von (Urlick, 1983, S. 423 ff):

$$DT + NL = SL + 2 \cdot TL + TS + DI \quad (2.3)$$

Gleichung 2.3 Beschreibt das Gleichgewicht der ausgestrahlten Energie  $DT$  (*detection tresold*) und  $NL$  (*noise level*) mit dem empfangenen Signal  $SL$  und den „Verlusten“ gegliedert in Übertragungsverluste ( $TL$ , *transmission losses*), Objekt-Rückstreumaß ( $TS$ , *target strength*) und Bündelungsmaß ( $DI$ , *directivity index*).

Als zugehörige Einheit wird üblicherweise die Druckintensität in Dezibel mit einem Referenzdruck von  $1 \mu\text{Pa}$  verwendet.

Die obige Formel 2.3 bildet die Basis für die gesamte Unterwasser-Akustik. Da sie allerdings teils schwer messbare und weniger relevante Terme beinhaltet, wird sie im Zusammenhang mit ADCP-Geräten folgendermaßen angeschrieben (RDI, 2006):

$$EI = SL + BS + const. - TL \quad (2.4)$$

In diesem Fall Beschreibt  $EI$  die Echo-Intensität,  $BS$  die Intensität der Rückstrahlung der Wassermasse (*backscatter*) und  $const$  eine Konstante, welche die restlichen Terme beinhaltet.

Die Echo-Intensität kann somit als Maß der Rückstrahlung unter der Berücksichtigung der Übertragungsverluste berücksichtigt werden.

Die Übertragungsverluste  $TL$  entstehen einerseits durch die räumliche Wellenausbreitung und andererseits durch Dämpfung der Schallwellen, die beide nur von der Länge des Übertragungsweges und nicht von der Schwebstoffkonzentration abhängen:

$$TL = 20 \cdot \log_{10} R + 2 \cdot \alpha \cdot R \quad (2.5)$$

Wobei  $R$  (m) den Abstand zwischen reflektierendem Partikel und Sensor und  $\alpha$  (dB/m) den Schallabsorptionsgrad bezeichnen.

Die Größe der Rückstrahlungsintensität  $BS$  (*backscatter*) lässt auf die Menge an reflektierenden Teilchen, also Schwebstoffe, schließen. Der Wert ist allerdings nicht nur von der Menge, sondern auch der Kornverteilung und -größe abhängig. Bis dato wurde noch kein Weg gefunden um direkt aus  $BS$  eine Schwebstoffkonzentration  $SSC$  zu ermitteln, weshalb in-situ Schwebstoffproben genommen werden müssen um einen empirischen Zusammenhang zwischen  $BS$  und  $SSC$  herstellen zu können.

Mit dem oben genannten lässt sich die Backscatter-Intensität wie folgt anschreiben: (Dinehart u. a., 2005)

$$BS = \frac{127.3}{T_s + 273} EI + 20 \psi \log_{10} R + 2 \alpha R \quad (2.6)$$

Der erste Term auf der Rechten Seite von Gleichung 2.6 ist ein temperaturabhängiger Umrechnungsfaktor von geräteinternen Einheiten (*counts*) auf Dezibel.  $T_s$  ist hier die an der Wasseroberfläche gemessene Sensortemperatur in Grad Celsius. Im zweiten und dritten Term finden sich die Übertragungsverluste aus Formel 2.5 wieder. Der Schallabsorptionsgrad  $\alpha$  lässt sich aufteilen in einen Anteil der durch das Wasser selbst ( $\alpha_W$ ) und durch Sedimente ( $\alpha_S$ ) verursacht wird. Letzterer wird in der Praxis oft vernachlässigt, da er nur schwer ermittelt werden kann und meist keinen Einfluss auf das Endergebnis hat, wie unter anderem in (Gartner, 2004) beschrieben wird.

In (RDI, 2013) wird die obige Formel 2.6 um einen Term erweitert:

$$BS = \frac{127.3}{T_s + 273} EI + 20 \log_{10} R + 2 \alpha R - 10 \log_{10} \left( \frac{L_{Xmit}}{\cos \theta} \right) \quad (2.7)$$

Es ist zu beachten, dass hier  $R$  anders definiert ist. (Siehe Formel 2.10)

Für den Schallabsorptionskoeffizienten in Wasser haben (Schulkin u. a., 1962) die folgende empirische Formel aufgestellt:

$$\alpha_W = \left( \frac{S \cdot A \cdot f_t \cdot f^2}{f_T^2 + f^2} + \frac{3.38 \cdot 10^{-6} \cdot f^2}{f_T} \right) (1 - 6.54 \cdot 10^{-4} P) \quad (2.8)$$

Sie ist abhängig von der Salinität  $S$ , dem temperaturabhängigen Relaxationskoeffizienten  $f_T = 21.9 \cdot 10^{6-1520/(T+273)}$ , der Erregerfrequenz  $f$  (in kHz), so wie dem Wasserdruck  $P$  (atm)<sup>2</sup>. Die Gleichung liefert das Ergebnis in der Einheit Np/m, welches mit dem Faktor  $20/\ln 10 \approx 8.686$  in die Einheit dB/m umgerechnet werden kann.

Der vielfach erwähnte Abstand  $R$  ist nach (Wall u. a., 2006) (basierend auf (Deines, 1999)) folgendermaßen definiert:

$$R = \frac{r + D/4}{\cos \theta} \quad (2.9)$$

Jedoch gemäß (RDI, 2013) mit:

$$R = \frac{r + L_{Xmit}/2}{\cos \theta} \quad (2.10)$$

Dabei sind:

$r$  vertikaler Abstand von Schallgebers zum Mittelpunkt der Zelle

$\theta$  Abstrahlungswinkel des Schallgebers zur Senkrechten

$D$  Zellhöhe

$L_{Xmit}$  transmit length, siehe 2.1.2

Der Vollständigkeit soll noch die Implementierung des vertikalen Abstandes zur *ersten Zelle* in der Software WinRiver gezeigt festgehalten: (E-Mail RDI, 2014)

$$r_1 = [\text{blank} + 1/2(\text{binlength} + \text{transmitlength} + \text{lag})] / \cos \theta \quad (2.11)$$

Der *near-distance*-Korrekturfaktor aus Formel 2.6 ist nach (Downing u. a., 1995) als

$$\psi = \frac{1 + 1.35z + (2.5z)^{3.2}}{1.35z + (2.5z)^{3.2}} \quad \text{mit} \quad z = \frac{R\lambda}{\pi a_t^2} \quad (2.12)$$

<sup>2</sup> $A$  ist eine Konstante für den ionischen Relaxationsprozess von  $\text{MgSO}_4$  ( $A = 2.34 \cdot 10^{-6}$ )

definiert. Hier sind  $a_t$  der Radius des Schallgebers in (m) und  $\lambda$  die akustische Wellenlänge in (m). Er berücksichtigt die nicht-sphärische Wellenausbreitung im Nahbereich des Sensors aufgrund dessen Breite.

Eine genauere Methode stellte (Deines, 1999) mit

$$BS = C + 10 \log_{10} ((T_s + 273.16)R^2) - L_{DBM} - P_{DBW} + 2\alpha R + K_c(E - E_r) \quad (2.13)$$

auf.

Hierbei bezeichnen wie oben  $BS$  die Backscatter-Stärke,  $T_s$  die Sensortemperatur und  $R$  den Abstand zum Sensor bezeichnen.  $L_{DBM}$  ist die *transmit length* in  $\log_{10}(m)$ ,  $P_{DBW}$  die Ausgangsleistung in  $\log_{10}(W)$ ,  $K_c$  einen Umrechnungsfaktor von geräteinternen *counts* Einheiten in (dB) und  $E$  ist die Echo Intensität respektive deren Referenzwert  $E_r$ .

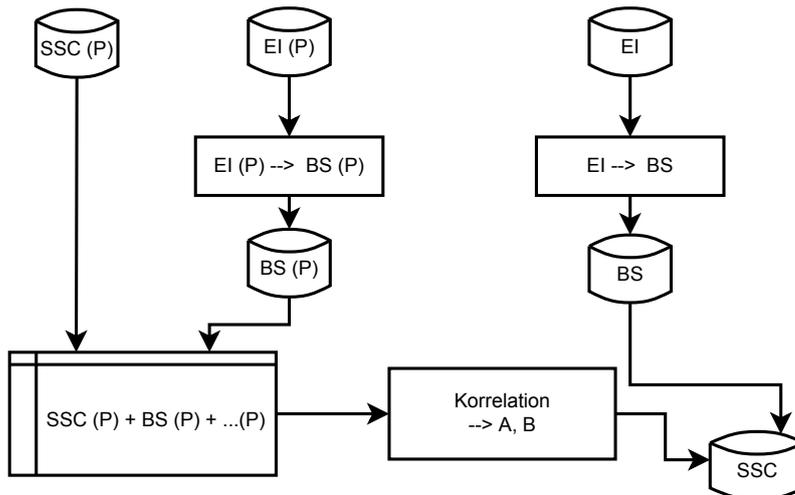
Diese Formel ist insofern genauer, da  $P_{DBW}$  von der Spannung der Stromversorgung und  $K_c$  von der Sensor-Temperatur abhängen, welche über die Messdauer, besonders bei Batteriebetrieb, schwanken können.

## 2.2.2 Ermittlung der Schwebstoffkonzentration

Je nach Literaturquelle werden verschiedene Formeln für die Ermittlung der Schwebstoffkonzentration  $SSC$  (*suspended soil concentration*) angegeben. Im Wesentlichen basieren aber alle Formulierungen auf dem semi-logarithmischen Zusammenhang zwischen Schwebstoffkonzentration und Backscatter:

$$\log_{10} SSC = A + B \cdot BS \quad (2.14)$$

Die Parameter der Geradengleichung  $A$  und  $B$  können über lineare Regression mit bekannten Werten für  $SSC$  aus Direkt-Proben bestimmt werden. Nach (Gartner, 2004) sind in  $A$  auch die Parameter  $SL$ ,  $TS$  und  $SV$  enthalten, wodurch Backscatter-Werte und der Parameter  $A$  nicht ohne Weiteres profilübergreifend verglichen werden können.



**Abbildung 2.3:** Ablaufdiagramm zur profilweisen Berechnung der Schwebstoffkonzentrationen. Zuerst erfolgt die Korrelation aus Schwebstoffproben  $SSC(P)$  und passenden Backscatter-Werten  $BS(P)$ . Im zweiten Schritt kann damit die Schwebstoffkonzentration  $SSC$  am gesamten Profil berechnet werden.

## 2.3 Auswertung von Messdaten mit dem ADCPtool

Da die anfallende Datenmenge groß und die Konvertierung der Rohdaten aufwendig ist, kann diese nicht händisch erledigt werden.

Für die Standardanwendungen der ADCP-Technologie gibt es bereits ausreichend gute Software die diese Aufgabe erledigt. Für eine weitergehende Auswertung der Daten, insbesondere für spezielle Verwendungszwecke sind solche Programme aber nur beschränkt einsetzbar.

Aus diesem Grunde hat der Autor dieser Arbeit in vergangenen Arbeiten (Steidl, 2013) eine Software-Bibliothek programmiert, welches ADCP-Daten in der Programmiersprache Python verarbeitbar macht. Diese *ADCPtool* genannte Software besteht im Wesentlichen aus einem Objekt, das die Messdaten für den Zugriff aus Python ermöglicht. Dazu kommen einige Funktionen, die häufig bei der Nachbearbeitung benötigt werden:

- **Geo-Referenzierung der Messprofile:** Für den Export in Geographische Informationssysteme können auf verschiedene Weisen Profile definiert werden, auf denen die gemessenen Daten auf unterschiedliche Arten projiziert werden können. Vektorielle Größen können sowohl in globalen als auch in

einem lokalen (profilbasierten) Koordinatensystem abgefragt und modifiziert werden.

- **Postprocessing der Profile:** häufig benötigte Aufgaben können ausgeführt werden, wie zum Beispiel:
  - Berechnung der tiefen-gemittelten Geschwindigkeit
  - Erkennung und Entfernung von Ausreißern
  - Glättung von Messdaten über gleitendes Mittel
  - Extrapolation der Geschwindigkeiten in den unmessbaren Bereichen
  - experimentelle Abschätzung der Schubspannungen
- **graphische Darstellung:** zur Überprüfung der Bearbeitungsergebnisse
- **Export in verschiedene Dateiformate:** Zur weiteren Auswertung können die Daten in Formate wie DXF, VTK (ParaView), BlueKenue oder frei konfigurierbare ASCII-Textdateien geschrieben werden.

Das ADCPtool ist auf den Webseiten des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft<sup>3</sup> der TU Graz als Open-Source-Projekt verfügbar.

Im Zuge dieser Arbeit wird es eingesetzt, wobei eventuelle Verbesserungen zurück in den Quellcode fließen.

---

<sup>3</sup><http://www.hydro.tugraz.at>

# 3 Durchführung der Messkampagnen

Bei der Planung der Messungen wurden drei Messtermine mit jeweils drei Tagen festgelegt. Der erste Termin sollte dem Testen der Messeinrichtungen und Kennenlernen des Projektgebiets dienen. Für den zweiten und dritten Messtermin waren die eigentlichen Messungen anberaumt. Die zeitliche Distanz zwischen beiden Terminen sollte möglichst unterschiedliche Bedingungen sicherstellen.

Für jede Messkampagne waren jeweils drei Messtage geplant, wobei der letzte Tag nur als Reserve diente.

Messkampagne	von	bis
MK 1	08.07.2013	10.07.2013
MK 2	29.07.2013	31.07.2013
MK 3	25.09.2013	27.09.2013

**Tabelle 3.1:** Termine Messkampagnen

## 3.1 Messgeräte und Messvorrichtungen

### 3.1.1 Messboote

Aufgrund der Größe des Speichers Wasserfallboden wurde entschieden, die Messungen von zwei Booten aus durchzuführen.

Hauptboot (Abb. 3.1 links) von der Verbund VHP wird für Vermessungsarbeiten in Stauräumen eingesetzt und ist mit differentielltem GPS und eigener Echolot-Sonde ausgestattet. Daher wurde dieses Boot als „Mutterschiff“ für die ADCP-Geräte genutzt, wodurch die Messprofile georeferenziert aufgenommen werden konnten.

Das zweite Boot, welches mit einem kleinen Elektromotor ausgestattet war, wurde für Schwebstoffprobenentnahmen, Temperatur- und LISST-Messungen verwendet. Die Orte, an denen die Direktproben entnommen wurden, wurden nach kurzer Analyse der zuvor aufgezeichneten Backscatter-Daten festgelegt. Damit das Zweitboot die Proben an den definierten Stellen entnehmen konnte, wurde es vom ersten Boot dorthin gelotst.

Mit dieser Strategie konnte das Hauptboot kontinuierlich ADCP-Profile aufnehmen, während das andere Boot nur von Messpunkt zu Messpunkt fahren musste.



**Abbildung 3.1:** links: Hauptboot, rechts: Zweitboot

### 3.1.2 ADCP Geräte

Als Messgeräte für Geschwindigkeits- und Backscatter-Messungen kamen zwei ADCP-Breitband-Geräte der Firma Teledyne RDI zum Einsatz. Als Haupt-Gerät kam das Modell RiverRay zum Einsatz, das freundlicherweise von der norwegischen NTNU in Trondheim zur Verfügung gestellt wurde. Beim zweiten Gerät handelte es sich um ein RioGrande 600 kHz der Tiroler TIWAG, das nur bei der dritten Messkampagne verwendet wurde.

#### Einschränkungen

Systembedingt können ADCP-Geräte Messungen nicht in der gesamten Wassersäule durchführen:

- Nahe der Wasseroberfläche können aufgrund der zu kurzen Signallaufzeit keine Daten aufgenommen werden. (*Ringing-Effekt*)

- Im Bereich nahe der Gewässersohle können aufgrund der schrägen Anordnung der Schallgeber keine Daten ausgewertet werden. (*Side-Lobes-Effekt*)

Im vorliegenden Projekt hatten diese Einschränkungen jedoch keine Bedeutung für die Auswertung der Ergebnisse.

Da jedoch beide Geräte mit der gleichen Frequenz arbeiten konnten sie nicht simultan zu Vergleichsmessungen eingesetzt werden. Stattdessen wurden ausgewählte Profile viermal (in der Reihenfolge Gerät 1-2-1-2) abgefahren. Damit konnte sichergestellt werden, dass etwaige Unterschiede in den Ergebnissen keine Änderung der Standortbedingung bedeuten.

	<b>RiverRay (600 kHz)</b>	<b>RioGrande (600 kHz)</b>
<b>Geschwindigkeitsmessung</b>		
Geschwindigkeitsbereich	±5 m/s, max. ±20 m/s	±5 m/s, max. ±20 m/s
Tiefenbereich	0,4 bis 60 m	0,7 bis 75 m
Präzision	0,25 %, 2 mm/s	0,25 %, 2 mm/s
Auflösung	1 mm/s	1 mm/s
<b>Bottom Tracking</b>		
Geschwindigkeitsbereich	9,5 m/s	9,5 m/s
Tiefenbereich	0,4 bis 100 m	0,8 bis 90 m
Präzision	0,25 %, 2 mm/s	0,25 %, 2 mm/s
Auflösung	1 mm/s	1 mm/s
<b>Tiefenmessung</b>		
Tiefenbereich	0,3 bis 100 m	0,8 bis 90 m
Präzision	1 %	1 %
Auflösung	1 mm	1 mm

**Tabelle 3.2:** Gegenüberstellung Kennwerte für die ADCP-Geräte<sup>1</sup>



**Abbildung 3.2:** links: beide ADCP-Geräte, rechts: Schwebstoffprobennahme

### 3.1.3 Schwebstoffsammler

#### Gerätebeschreibung und Entnahme

Der Schwebstoffsammler dient zur Entnahme von Wasserproben aus denen die Schwebstoffkonzentration auf direkte Weise bestimmt werden kann. Die Ergebnisse werden zur Kalibrierung der ADCP-Backscatter-Werte benötigt.

Das Entnahmegesetz besteht aus einem transparenten Zylinder mit verschließbaren Enden. Um Proben in beliebigen Wassertiefen nehmen zu können, ist der Zylinder an einem Seil mit Meter-Markierungen befestigt. Beim Eintauchen des Schwebstoffsammlers bleibt die obere Zylinderabdeckung in der Hand des Bedieners. Erst wenn die Entnahmetiefe erreicht ist, lässt dieser die Abdeckung los, sodass diese den Zylinder verschließt und er anschließend hoch gezogen werden kann. Zuletzt wird die Wasserprobe durch Öffnen des Ventils am unteren Zylinderende in eine beschriftete Probenflasche gefüllt.

#### Auswertung im Labor

Die Auswertung erfolgt in der Regel gemäß DIN 38409 - Teil 2<sup>2</sup> und ÖNORM M 6274.<sup>3</sup> Im wesentlichen wird dabei die Probe durch einen Membranfilter gedrückt, die Filtrerrückstände abgewogen und durch das vorher ermittelte Probenvolumen dividiert. Wichtig dabei ist, dass die Filtermembranen vor und nach dem Filtrervorgang bis zur Gewichtskonstanz getrocknet werden bevor sie abgewogen werden, und dass beim Entleeren alle Sedimentrückstände aus der Probenflasche gespült werden und auf dem Filter landen.

Die Schwebstoffkonzentration lässt sich dann mit

$$SSC = \frac{m_2 - m_1}{V_P} \left[ \frac{\text{mg}}{\text{l}} \right] \quad (3.1)$$

anschreiben. Dabei sind  $m_2$  und  $m_1$  die Massen des Filters vor und nach dem Filtrervorgang und  $V_P$  das vorher bestimmte Probenvolumen. Als Messgenauigkeiten werden  $\pm 5$  ml für die Volumsbestimmung und  $\pm 1$  mg bei der Masse vorgeschrieben. (*Schwebstoffe im Fließgewässer - Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransportes* 2008)

<sup>2</sup>DIN 38409-2:1987-03: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung

<sup>3</sup>ÖNORM M 6274: 1985-09: Wasseruntersuchung; Bestimmung der Massenkonzentration an abfiltrierbaren Stoffen und ihres Glührückstandes

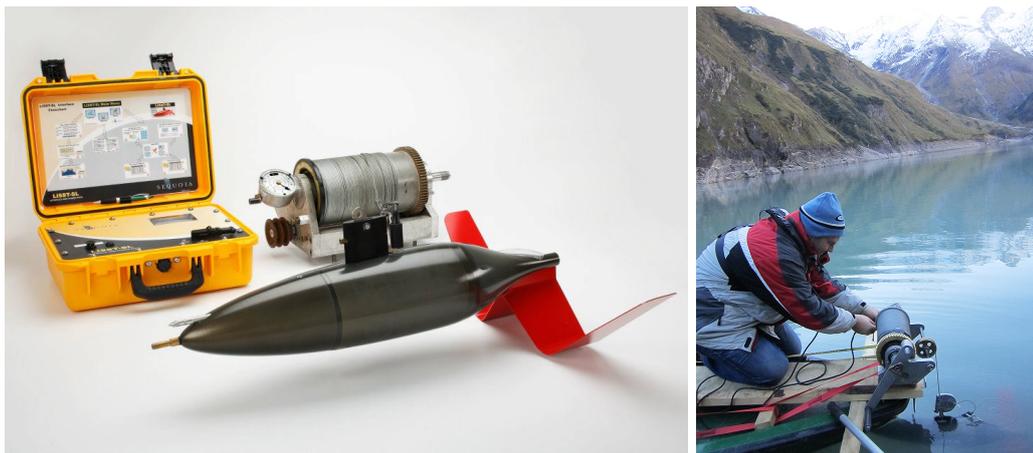
### 3.1.4 LISST-Gerät

Das verwendete LISST-SL Gerät der Firma Sequoia<sup>4</sup> sollte bei der zweiten und dritten Messkampagne zusätzlich Schwebstoffkonzentrationen und Korngrößenverteilungen liefern.

Es wurde am Bug des zweiten Messbootes an einer zum Gerät gehörigen Seilwinde montiert um Messungen in frei definierbaren Tiefen durchzuführen.

		Bereich von	bis
Schwebstoffkonzentrationen	mg/l	10	2000
Korndurchmesser	µm	1,9	381
Wassertiefen	m	0	30
Betriebstemperatur	°C	0	40
Fließgeschwindigkeit	m/s	0	3

**Tabelle 3.3:** Messbereiche des LISST-SL



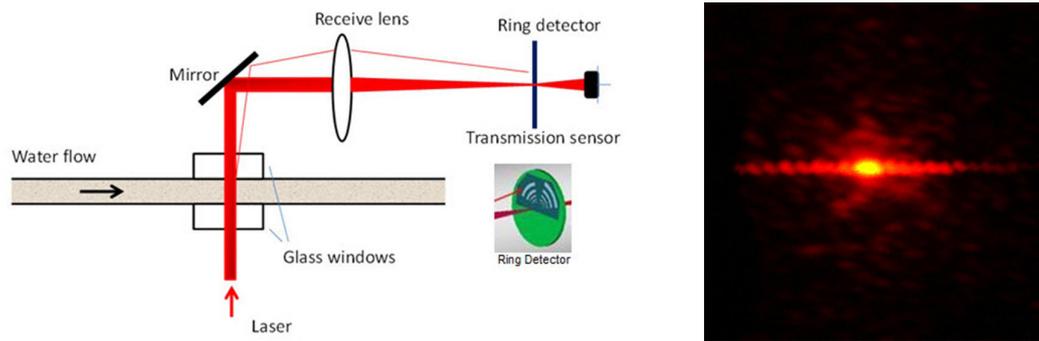
**Abbildung 3.3:** links: Produktfoto mit Zubehör<sup>5</sup>, rechts: LISST-SL in Einsatz

### Funktionsprinzip der Diffraktion

Die Diffraktion ist das Beugen von physikalischen Wellen, wenn diese an einem Hindernis gebrochen werden. Das kann beispielsweise beobachtet werden, wenn Licht durch eine kleine Öffnung (Blende) auf eine Fläche projiziert wird. Anstelle eines scharfen Punktes in der Form der Öffnung erscheint ein sternentartiger Punkt (Abb. 3.4 rechts). Die Lichtwellen wurden also abgelenkt. Es ist bekannt, dass das gleiche Muster auftritt, wenn statt einer Scheibe mit Loch, ein Objekt mit

<sup>4</sup>Sequoia Scientific Inc. , Bellvue, WA, USA

<sup>5</sup>Quelle: <http://www.sequoiasci.com/product/lisst-sl/>, Abgerufen: 27.02.2014



**Abbildung 3.4:** links: Funktionsschema des LISST-SL<sup>6</sup>, rechts: Diffraction beim Lichtspalt<sup>7</sup>

der gleichen Form des Loches angestrahlt wird. Diese Tatsache macht sich die Laser-Diffractions-Methode zu nutzen um Partikeldurchmesser zu bestimmen.

Beim LISST-Gerät wird Wasser durch eine Röhre mit Fenster gepumpt. Durch das Fenster strahlt der Laser die vorbeischwimmenden Partikel an, die eine Beugung der Lichtwellen verursachen, welche vom Ring-Sensor gemessen werden kann. Der Ring-Sensor besteht aus 32 konzentrisch angeordneten ringförmigen Sensoren, wodurch 32 verschiedene Korndurchmesser-Größenbereiche (*rings*) gemessen werden können. (Gray u. a., 2004)

Als Ergebnis erhält der Benutzer Zeitreihen an Schwebstoffkonzentrationen für jede Kornfraktion.

### 3.1.5 Temperatursonde

Als Temperatursonde wurde ein Kabellichtlot mit Temperaturmessfunktion verwendet. Kabellichtlote werden üblicherweise zur Messung von Wasserständen benutzt. Am Ende des Flachbandkabels mit aufgedrucktem Maßband sitzt ein Sensor zur Messung der elektrischen Leitfähigkeit. Dadurch kann erkannt werden, ob der Sensor in Wasser getaucht ist. Über die Leitfähigkeit kann auch die Wassertemperatur abgeleitet werden.

<sup>6</sup>Quelle: (LISST-SL Operating Manual 2011)

<sup>7</sup>Quelle: <http://physicbox.uni-graz.at/unterrichtsmaterial/demonstrationsexperimente/optik/beu1b.jpg>, Abgerufen: 27.02.2014

## **3.2 Durchführung der Messkampagnen**

### **3.2.1 Messkampagne 1 (8. - 9.7.2013)**

Bei der ersten Messkampagne stand das Kennenlernen des Speichers und seiner Eigenschaften im Vordergrund. Nach den Testfahrten am ersten Tag mit dem ADCP-Gerät, konnte mit dem am Abend analysierten Ergebnissen am zweiten Tag bereits mit einem Messprogramm gestartet werden.

Die Messungen konzentrierten sich auf den Bereich zwischen Profil 16 und Profil 19, wobei im restlichen Bereich etwa jedes vierte Profil aufgenommen wurde. (vgl. Abbildung 3.8)

### **3.2.2 Messkampagne 2 (29. - 30.7.2013)**

Bei der zweiten Kampagne konzentrierten sich die Messungen auf den Bereich bei der Sperre und der Ost-Bucht, wo die Margaritze-Überleitung in den Speicher mündet. Es wurden auch einige Längsprofile aufgenommen, um ein räumliches Bild der Schwebstoffsituation im Speicher zu erhalten und besonders um deren Veränderung in Längsrichtung besser beobachten zu können.

Außerdem wurde versucht das LISST-SL in Betrieb zu nehmen, was aber an Problemen mit der Verkabelung scheiterte.

### **3.2.3 Messkampagne 3 (25. - 26.9.2013)**

In der letzten Kampagne sollte endlich das LISST-SL zum Einsatz kommen und mit dem zusätzlichen ADCP-Gerät Rio Grande 600 kHz (TIWAG) sollte im Bereich der Sperre bis in größere Wassertiefen gemessen werden. Der seit der vorigen Messkampagne gestiegene Stauspiegel war auch Anlass, die Messungen wieder an den gleichen Orten durchzuführen um eventuelle Veränderungen beobachten zu können.

Im Laufe der Messungen stellte sich jedoch heraus, dass die Messergebnisse des LISST-SL nicht verwendet werden können. Ein weiterer Dämpfer war, dass am zweiten Tag das Zweitboot aufgrund einer lockeren Verankerung nicht mehr mit dem Kran in den Speicher gehoben werden konnte. Dadurch blieb nur noch die Möglichkeit mit den zwei ADCPs Vergleichsmessungen durchzuführen.

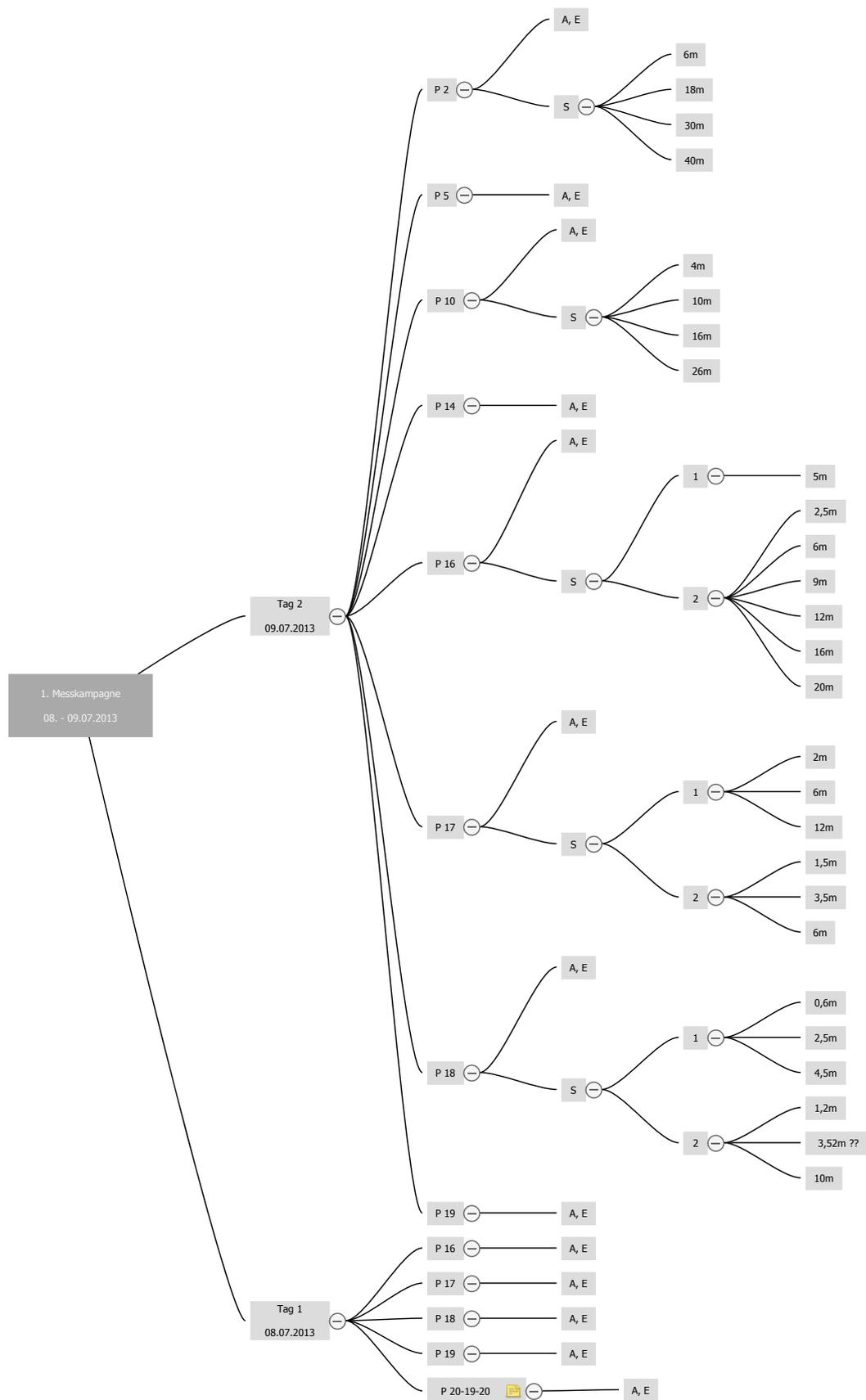


Abbildung 3.5: Übersicht Messdaten, MK1

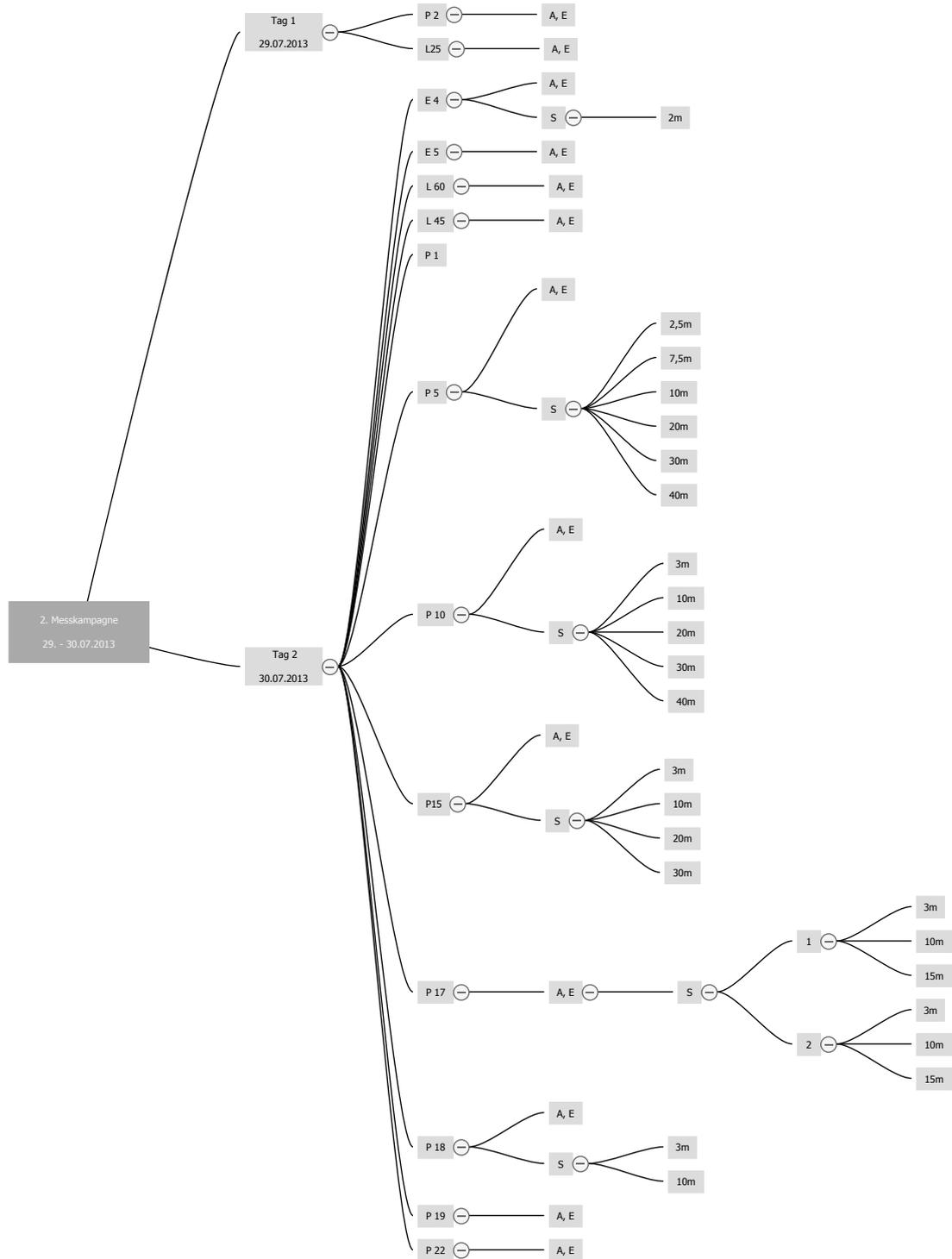


Abbildung 3.6: Übersicht Messdaten, MK2

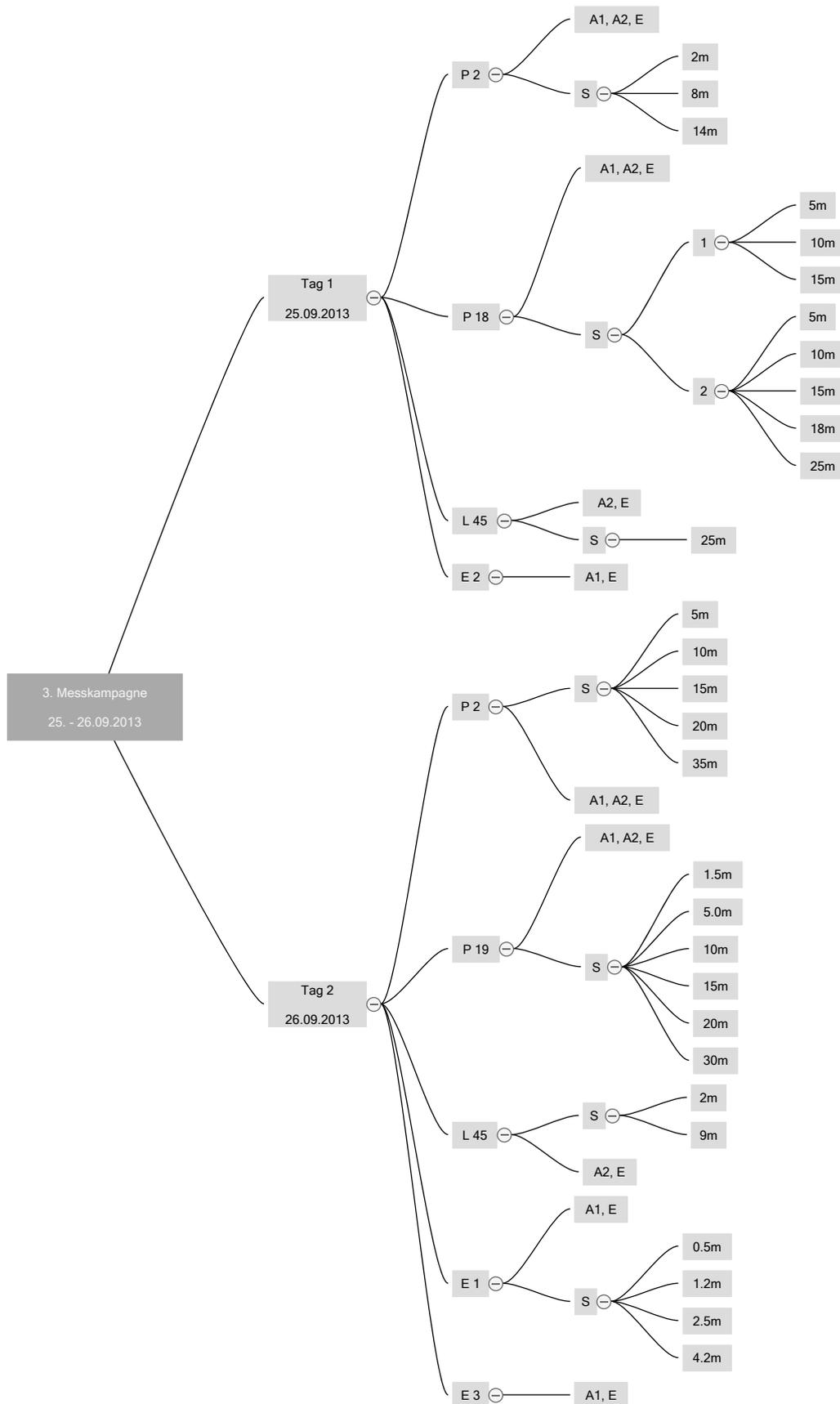


Abbildung 3.7: Übersicht Messdaten, MK3

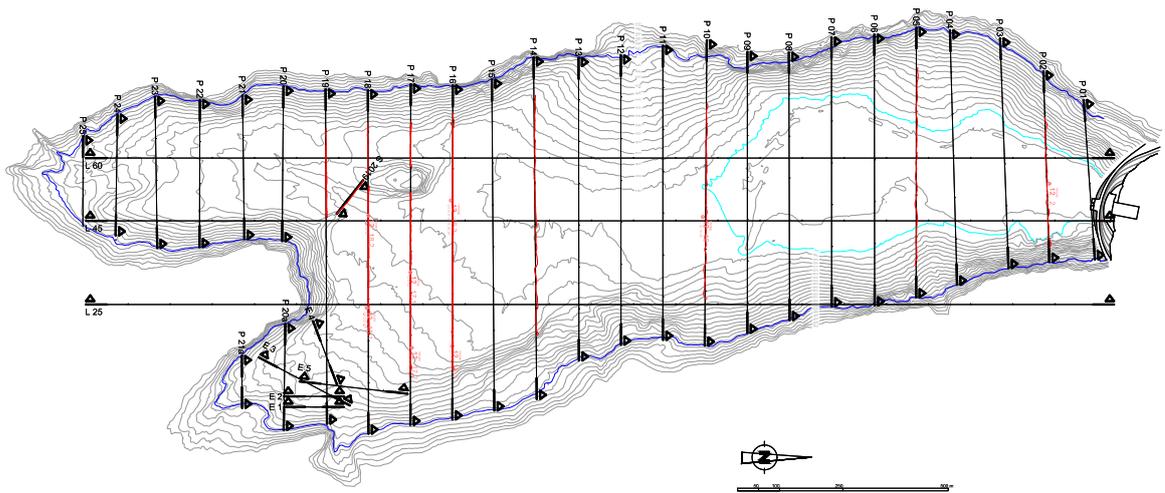


Abbildung 3.8: Messprofile laut GPS, MK1

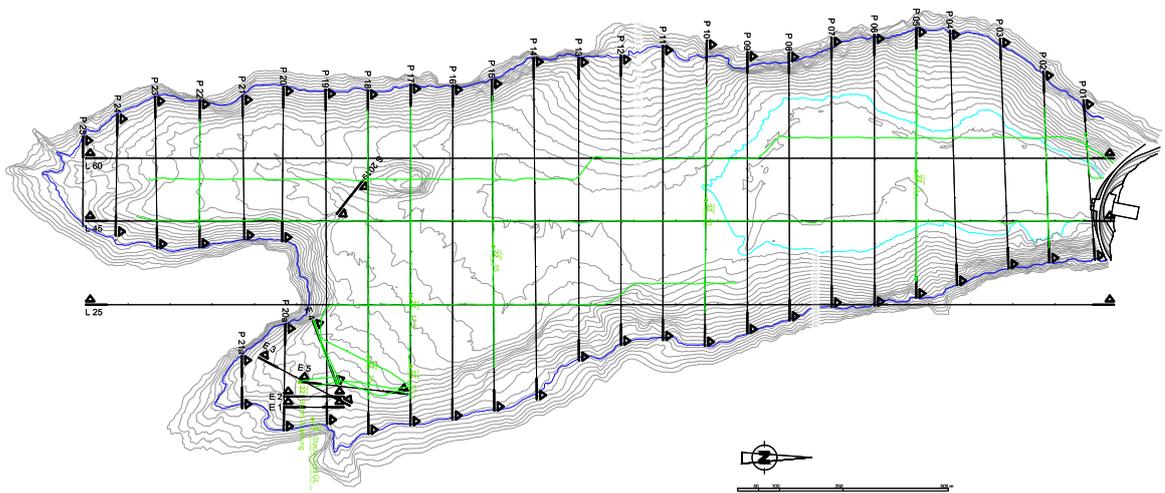


Abbildung 3.9: Messprofile laut GPS, MK2

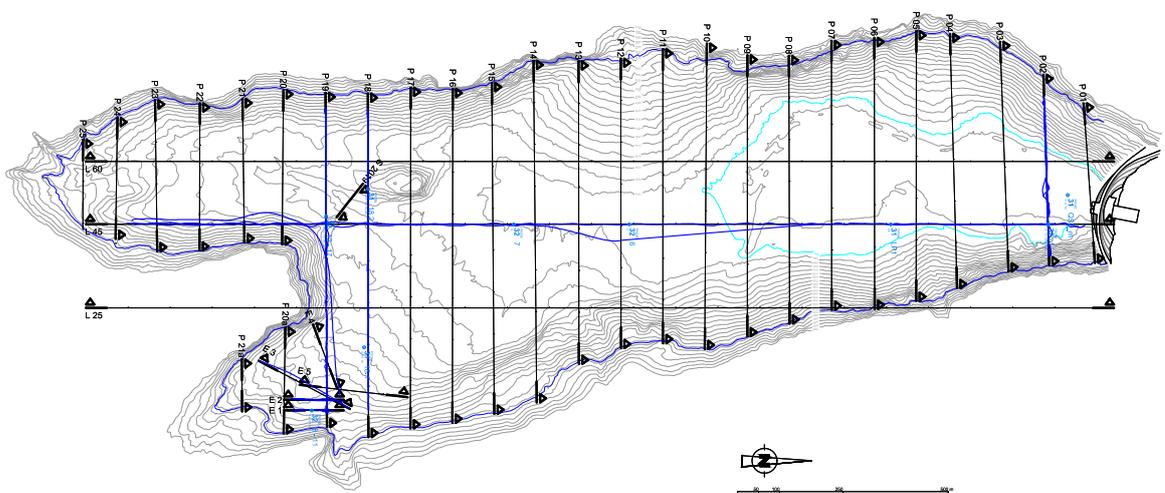


Abbildung 3.10: Messprofile laut GPS, MK3

## 3.3 Organisation der Messdaten

### 3.3.1 Definition der Messprofile

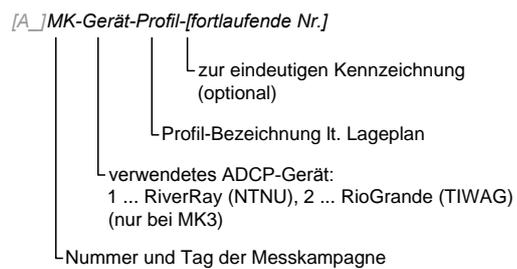
Bei der Planung der Messkampagne wurde darauf geachtet, die ADCP-Messstrecken möglichst auf geradlinige Profile zu legen. Wo möglich, wurden die bereits von der Verbund VHP zu Vermessungszwecken angelegten Querprofile verwendet. Zusätzlich wurden auch Profile im Einmündungsbereich der Sedimentüberleitung und in Nord-Süd-Richtung verlaufende Längsprofile festgelegt. Dabei bedeuten die Bezeichnungen

- **Pxx** vorhandene Querprofile,
- **Ex** Querprofile beim Einlauf der Sedimentüberleitung und
- **Lxx** Längsprofile, wobei xx ein Zehntel des um 46 000 erhöhten Rechtswertes des Längsprofils im BMN-Koordinatensystem (M31) ist.

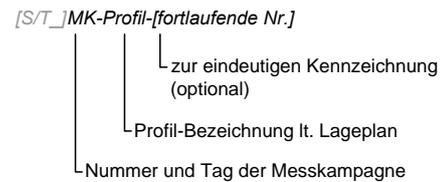
Während die georeferenzierbaren Daten im Koordinatensystem BMN (M31) angegeben sind  $(x, y, z)$ , wurde für die Profile zusätzlich ein lokale Profilkoordinatensystem  $(u, v, w)$  eingeführt, dessen Ursprung sich am jeweils orographisch rechten bzw. am südlichen Profilende befindet. Die lokale X-Richtung  $u$  ist entlang der Profillinie und die lokale Z-Richtung  $w$  nach oben definiert. In den Profildarstellungen in den folgenden Kapiteln ist der Ursprung des Profilkoordinatensystems immer rechts, sodass der Betrachter immer in Fließrichtung blickt.

### 3.3.2 Bezeichnung der einzelnen Messdaten

Zur eindeutigen Kennzeichnung von Messdaten und zu dessen leichterem Verarbeitung wurden diese nach dem in Abbildung 3.11 gezeigten Schema bezeichnet.

**ADCP-Profile**

Beispiel: 32-1-P02-2

**Schwebstoffproben und Temperaturprofile**

Beispiel: 12-P02-35

**Abbildung 3.11:** Verwendete Bezeichnungen für Messdaten

# 4 Hydrodynamische Messergebnisse

## 4.1 Übersicht

Auf den folgenden Seiten werden die hydrodynamischen Messergebnisse diskutiert. Für jede Messkampagne gibt es getrennte Übersichtsgrafiken, welche die tiefengemittelten (z.B. Abbildung 4.4) und die betragsmäßigen Fließgeschwindigkeiten (z.B. Abbildung 4.3) darstellen.

Eine Darstellung der Ergebnisse inklusive tiefengemittelter Geschwindigkeiten ist in der profilweisen ADCP-Auswertung in Abschnitt A.2 zu finden.

Für die Auswertung auf den folgenden Seiten wurden die Messdaten nachbearbeitet. Konkret wurden Ausreißer mittels *ADCPTool* entfernt und die Daten anschließend geglättet. Die dazu verwendeten Parameter sind in Tabelle A.1 ersichtlich.

## 4.2 Fließgeschwindigkeiten

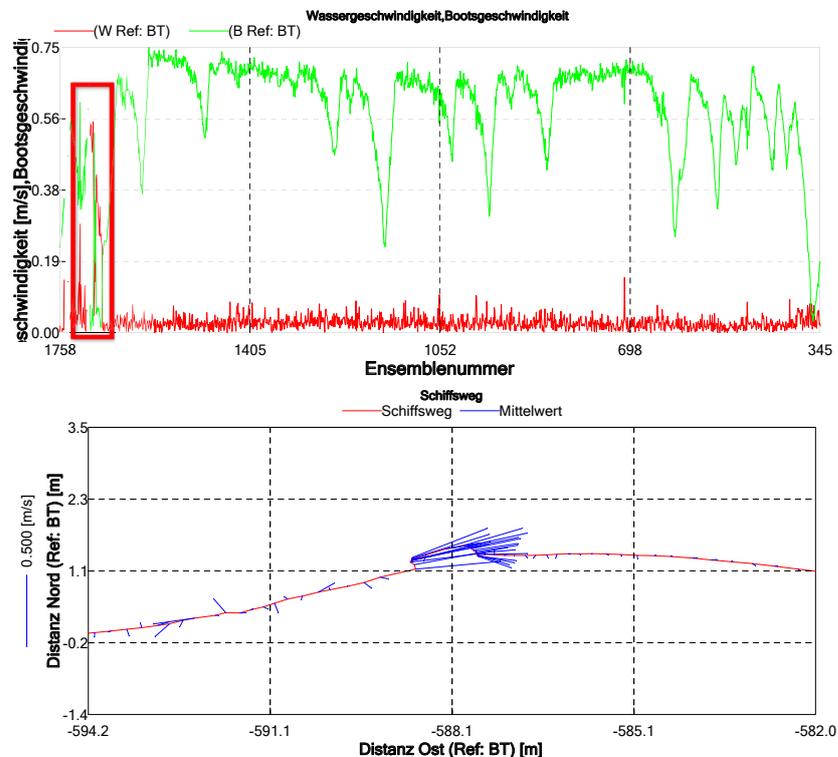
### 4.2.1 Auffälligkeiten

Generell ist zu beobachten, dass sich die aufgezeichneten Fließgeschwindigkeiten meist nicht von den zufälligen Messfehlern oder Turbulenzen unterscheiden lassen.

Ist eine eindeutige Fließbewegung erkennbar, so verläuft sie nicht immer in die Richtung, welche man aufgrund der zum Messzeitpunkt aktiven Zu- und Abflüsse erwarten würde.

Teilweise (z.B. 12-P16-2) gibt es auch Profile in denen ganze Ensembles sprunghaft höhere Geschwindigkeiten besitzen als die umgebenden Ensembles. Nach

Betrachtung der durch *bottom tracking* (BT) ermittelten Boots-Geschwindigkeit sind diese Ausreißer aber wohl eher einem Messfehler des *bottom tracking* zurückzuführen. Siehe dazu Abbildung 4.1.



**Abbildung 4.1:** Daten zu Profil 12-P16: Die aus dem BT ermittelte Boots-Geschwindigkeit (grün) sinkt kurz vor dem westlichen Profilende rapide ab, wodurch sich die erhöhte rechnerische Fließgeschwindigkeit (rot) ergibt.

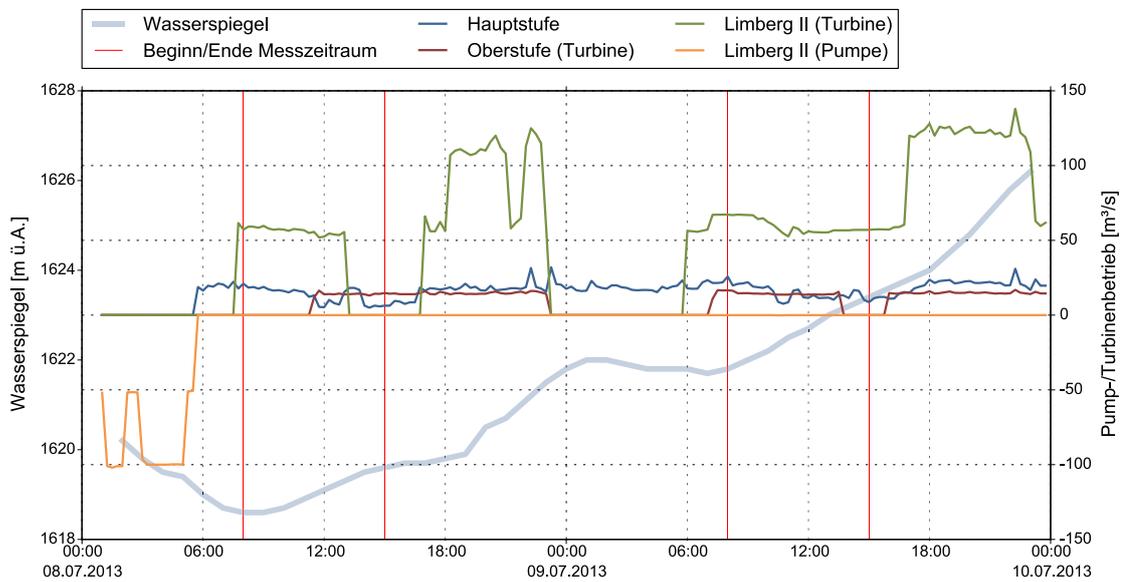
Allgemein ist festzustellen, dass dieser Messfehler

1. bei Mehrfachmessungen immer an den gleichen Stellen auftritt, dh. reproduzierbar ist, und
2. dieser oft dort auftritt, wo die Gewässersohle eine hohe Neigung besitzt oder sich sprunghaft verändert.

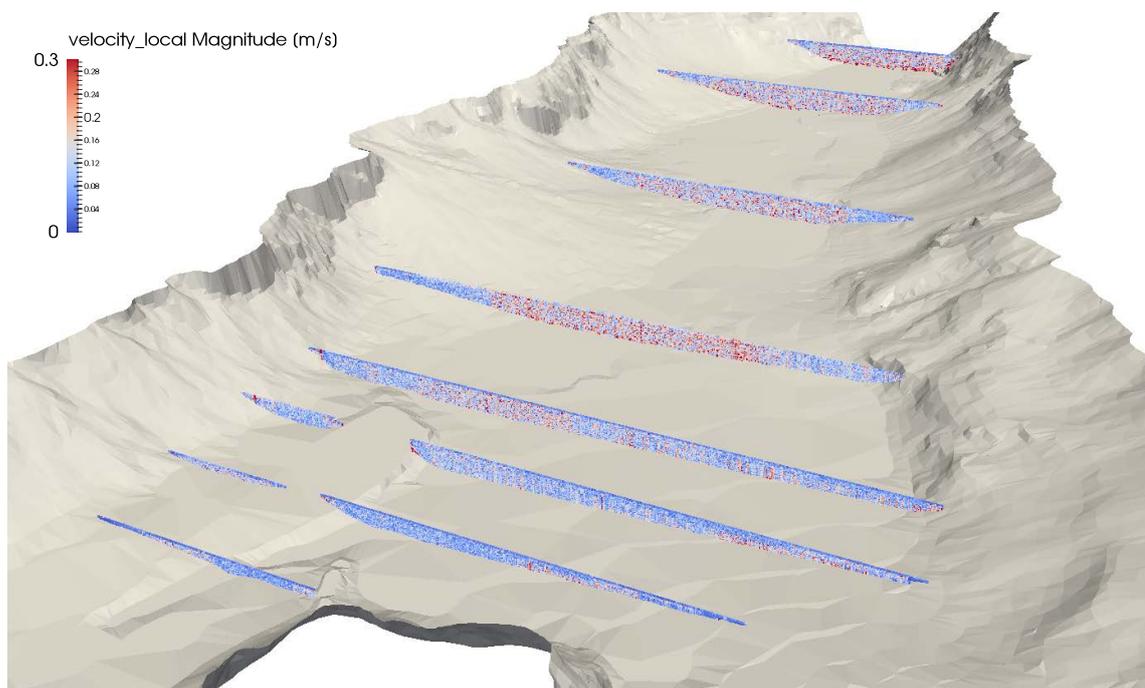
Erkannt und entfernt könnte dieser Effekt bei der Verwendung von anderen Positionsbestimmungsmethoden, insbesondere differentiellem GPS. Die aufgezeichneten GPS-Log-Daten können im vorliegenden Projekt dafür nicht herangezogen werden, da der GPS-Empfänger nicht auf dem ADCP-Gerät montiert war, wodurch sich ein seitlicher Versatz ergibt, wodurch sich die aufgezeichneten Boots-Geschwindigkeiten unterscheiden.

Ein weiterer Grund für Ausreißer können zu abrupte Boots-bewegungen sein, welche von den Rotations-Sensoren des ADCP-Geräts nicht registriert werden.

## 4.2.2 Ergebnisse Messkampagne 1

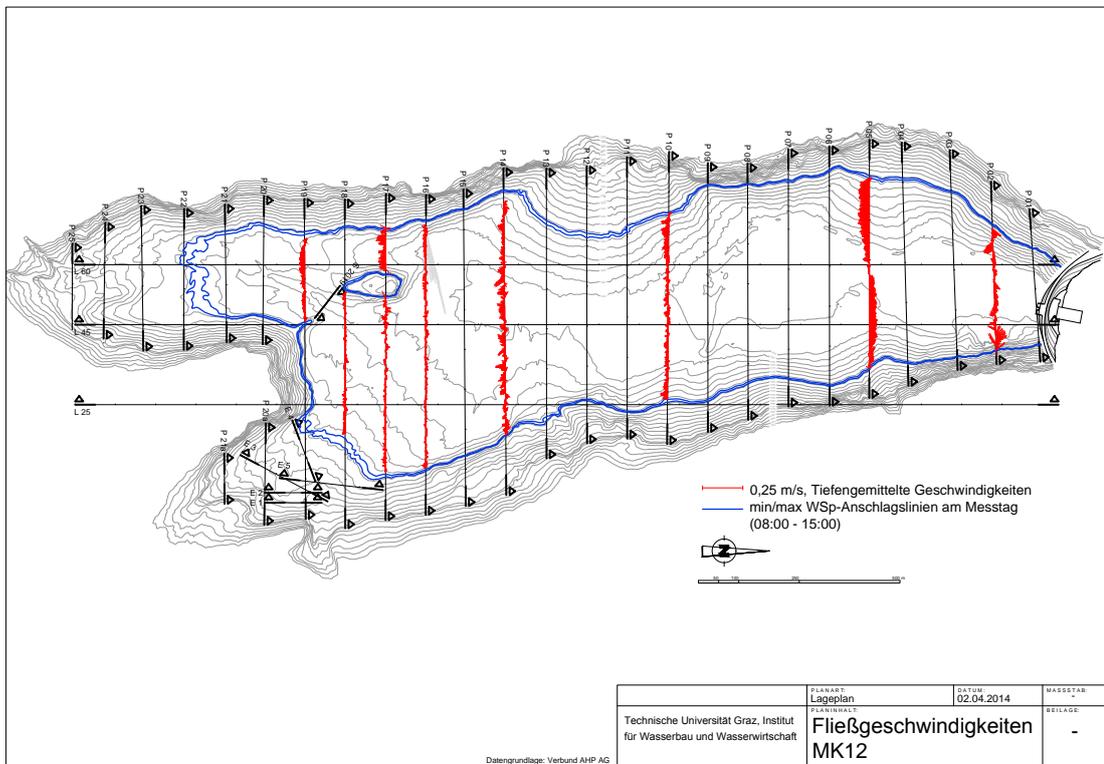
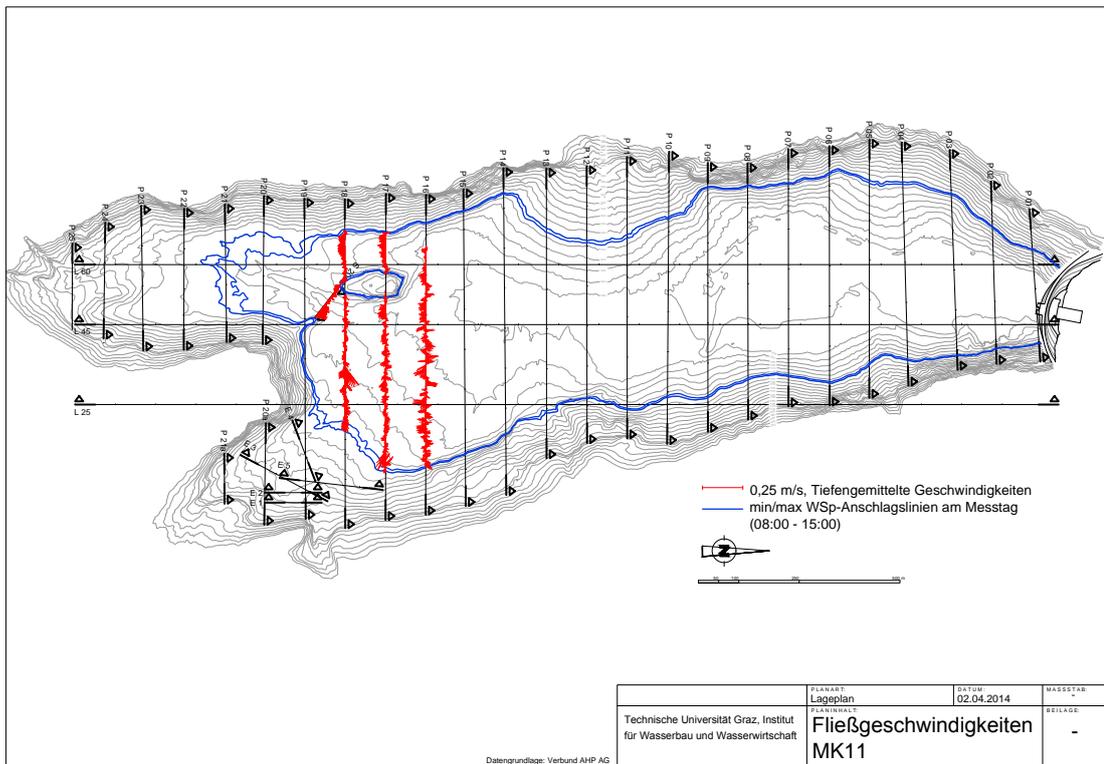


**Abbildung 4.2:** Zu- und Abflüsse in den Speicher während der Messkampagne 1



**Abbildung 4.3:** Übersicht Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 1

Beim Betrachten der tiefengemittelten Geschwindigkeiten (Abbildung 4.4) fällt nicht nur der gegen den Uhrzeigersinn großräumige, horizontale Wirbel in Profil 5 auf, sondern auch die Bewegung am westlichen Ufer in Richtung Süden, die auf Höhe von Profil 17 ihren Höhepunkt erreicht.

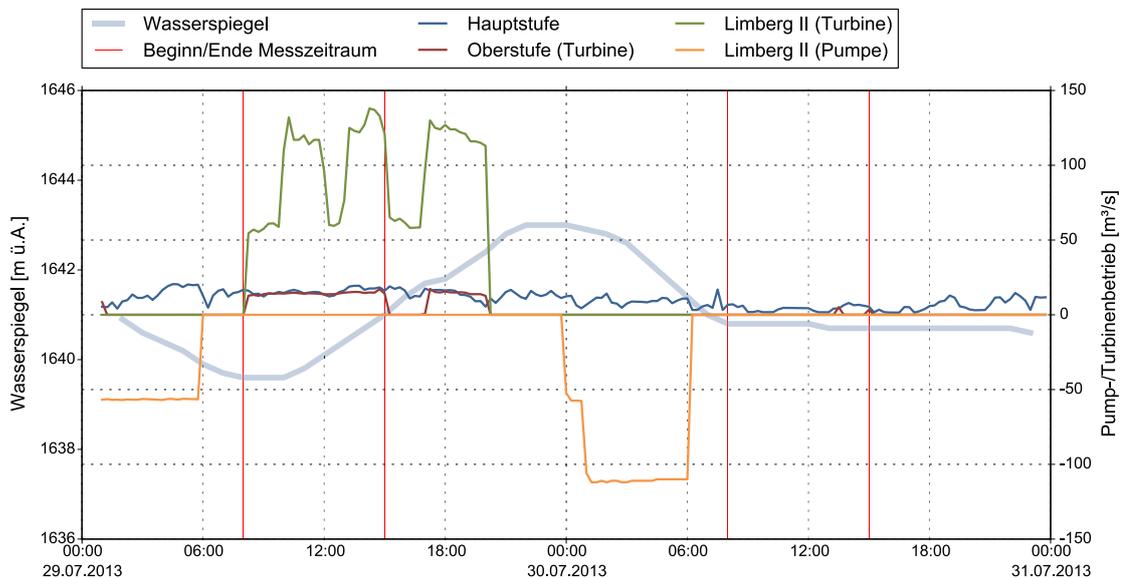


**Abbildung 4.4:** Tiefen-gemittelte Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 1

**Bereich um Insel - Tag 1** Hier lassen sich westlich der Insel Richtung Süden – vermutlich windinduzierte – Strömungen ausmachen. Südlich der Insel ist im Bereich eines (eingestauten) Bachbetts eine Strömung in Nordrichtung erkennbar, welche sich in den Profilen P17, P18 in etwa 3 m Tiefe fortsetzt, bis diese dann in Profil P16 verschwunden ist.

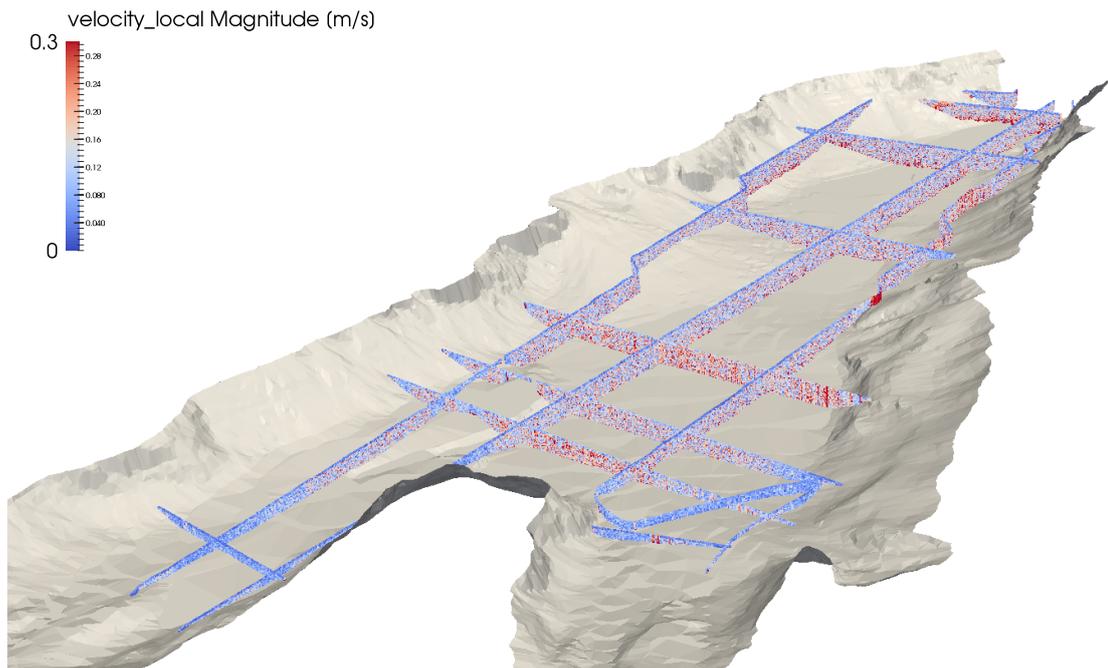
**Bereich um Insel - Tag 2** Ein ähnliches Bild zeigt sich am Tag 2. Die nordwärts gerichtete Strömung befindet sich bei P17 und P18 jeweils auf etwa 10 m Tiefe und möglicherweise auch im nicht-messbaren Bereich darunter.

### 4.2.3 Ergebnisse Messkampagne 2



**Abbildung 4.5:** Zu- und Abflüsse in den Speicher während der Messkampagne 2

**Längsprofil L25 (21-L25)** Dieses am Ostufer gelegene Längsprofil zeigt in der südlichen Hälfte eine Strömung Richtung Süden, während in der anderen Hälfte eine Strömung in Nord-Richtung festzustellen ist, die oberflächennah ( $r \leq 5$  m) bereits weiter südlich beginnt. Es ist anzumerken, dass aufgrund der Profillänge von über 2500 m die Dauer der Aufnahme von über einer Stunde ebenfalls eine Rolle für die Veränderungen spielen kann.



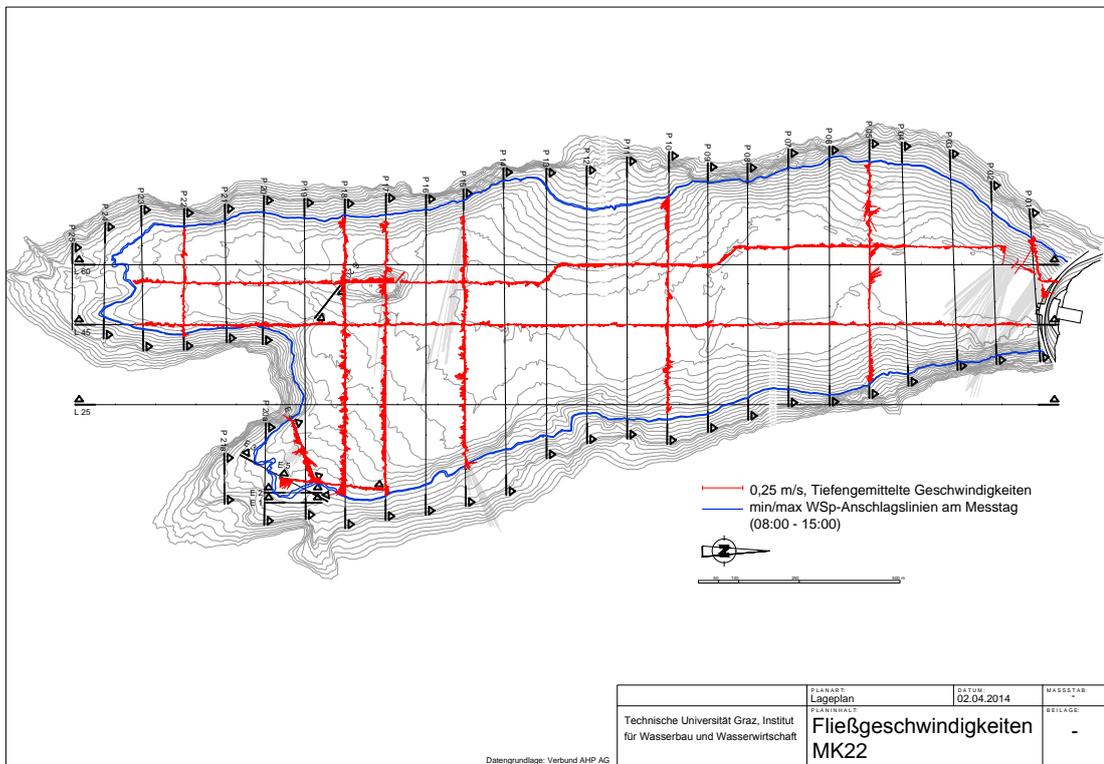
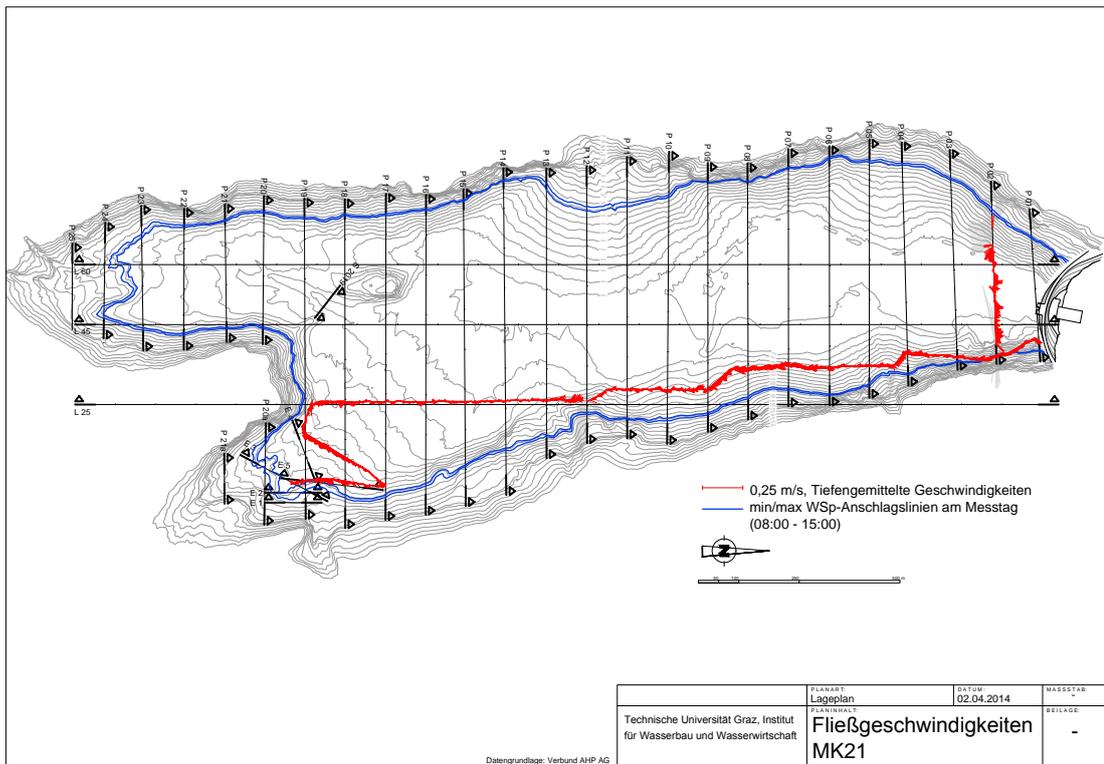
**Abbildung 4.6:** Übersicht Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 2

**Längsprofile L45, L60** Etwa jeweils bei Station 2000 m ist bei beiden Profilen ein Strömungsbild zu erahnen, das zur Zirkulationsbewegung aus Profil 12-P05 und qualitativ zur nordwärts gerichteten Strömung aus 21-L25 passt. Die Fließgeschwindigkeiten liegen aber konstant unter 0,10 m/s. Ansonsten ist bei 22-L45 im südlichen Bereich eine Strömung in südöstliche Richtung auszumachen.

**Nördlicher Bereich P02, P01** Verhältnismäßig hohe Fließgeschwindigkeiten ( $v \approx 0,3 \text{ m/s}$ ) konnten im Nahbereich der Wasserfassung der Hauptstufe gemessen werden. Allerdings zeigen auch hier die Geschwindigkeitsvektoren weg vom Einlauf. Zu jenem Zeitpunkt als das Profil 21-P02 gemessen wurde, wurde bei der Hauptstufe mit etwa mit etwa  $15 \text{ m}^3/\text{s}$  turbiniert. Eine gute Stunde später wurde mit Profil 22-P01 erneut in der Nähe der Wasserfassung gemessen. Es konnten aber bei unverändertem Abfluss keine nennenswerten Fließgeschwindigkeiten festgestellt werden.

Bei Profil P01 ist trotz der Nähe zur Wasserfassung der Hauptstufe kein Einfluss derselben erkennbar, während in Profil P02 größere Strömungsbilder erkennbar sind.

Es ist allerdings anzumerken, dass die Geschwindigkeitsdaten nur bis in eine Tiefe von 30 m reichen, wodurch bei einer Wassertiefe von ca. 60 m das Fließgeschehen nur zur Hälfte abgebildet ist.



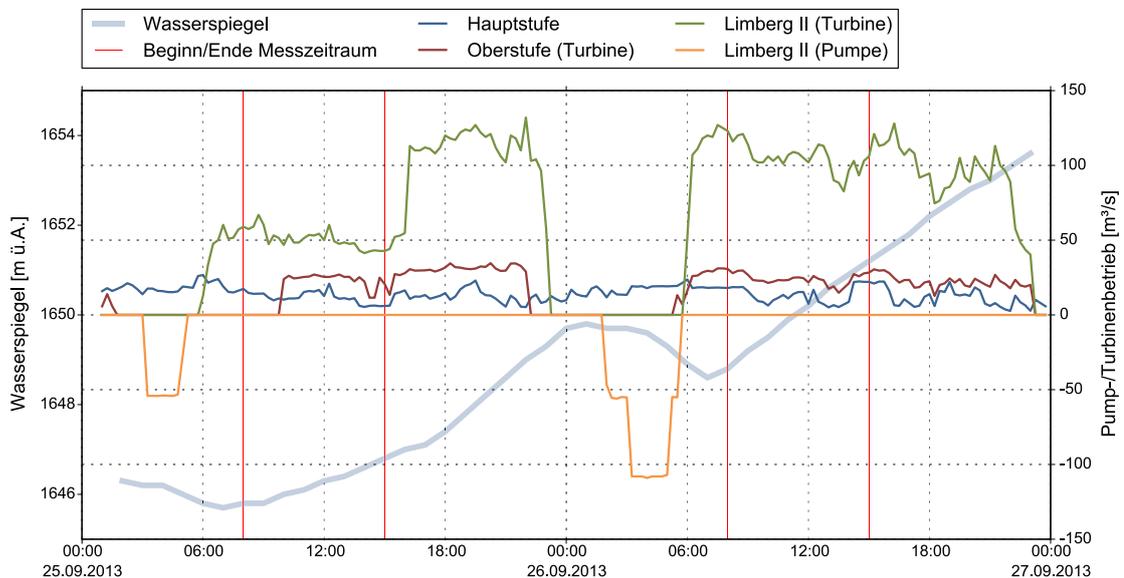
**Abbildung 4.7:** Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 2

**Bereich Einlauf Sedimentüberleitung** In Profil E4 (Doppel-Messung 22-E4-1 22-E4-2) ist im tieferen Querschnittsbereich eine nordwärts gerichtete Bewegung erkennbar. Die Sedimentüberleitung mündet jedoch weiter nördlich in den Speicher.

Bei Profil E4 gibt es ca. 10 Ensembles in Profilmitte, die den Eindruck machen als wären sie Ausreißer. Allerdings wurde das Profil zwei mal hintereinander aufgenommen und beim zweiten Mal (Profil 22-E4-2) gibt es an der selben Stelle wieder die vermeintlichen Ausreißer. Beim nahe gelegenen Profil E5 wurden ebenfalls erhöhte Fließgeschwindigkeiten gemessen. Es würde nahe liegen, dass alle diese Ausreißer von der Margaritze-Einleitung verursacht werden, da man eine passende Stromlinie hineinlegen könnte. Jedoch zeigen die Geschwindigkeitsvektoren Richtung Einleitung.

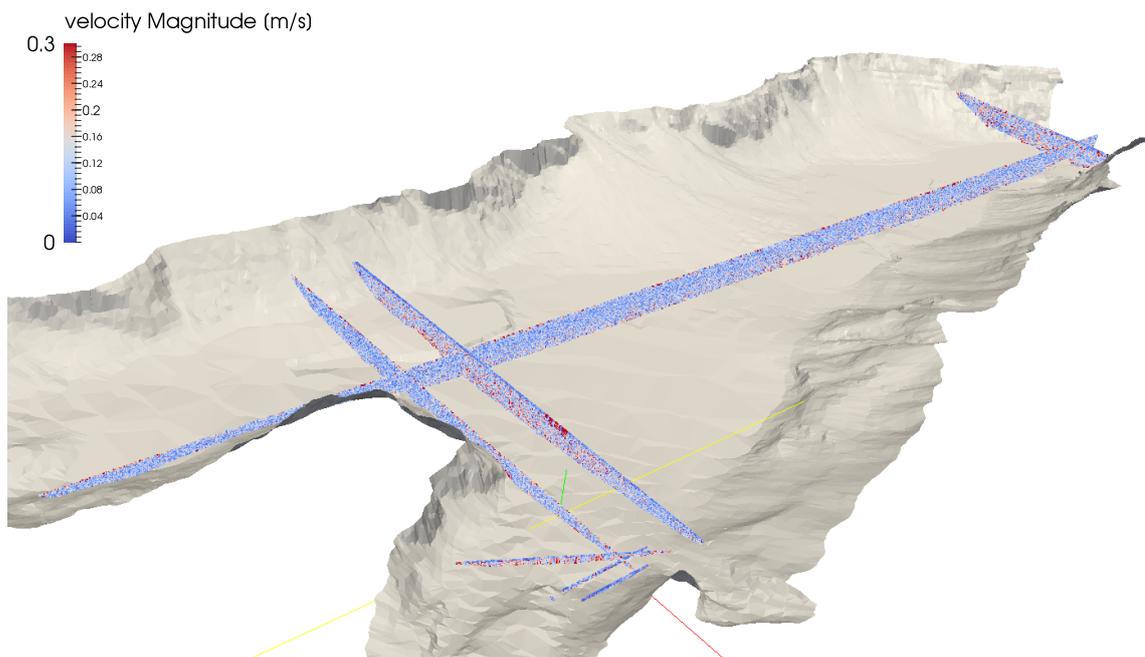
**Mittelbereich** In den Bereichen P5 bis P18 sind keine ausgeprägten Fließgeschwindigkeiten vorhanden. Einzig windinduzierte oberflächennahe Strömungen sind erkennbar.

#### 4.2.4 Ergebnisse Messkampagne 3



**Abbildung 4.8:** Zu- und Abflüsse in den Speicher während der Messkampagne 3

**Vergleichsmessungen P02** Die Vergleichsmessungen ergeben untereinander grundsätzlich ein ähnliches Strömungsbild. Die Geschwindigkeitskomponenten



**Abbildung 4.9:** Übersicht Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 2

in Nord-Süd-Richtung beschreiben jeweils an beiden Ufern eine Strömung mit  $v_y \approx 0,10 \text{ m/s}$  in Nordrichtung, manchmal gibt es mittig auch eine dritte Strömung in dieselbe Richtung. Räumlich begrenzt werden diese Strömungen von Bewegungen in Richtung Süden. Für die anderen zwei Geschwindigkeitskomponenten verhält es sich ähnlich.

**Vergleichsmessungen P18, P19** Aufgrund der geringeren Fließgeschwindigkeiten in diesen Profilen konnten keine eindeutigen Ähnlichkeiten gefunden werden.

Die in der MK1 festgestellten Strömungen rund um die Insel sind auch nicht mehr erkennbar, was daran liegen dürfte, dass die Insel hier bereits eingestaut war und sich so kein „Verengungseffekt“ mehr einstellte.

**Längsprofil L45** Obwohl die Aufnahmen von 32-2-L45 und 21-L25 21 Tage und 200 m entfernt liegen, zeigen sie ähnliche Strömungsmuster.

**Bereich Einlauf Sedimentüberleitung** Bei den in der MK3 gemessenen Profilen 32-1-E1-1 und -2 sind jeweils zwei entgegengesetzte Strömungen erkennbar. Paradoxerweise zeigt die Stärkere ( $v \approx 0,08 \text{ m/s}$ ) in Richtung Ufer.

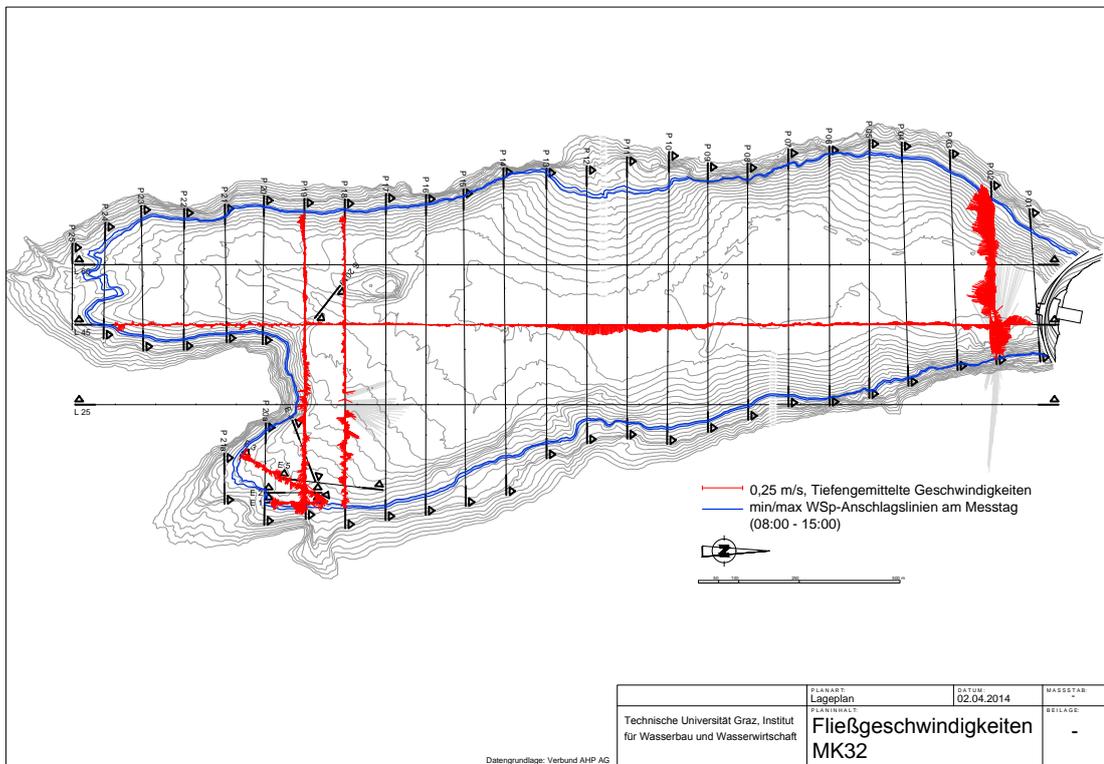
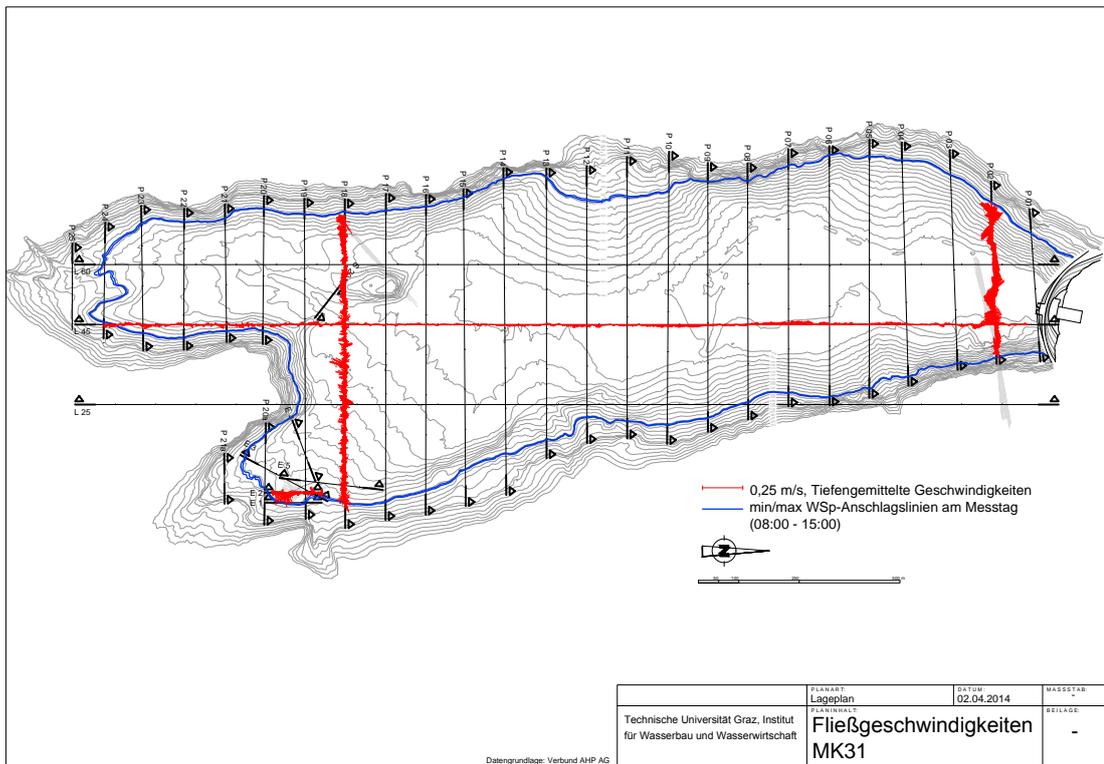


Abbildung 4.10: Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 3

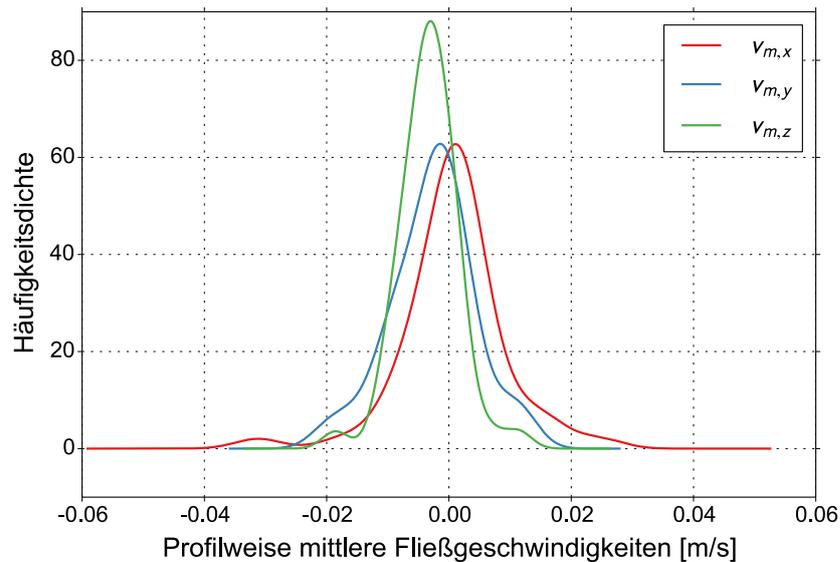


Abbildung 4.11: Verteilung der profilweisen Durchschnittsgeschwindigkeiten

## 4.2.5 Zusammenfassende Statistik

Im Häufigkeitsdichte-Histogramm in Abbildung 4.11 und den Korrelations-Plots in Abbildung 4.12 lassen sich folgendes erkennen:

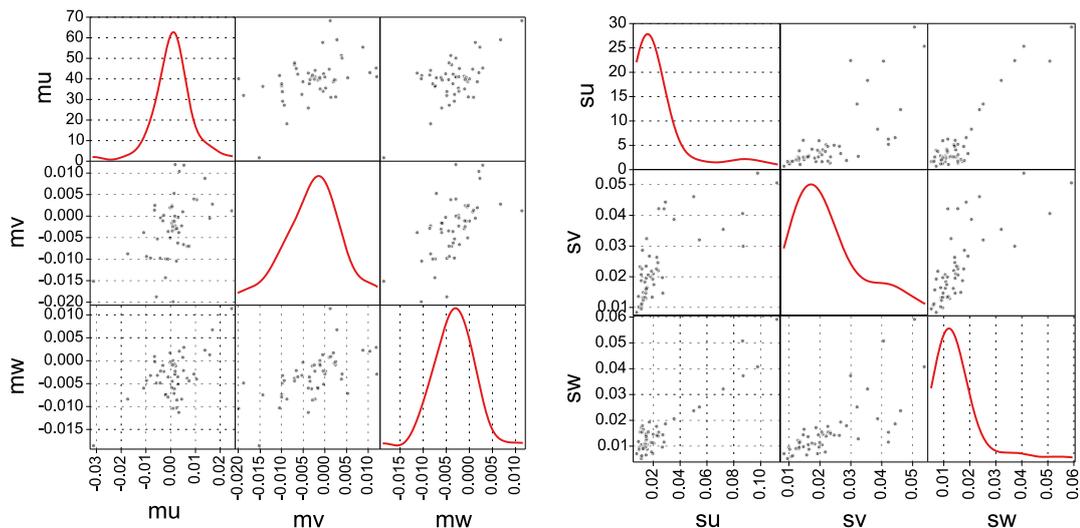
- Die X- und Z-Komponenten sind geringer gestreut als die Y-Komponente, woraus sich schließen lässt, dass Bewegungen hauptsächlich in dieser Richtung stattfinden.
- Während sichtlich kein Zusammenhang zwischen den Mittelwerten der einzelnen Komponenten besteht, scheint bei der Standardabweichung ein klarer Zusammenhang zu bestehen.

Beide Erkenntnisse unterstützen die These, dass die „zufälligen Messfehler“ auch aufgrund von Turbulenz auftreten, da die ADCP-geräteinterne Standardabweichung als konstant angesehen werden kann, und so eventuelle größere Standardabweichungen nur aus der Turbulenz entstehen können.

## 4.3 Durchflüsse

### 4.3.1 Ermittlung

Zur Plausibilitätsprüfung der Daten wurde auch der Durchfluss aus den ADCP-Daten ermittelt.



**Abbildung 4.12:** Korrelationen für die Medianwerte  $\mu_i (m_i)$  und Standardabweichungen  $\sigma_i (s_i)$  der Durchflüsse der Profile in globalen Koordinaten

Dabei wurde das Geschwindigkeitsvektorenfeld für jede Komponente über die Fläche integriert:

$$Q_i = \iint V_i \, du \, dw \quad (4.1)$$

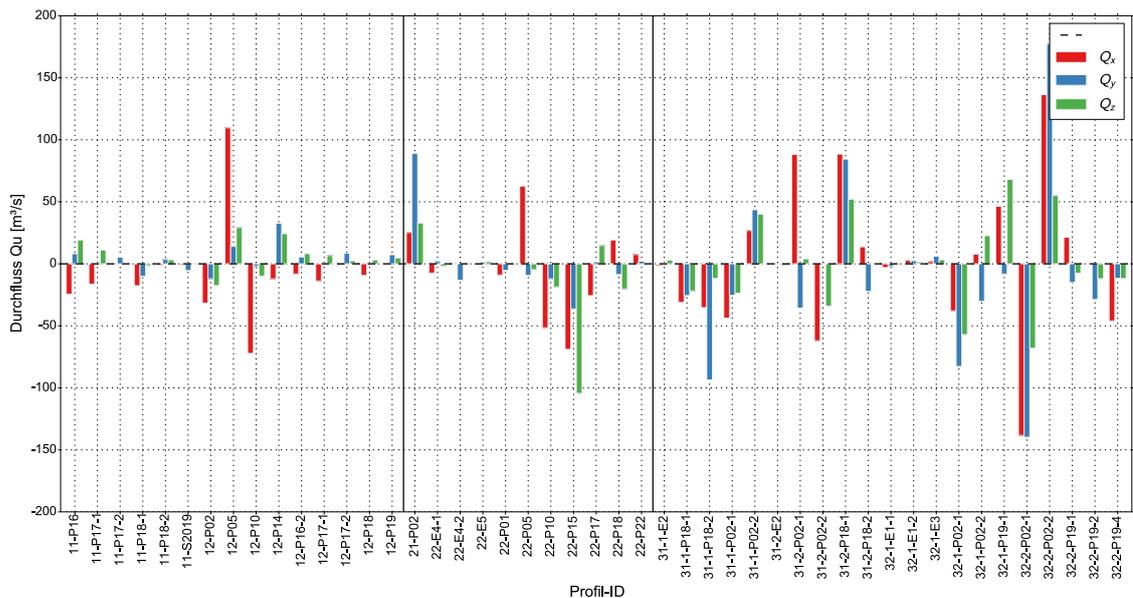
Die numerische Integration folgte über die Trapez-Regel, welche in Python bzw. NumPy bereits integriert ist. Dabei ist anzumerken, dass

1. die unmessbaren Bereiche nahe der Sohle und dem Wasserspiegel nicht enthalten sind, und
2. durch die numerische Integration die am Rande liegenden Zellen nur mit ihrem halben Flächenanteil berücksichtigt werden konnten.

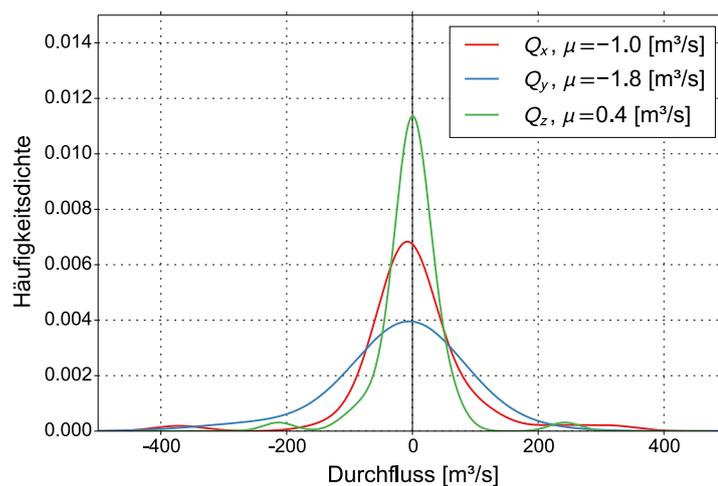
Beide Punkte führen dazu, dass der tatsächliche Durchfluss unterschätzt wird, während letzterer dabei nur einen geringen Anteil daran trägt.

### 4.3.2 Auswertung

Grundsätzlich wäre zu erwarten, dass die Durchflüsse in lokaler U-Richtung mit der Entfernung von der Staumauer tendenziell abnehmen, und dass die Durchflüsse in Querrichtung (v, w) gleich Null sind. Wie in Abbildung 4.13 erkennbar weichen die Messergebnisse jedoch teilweise stark von dieser Erwartung ab.



**Abbildung 4.13:** Gemessener Durchfluss für jedes Profil in den einzelnen Komponenten ( $Q_X$ ,  $Q_Y$ ,  $Q_Z$ )



**Abbildung 4.14:** Die Verteilung der profilweisen Durchflüsse zeigt eine vergleichsweise hohe Streuung der Werte in Y-Richtung, deren Median-Wert ebenfalls den Erwartungen entspricht, und daher vertraut werden kann.

Als mögliche Gründe sind der durch das Messprinzip bedingte nicht vollständig erfasste Profilquerschnitt oder nicht entfernte Ausreißer in den Messdaten zu nennen, welche auch gut in den tiefengemittelten Geschwindigkeiten, zu finden in der profilweisen Auswertung in Abschnitt A.2, erkennbar sind.

Im Mittel zeigen die Durchflüsse jedoch keinen Trend in eine bestimmte Richtung, was dafür spricht, dass es sich um ein Scattering handelt und es sich somit bei den Ausreißern tatsächlich um solche handelt. (Vgl. Abbildung 4.14)

# 5 Auswertung der Schwebstoffkonzentrationen

## 5.1 Auswertung LISST und Temperaturprofile

### 5.1.1 LISST-Daten

Die Daten der LISST-Messungen können für eine Analyse nicht verwendet werden.

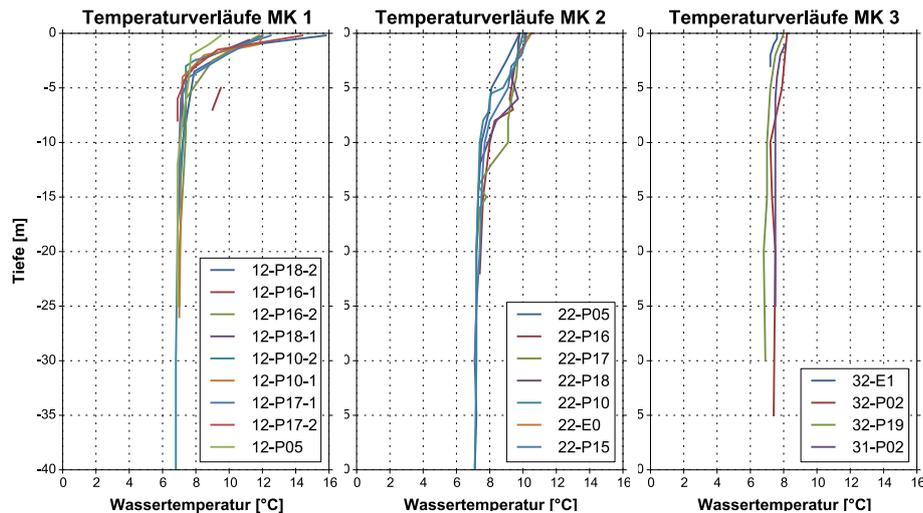
Grund dafür sind, dass die jeweils 30 Sekunden dauernden Messungen Konzentrationschankungen ergeben, die physikalisch nicht erklärbar sind.

Als mögliche Ursachen dafür nannte Stefan Haun<sup>1</sup>, welcher die Messungen mit dem LISST-SL durchführte, folgende Möglichkeiten:

1. Die von den Direktproben erhaltenen Konzentrationen liegen nur knapp über jenen der vom Gerät messbaren. Für den Fall, dass die Konzentrationen unterhalb des Grenzwertes von 10 mg/l liegen sind gemäß Herstellerangaben (*LISST-SL Operating Manual* 2011) bestimmte Faktoren zu berücksichtigen, welche aber keine Auffälligkeiten ergaben.
2. Ein aus dem Jahr 1990 stammendes Gutachten bescheinigt dem Speicher Margaritze einen hohen Anteil an Glimmer und es ist davon auszugehen, dass dies im Speicher Wasserfallboden ebenso der Fall ist. Das LISST-SL kann Schichtsilikate wie Glimmer um einen Faktor von 8,22 überschätzen, wie Untersuchungen von (Felix u. a., 2013) zeigen.
3. Die Ergebnisse des LISST-SL sind stark von der Wassertemperatur abhängig, weshalb unter anderem vor jeder Messung mit aufgesetztem Filter ein

---

<sup>1</sup>Department of Hydraulic and Environmental Engineering, Norwegian University of Science and Technology



**Abbildung 5.1:** Gemessene Temperaturverläufe

sog. „Background File“ erstellt werden muss, das den Zustand ohne messbare Partikel dokumentiert.

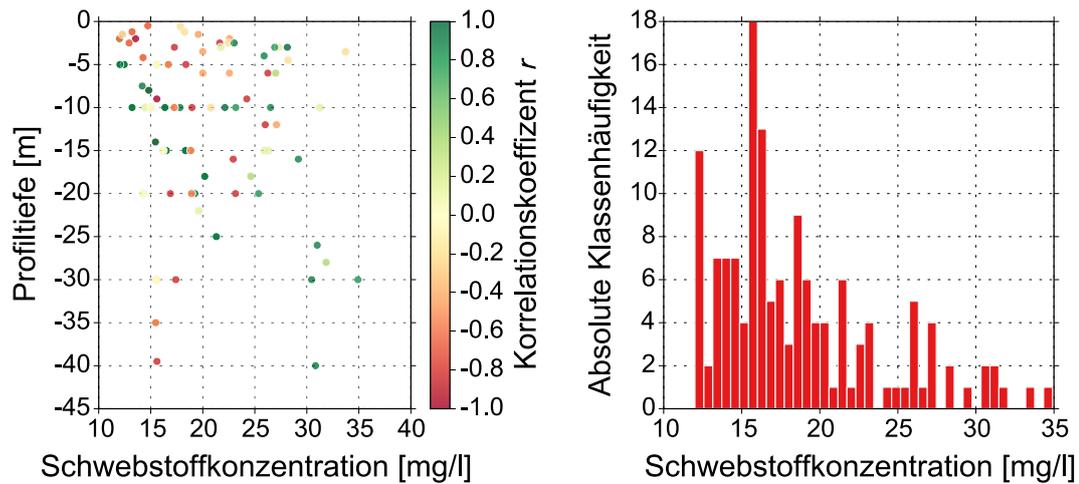
Die relativ niedrigen Temperaturen von ca.  $7^{\circ}\text{C}$  in 2 m Tiefe führen zu einer entsprechend längeren Akklimatisierungsphase bis das Gerät eingesetzt werden kann. Generell wurden bis dato noch keine Messergebnisse dieses Geräts publiziert, in denen die Wassertemperatur unter  $10^{\circ}\text{C}$ , obwohl das LISST-SL laut Herstellerangaben grundsätzlich bis  $0^{\circ}\text{C}$  betrieben werden kann.

4. Das LISST-SL wurde für den Einsatz in Fließgewässern konzipiert.

Aus diesen Gründen wurden die Messdaten des LISST-SL nicht für die weitere Auswertung herangezogen.

### 5.1.2 Temperaturprofile

Die Temperaturprofile, welche an den selben Stellen wie die Schwebstoffproben erfasst wurden zeigen alle einen ähnlichen Verlauf, der nicht von der Position des Profils, sondern vielmehr von vom Tag der Messkampagne abhängt. So erreichen wie Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche beispielsweise in der Messkampagne 1, Tag 1 (08.07.2013) Werte von bis zu  $15^{\circ}\text{C}$ . Nach dieser sonnenbedingten Erwärmung der Wasseroberfläche nähern sich, wie in Abbildung 5.1 ersichtlich, die Temperaturen in allen Messungen asymptotisch einem Wert von  $7^{\circ}\text{C}$  an.



**Abbildung 5.2:** Schwebstoffkonzentrationen in Abhängigkeit der Tiefe (links), Häufigkeitsverteilung (rechts)

## 5.2 Auswertung Schwebstoffproben

Die Ergebnisse der im Labor ausgewerteten Schwebstoffproben sind in Tabelle A.3 ersichtlich. Die gemessenen Konzentrationen befinden sich im Bereich zwischen 12 und 35 mg/l und betragen im Mittel 20,6 mg/l

Da diese Konzentrationen relativ gering sind und sich innerhalb eines Messprofils in der Größenordnung auch kaum voneinander unterscheiden, wurde eine Größtfehlerabschätzung durchgeführt um die Aussagekraft der Laborergebnisse abschätzen zu können.

Wendet man die Größtfehlerabschätzung

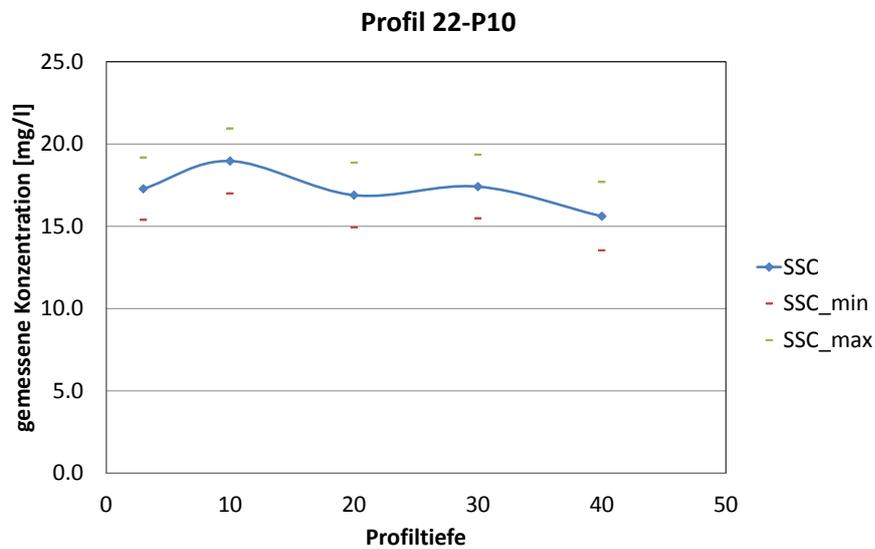
$$\Delta Y = \sum_i^n \left| \frac{\partial Y}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad \text{mit} \quad Y = Y \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad (5.1)$$

auf die Formel zur Bestimmung der Schwebstoffkonzentrationen (Formel 3.1) an, so lässt sich mit

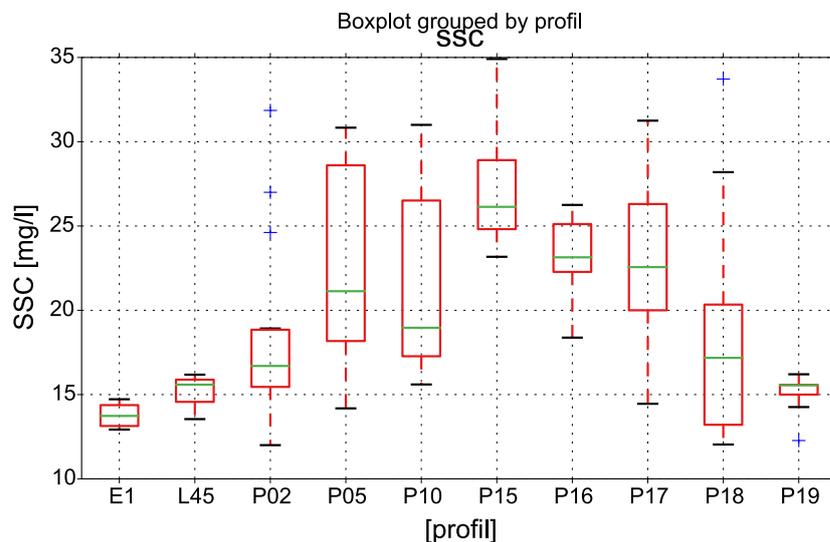
$$\Delta SSC = \frac{2}{V} \Delta m + \frac{m}{V^2} \Delta V \quad (5.2)$$

der größtmögliche Fehler mit  $\Delta m = 1 \text{ mg}$ ,  $\Delta V = 5 \text{ ml}$  bei der Auswertung ermitteln.

Wie Abbildung 5.3 zeigt, ist die Schwankung der Schwebstoffkonzentrationen geringer als der Größtfehler  $\Delta SSC$ . Trends im Verlauf der Schwebstoffkonzentration lassen sich daher nur schwer abschätzen.



**Abbildung 5.3:** Schwebstoffkonzentrationen für 22-P10. Die Größtfehler liegen etwa im Schwankungsbereich der einzelnen Proben.



**Abbildung 5.4:** Der Boxplot zeigt die mittlere Schwebstoffkonzentrationen je Profil. Dabei wurden die Daten aus allen Messkampagnen zusammengefasst. Auf dem ersten Blick ist die Konzentration in der Südhälfte höher.

## 5.3 Auswertungen Backscatter

### 5.3.1 Allgemeines

Zur Auswertung wurden die gleichen Messprofile, wie sie bereits zur Auswertung der Fließgeschwindigkeiten verwendet wurden, herangezogen.

Es wurden die von der Software WinRiver ausgegebenen Echo-Intensitäten mittels Formel 2.6 (Dinehart u. a., 2005) in Backscatter-Werte umgerechnet.

Die profilweisen Ergebnisse sind im Anhang A.2 und A.4 zu finden.

### 5.3.2 Diskussion der Ergebnisse

Im Allgemeinen lassen sich die erhaltenen Backscatter-Profile anhand ihres Backscatter-Gradienten in folgende Situationen klassifizieren:

**Normale Verteilung:** Die Backscatter-Werte nehmen mit der Wassertiefe annähernd linear zu, woraus sich auf eine klassische Rouse-Schwebstoffverteilung schließen lässt.

**„Inverse“ Verteilung:** In diesem Fall nehmen die Backscatter-Werte mit der Tiefe ab, was bei einer konstanten Kornverteilung der Schwebstoffe eine umgekehrte Rouse-Schwebstoffverteilung bedeuten würde.

**„Sandwich“-Verteilung:** Hier befinden sich die minimalen Backscatter-Werte etwa in 10 m unter dem Wasserspiegel. Diese Situation kann als eine Kombination oder eine Übergangsform der beiden oberen Formen betrachtet werden.

**Konstante Verteilung:** Hier bleiben die Backscatter-Werte über die Tiefe konstant.

**Schichtung:** Diese Situation bezeichnet einen sprunghaften Anstieg der Backscatter-Werte, wobei der Sprung vornehmlich in Kombination mit konstanter und normaler Verteilung angetroffen wurde.

Profil / MK	P2	P5	P10	P14	P15	P16	P17	P18	P19	P22
MK11						S	I	I	I	
MK12	N, T	N, S	N	N		S	I,S	I	K	
MK21	S, T									
MK22		N, S	N, S		S		S	S		I
MK31	N, T							G		
MK32	N, T								G,N	

N ... normalverteilt, S ... Sandwich, T ... Turbulenz, I ... Invers, G ... Geschichtet, K ... Konstant

**Tabelle 5.1:** Klassifizierung der gemessenen Querprofile nach Backscatter-Verlauf für jede Messkampagne

**Wolken:** In diesem Fall sind wolkenartige Bereiche von höheren Backscatter-Werten mit einer normalen oder einer „Sandwich“-Verteilung erkennbar, welche auch – wo gemessen – rasch ihre Lage änderten.

Einige dieser Verläufe sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Eine Übersicht, der Backscatter-Verläufe in jedem gemessenen Profil ist in Tabelle 5.1 zu finden.

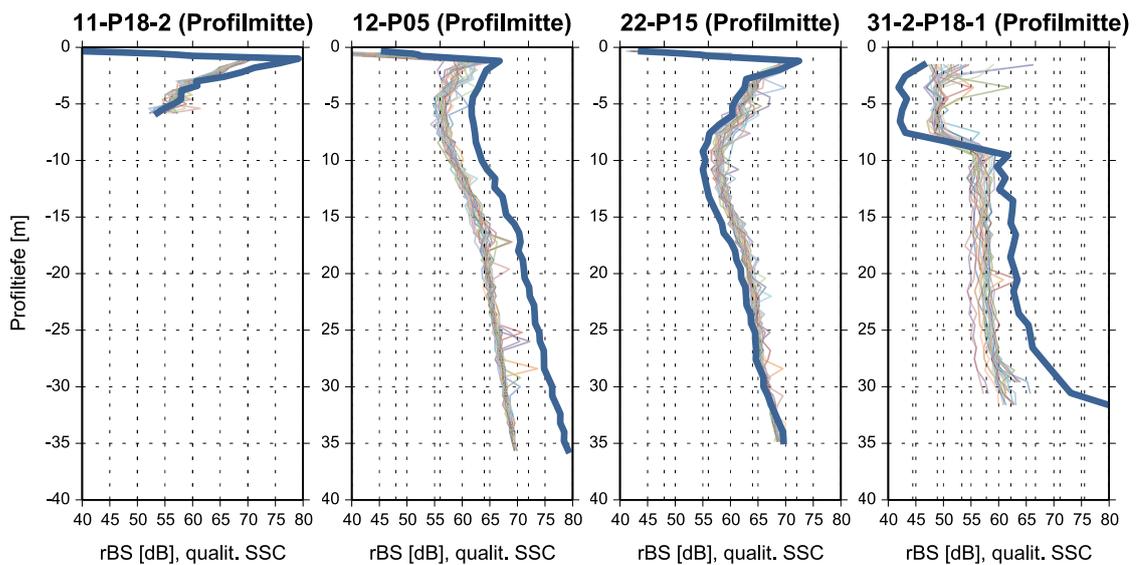
## Bereiche

**Bereich Staumauer – P2** Das Bild ist passend zu jener der Geschwindigkeitsverteilung. Generell, nach unten hin zunehmende Backscatter-Werte. Dazu kommen einige, sich zwischen den Messungen (Abstand etwa 15 min) bewegende Wolken. Durchgehend waren am West-Ufer oberflächennahe höhere Konzentrationen zu beobachten, welche auch teilweise mit dem freien Auge beobachtet werden konnten.

**Mittelbereich** Hier ergaben die allermeisten Messungen eine nach unten linear ansteigende Konzentration mit einer zusätzlichen oberflächennahen Konzentration, sodass die minimale Schwebstoffkonzentration in etwa bei  $10\text{ m} \pm 2,5\text{ m}$  Tiefe anzutreffen war.

**Bereich Insel und Westbucht – P17 bis P19** In der ersten Messkampagne wurde hier eine Umkehrung des Gradienten beobachtet. In MK22 ist dies nur noch in Profil 20 gemessen worden. In den Profilen P17, P18 war an diesem Tag bereits wieder die im Mittelbereich vorherrschende „Sandwich“-Situation anzutreffen.

In der dritten Messkampagne wurde in den Profilen P18 und P19 ein sprunghafter Anstieg der Backscatter-Werte über die Tiefe festgestellt.



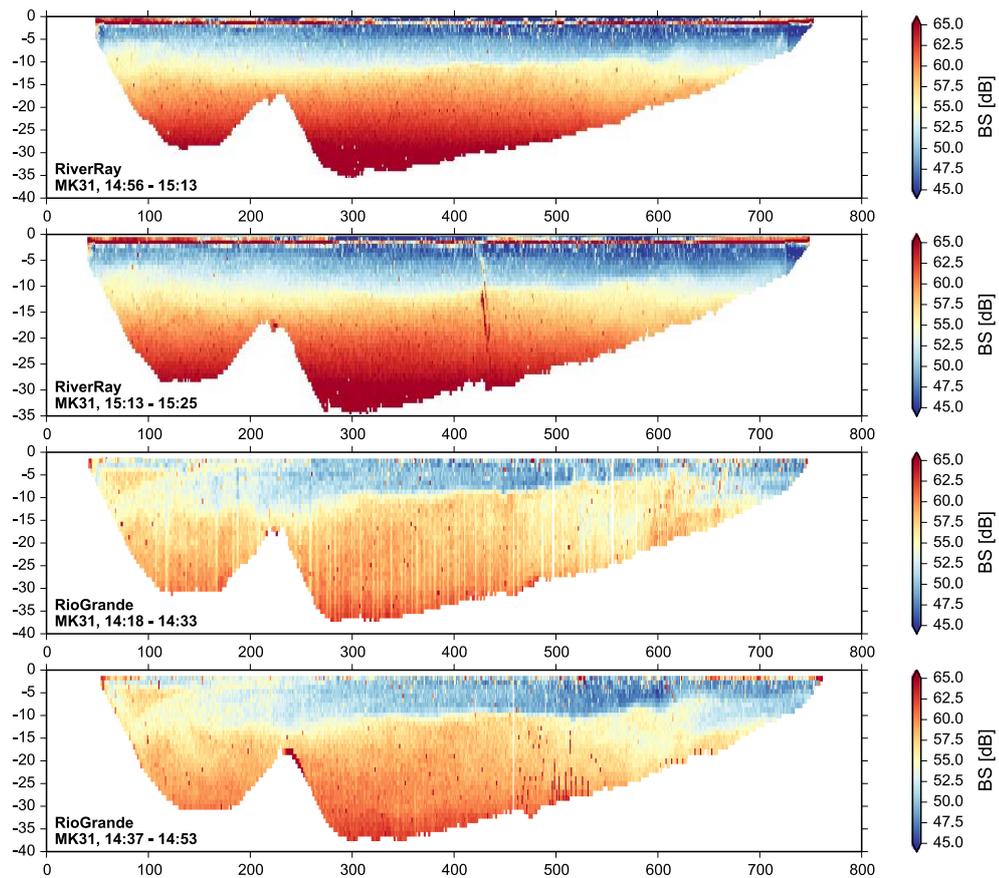
**Abbildung 5.5:** Charakteristische Backscatter-Verläufe jeweils von 11 Ensembles um die Profilmitteln. Die dünnen Linien stellen Backscatter-Verläufe in Profilmitteln dar, aus deren Mittelwert der *qualitative* Verlauf der Schwebstoffkonzentration, dargestellt in dunkelblau, (mit Geradensteigung  $A = 0$ ,  $B = 0.02$  nach Formel 2.14) berechnet wurde.

**Einmündung Margaritze-Überleitung – E1 bis E4** In keinen der gemessenen Profile konnten auf die Sediment-Überleitung zurückzuführende erhöhte Backscatter-Werte festgestellt werden.

### 5.3.3 Vergleich ADCP-Geräte

Wie in Abbildungen 5.6 und 5.7 vergleichen die Backscatter-Werte, welche von den ADCP-Geräten RiverRay und RioGrande jeweils vom gleichen Messprofil aufgezeichnet wurden. Die Messprofile wurden von jedem Gerät jeweils doppelt aufgezeichnet, um beurteilen zu können, ob Änderungen zwischen den Messprofilen auf gerätespezifische Unterschiede zurückzuführen sind.

**Profil 18, MK31** Allgemein zeigt das RioGrande den Anstieg der Backscatter-Werte in der Wassertiefe von 10 m bis 15 m wesentlich abrupter. Viel „verschwommener“ sind beim RiverRay ADCP auch die Wolken bei Station 100 und Station 600, welche dort nur erahnt werden können. Das RiverRay gibt zudem knapp unter der Wasseroberfläche Backscatter-Werte an, welche wesentlich höher als die umgebenden Werte sind. Diese Phänomene tritt bei beiden Messungen und



**Abbildung 5.6:** Vergleich RioGrande und RiverRay in Profil P18, MK31

in allen Zellen der gleichen Wassertiefe auf. Hingegen konnte das RioGrande in einem Messprofil fünf, im anderen ein Ensemble nicht aufzeichnen.

In der zweiten Messung mit dem RiverRay ist zudem bei Station 450 ein Streifen mit erhöhten Werten zu erkennen. An dieser Stelle wurde zwischen den beiden Messungen eine verworfene Flaschenprobe entleert.

**Profil 2, MK3** Ähnlich zum oben besprochenen Profil 18 bildet auch hier das RiverRay wie Wolken mit lokal erhöhten Backscatter-Werten kaum ab. Die Wolken, welche das RioGrande bei Station 100 und 250 bis 300 zeigt, können bei den Daten des RiverRay nur zu erahnt werden.

Weiters zeichnet das RiverRay Backscatter-Daten nur für jene Zellen auf, in denen es auch erfolgreich Fließgeschwindigkeiten messen konnte, während das RioGrande Gerät die Backscatter-Werte bis zur systembedingten Tiefengrenze<sup>2</sup> aufzeichnet. Auffällig sind die nicht aufgezeichneten Ensembles des RiverRay am Tag 2.

<sup>2</sup>vgl. *Side-Lobes Effekt* in Abschnitt 3.1.2

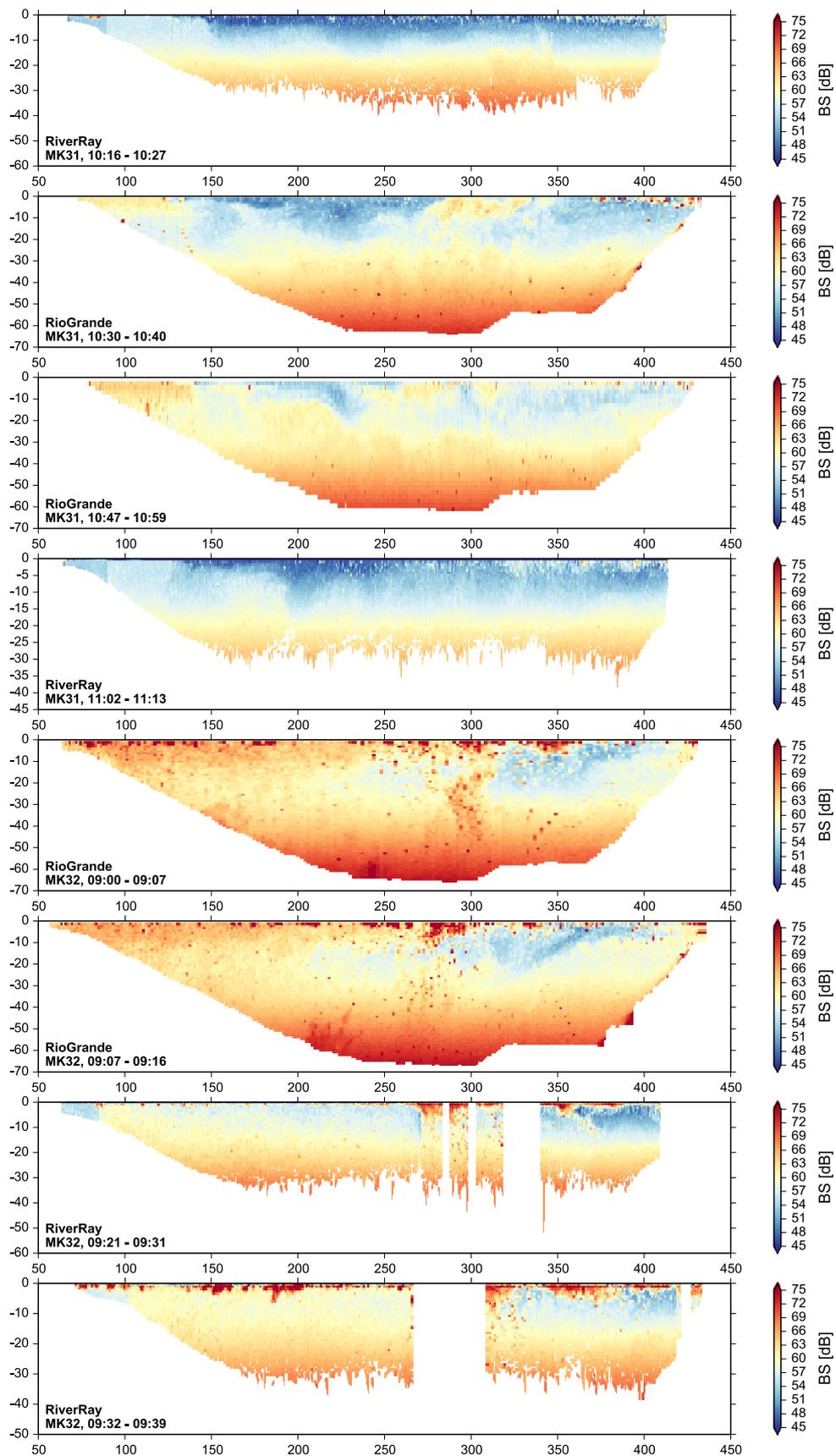


Abbildung 5.7: Vergleich RioGrande und RiverRay in Profil P2, MK3

## 5.4 Korrelation und Kalibrierung

Wie bereits in Kap. 2.2 beschrieben, ist für die Ermittlung der Schwebstoffkonzentration aus den Backscatter-Daten eine Korrelation über Schwebstoffproben unumgänglich. Hierbei muss allerdings auch vorausgesetzt werden, dass die Korrelation nur – besonders hinsichtlich der Kornverteilung – über ähnliche Schwebstoffe aufgestellt werden kann. Eine ausreichend konstante Wassertemperatur ist ebenso notwendig. In der Literatur wird daher häufig die Kalibration nur Profilweise vorgenommen – was auch oft daran liegt, dass nur ein Messquerschnitt an dieser Stelle vorhanden ist. (Haimann, 2007)

Da sich im vorliegenden Projekt die Möglichkeit dazu bot, wurde untersucht, inwieweit Schwebstoffproben räumlich oder zeitlich zusammengefasst werden können, um durch eine höhere Stichprobenanzahl ein höheres Vertrauensmaß und dadurch verlässlichere Ergebnisse zu erhalten.

Die Entscheidung, welche Auswahl-Strategie letztendlich zum Zug kommen sollte, wurde an die Güte der Korrelation, ausgedrückt durch den Korrelationskoeffizienten  $R^2$ , gebunden werden. Beim Vergleich mehrerer Korrelationskoeffizienten wurde deren Medianwert zur Beurteilung herangezogen.

### 5.4.1 Unterteilungsstrategien

Zuerst wurde untersucht, inwiefern sich Schwebstoffproben verschiedener Profile zusammenfassen lassen, um durch eine höhere Stichprobenanzahl die Qualität der Anpassung zu steigern. Wie aus Abb. 5.8 erkennbar, kann keine gesamtgültige Beziehung aufgestellt werden. Es wurden daher noch folgende Unterteilungs- bzw. Zusammenfassungsstrategien untersucht:

1. Chronologische Unterteilung: Gliederung nach Messtagen und -kampagnen.
2. Räumliche Unterteilung: Gliederung nach Profilen und Bereichen (nördlicher, mittiger, südlicher Bereich)

Allen Schwebstoffproben wurden ein oder mehrere<sup>3</sup> Echo-Intensitäten<sup>4</sup> zugeordnet, sodass aus diesen Daten ein dazugehöriger Backscatter-Wert errechnet werden konnte. In den folgenden Abbildungen wurden Schwebstoffproben, welche in

<sup>3</sup>Wenn am selben Tag am selben Profil mehrmals mit dem ADCP-Gerät gemessen wurde.

<sup>4</sup>Sowie alle anderen notwendigen Werte

einer geringeren Tiefe als der *near zone distance*  $d_{near-zone}$  genommen wurden, von der Korrelation ausgeschlossen.

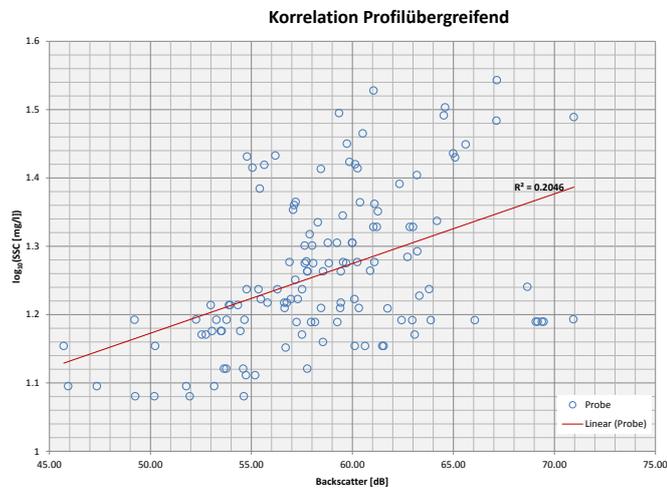


Abbildung 5.8: Korrelation für alle Proben ( $r \geq 2.1m$ ),  $R^2 = 0.20$

### Chronologische Unterteilung

Hier wurde davon ausgegangen, dass sich über einen kürzeren Zeitraum (Dauer einer Messkampagne) im gesamten Speicher etwa gleiche Schwebstoffdurchmesser befanden.

### Räumliche Unterteilung - Zeitliche Zusammenfassung

In diesem Szenario wurde untersucht, ob die Schwebstoffzusammensetzung zumindest profilweise über mehrere Messkampagnen unverändert blieb.

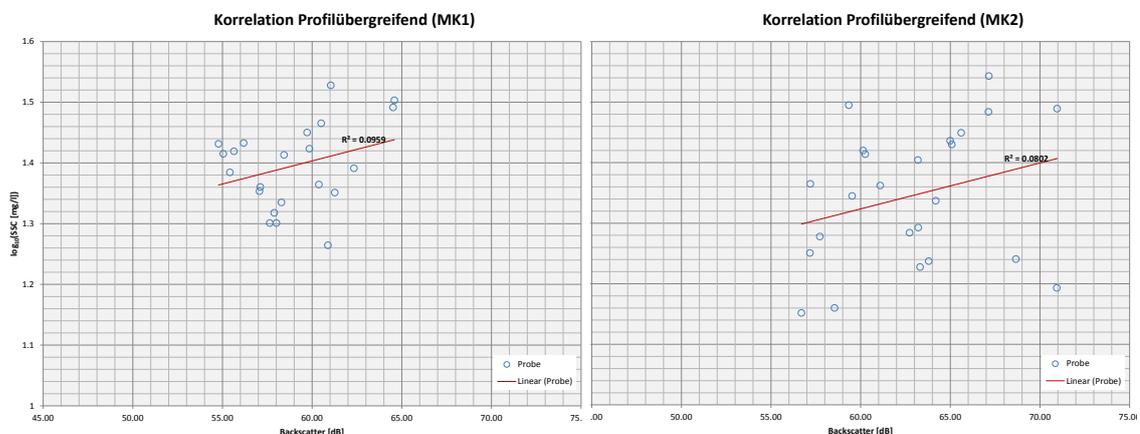
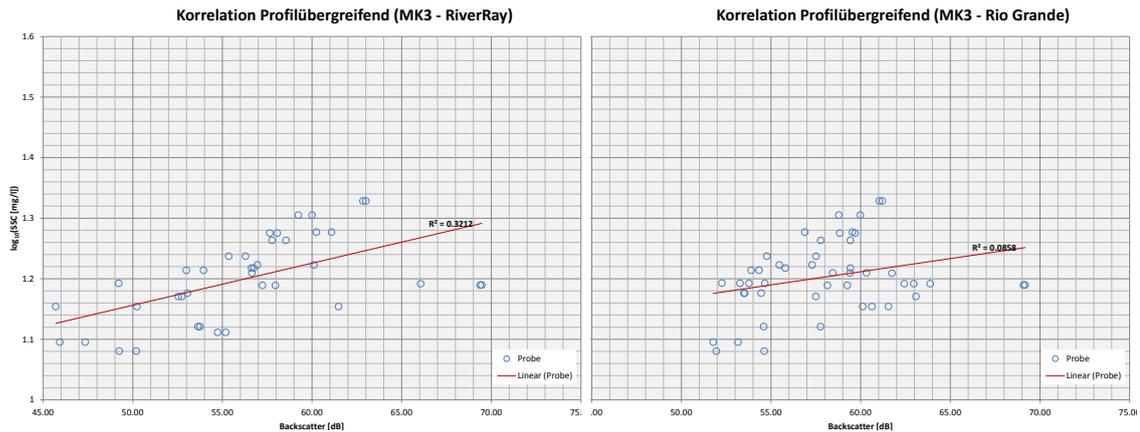


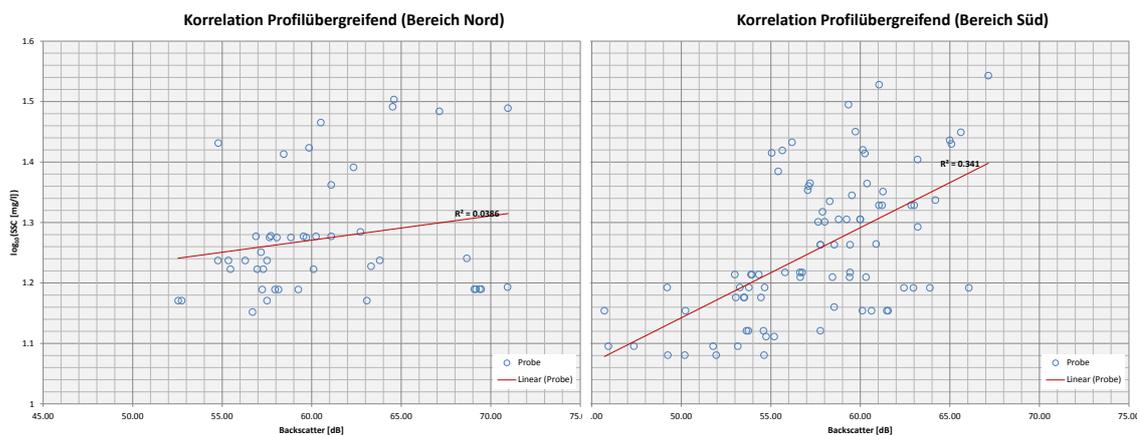
Abbildung 5.9: Korrelation für MK1 ( $R^2 = 0.10$ ) und MK2 ( $R^2 = 0.08$ )



**Abbildung 5.10:** Korrelation für MK3 - RiverRay ( $R^2 = 0.32$ ) und MK3 - RioGrande ( $R^2 = 0.09$ )

## Räumliche Unterteilung

In diesem Fall wurde der Speicher Messkampagnen-übergreifend in einen nördlichen Bereich (Profil 1 bis 10) und einen südlichen unterteilt. Längsprofile wurden dabei nicht berücksichtigt.

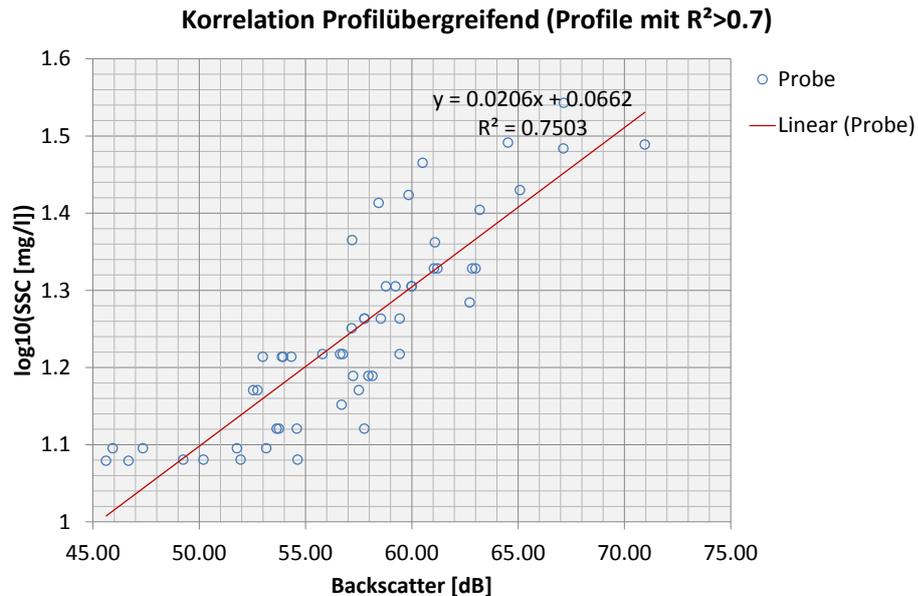


**Abbildung 5.11:** Korrelation für nördlichen ( $R^2 = 0.04$ ) und südlichen Bereich ( $R^2 = 0.34$ )

Aus den Ergebnissen in den Abbildungen 5.9, 5.10 und 5.11 geht hervor, dass es grundsätzlich ohne weiteres nicht möglich ist, Schwebstoffproben aus verschiedenen Profilen zur Kalibrierung heranzuziehen, weshalb darauf verzichtet wurde.

## Nachträgliche Auswahl von Profilen mit guter Korrelation

Nach der Auswertung der Korrelation in Abschnitt 5.4 wurde ein weiterer Versuch gestartet, Profile für die Korrelation zusammen zu fassen. Diesmal wurden alle Profile mit gutem Korrelationskoeffizienten (vgl. Abb. 5.15) und positiver



**Abbildung 5.12:** Korrelation mit Proben aus Profilen mit  $R^2 > 0,7$

Geradensteigung zusammengefasst. Wie die Ergebnisse in Abbildung 5.12 zeigen, dass Schwebstoffproben und Profile an denen eine gute Korrelation aufgestellt werden kann, grundsätzlich geeignet sind, um zusammengefasst zu werden. Dabei ist jedoch darauf zu beachten, dass die in dieser Arbeit verwendeten Backscatter-Werte die schankende Ausgangssignalstärke nicht berücksichtigen, wodurch streng genommen die Backscatter-Werte aus verschiedenen Profilen nicht quantitativ miteinander verglichen werden können.

### 5.4.2 Untersuchung der Sonargleichung

In diesem Kapitel werden verschiedene Einflussgrößen der Sonargleichung und ihre Auswirkungen auf die berechnete Schwebstoffkonzentration untersucht. Im Detail werden folgende Untersuchungen angestellt:

- Vergleich verschiedener Formel-Ansätze der Sonargleichung
- Berücksichtigung des nicht konstanten Temperaturverlaufs und des veränderlichen Wasserdrucks über die Wassertiefe:
  - Sensitivitätsanalysen
  - Untersuchung der Auswirkungen auf das Bestimmtheitsmaß

## Ansätze in der Sonargleichung

Da in der Literatur verschiedene Möglichkeiten beschrieben werden (siehe Kapitel 2.2), auf Basis der Sonargleichung von Urick die vorhandene Schwebstoffkonzentration zu errechnen, und da diese empirischen Formelbeziehungen sich zwar alle sehr ähnlich sind, sich aber im Detail doch unterscheiden, wurden sie durch Anwendung an einem Datensatz miteinander verglichen.

Konkret wurde das Ensemble 950 des Profil 12-P16 herangezogen. Als Referenz wurden die von der Hersteller-Software WinRiver berechneten Backscatter-Werte verwendet.

**Vergleich A** Im ersten Vergleich sollte primär der Unterschied zwischen der Formel nach (Dinehart u. a., 2005) (Formel 2.6) und (RDI, 2013) (Formel 2.7) untersucht werden. Da letztere Formel nur außerhalb der *near zone distance* definiert ist, wurde auch bei Dinehart auf den *near-distance*-Korrekturfaktor  $\psi$  verzichtet. Bei der Formel nach RDI gibt es bei  $L_{Xlim}$  durch variable Zellhöhen einen Interpretationsspielraum, weshalb mit

- konstantem  $L_{Xlim}$  gemäß Angabe in der Messdaten-Datei, und
- variablem  $L_{Xlim}$  aus der tatsächlichen Zellhöhe ( $D_i = r_{i+1} - r_i$ )

gerechnet wurde. Zur Überprüfung der eigenen Implementierung und jener in WinRiver wurden die Ergebnisse mit jenen aus WinRiver verglichen.

Wie das Diagramm in Abbildung 5.13 zeigt, liegt RDI mit variabler Zellhöhe am nächsten beim Referenzwert. Dennoch wurde entschieden, Dinehart für die weiteren Berechnungen zu verwenden, da diese Formel in der Wissenschaft anerkannt ist, und außerdem die Abweichung zu den Referenzwerten konstant ist, was für die Berechnung des relativen Backscatter ausreichend ist.

**Vergleich B** In diesem Vergleich sollten die Auswirkungen von  $\psi$  und des RDI-Terms (jener Teil von Formel 2.7, der in 2.6 hinzugefügt wurde) untersucht werden. Als Basis diente die Formel nach Dinehart.

Die wesentliche Erkenntnis aus diesem Vergleich ist das der Faktor  $\psi$  die Backscatter Werte innerhalb der *near zone distance* deutlich realistischer abbildet, während der RDI-Term keinen nennenswerten Beitrag dazu leistet. Daraus ergab sich, dass für die weiteren Betrachtungen die Formel 2.6 in unveränderter Form herangezogen wurde. (Siehe Abb. 5.14)

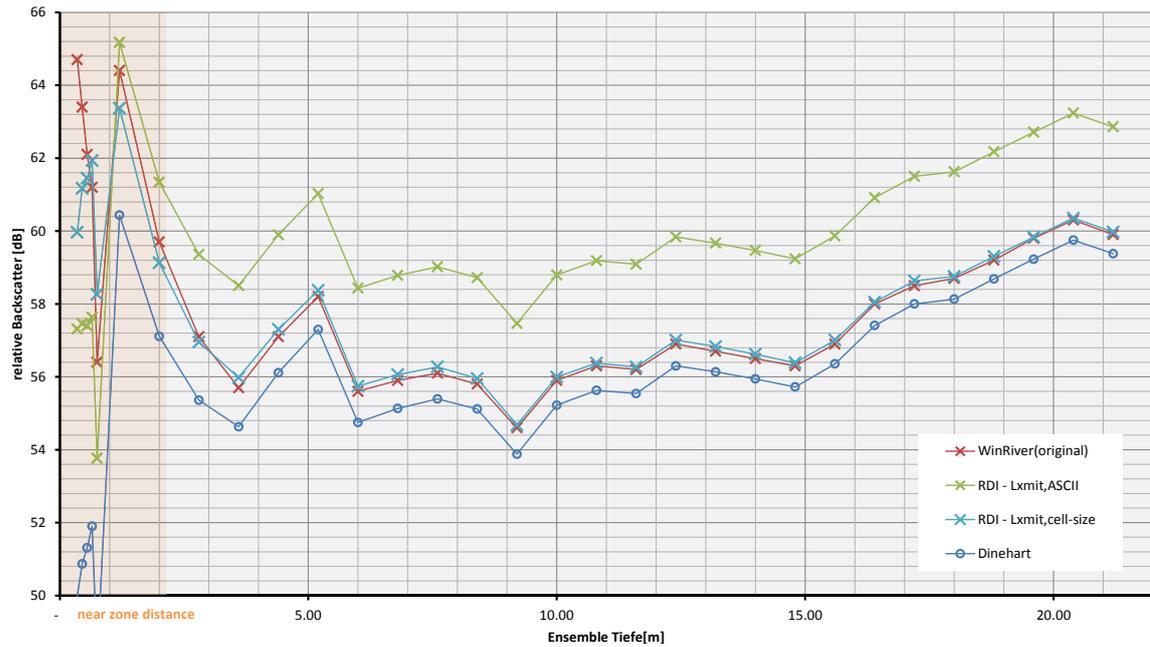


Abbildung 5.13: Vergleich verschiedener Ansätze nach RDI und Dinehart

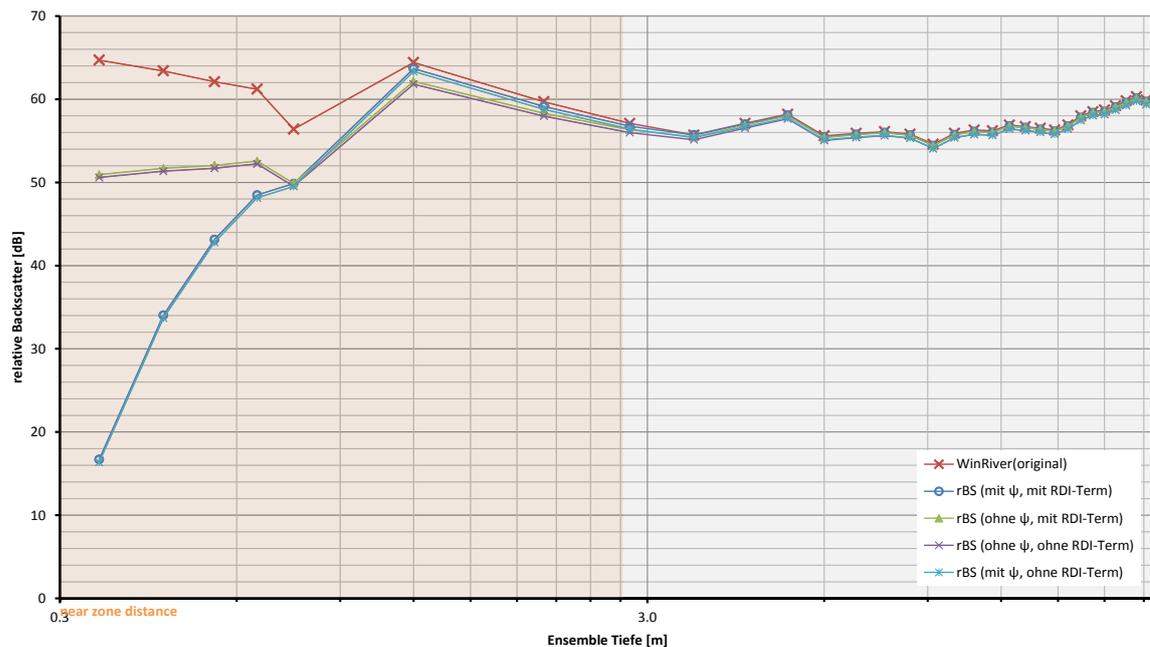


Abbildung 5.14: Vergleich in der *near zone distance*

### Berücksichtigung des tatsächlichen Temperaturverlaufes

In Abb. 5.1 sind die gemessenen Temperaturverläufe zu sehen. Die Wassertemperatur beeinflusst über die *echo intensity scale* direkt die Backscatter Werte (vgl. Formel 2.6). Indirekt hat die Temperatur über die Schallgeschwindigkeit und somit über sämtliche Abstände Einfluss.

Aus diesem Grund wurde an allen Profilen mit Schwebstoff-Direktproben der Korrelationskoeffizient in verschiedenen Varianten bestimmt und gegenübergestellt.

Es wurden folgende Varianten Betrachtet:

0. **Variante 0:** Die „Null-Variante“ beinhaltet keinerlei Modifikationen und stellt somit den Referenzwert dar.
1. **Variante 1:** Entspricht der Variante 0, jedoch wurden hier geglättete Echo-Intensitäten verwendet, um zufällige Messfehler in den Eingangsdaten zu eliminieren.
2. **Variante 2:** Ausgehend von den ungeglätteten Daten und einem „passenden“ Temperaturprofil, wurde für  $T_s$  die Temperatur aus der entsprechenden Tiefe eingesetzt.  $T_{s,i} = T_p(r)$
3. **Variante 3:** Hier wurde die Distanz  $r$  aufgrund der geänderten Schallgeschwindigkeit  $c$  mittels

$$r = r_{ref} \cdot \frac{c}{c_{ref}} \quad (5.3)$$

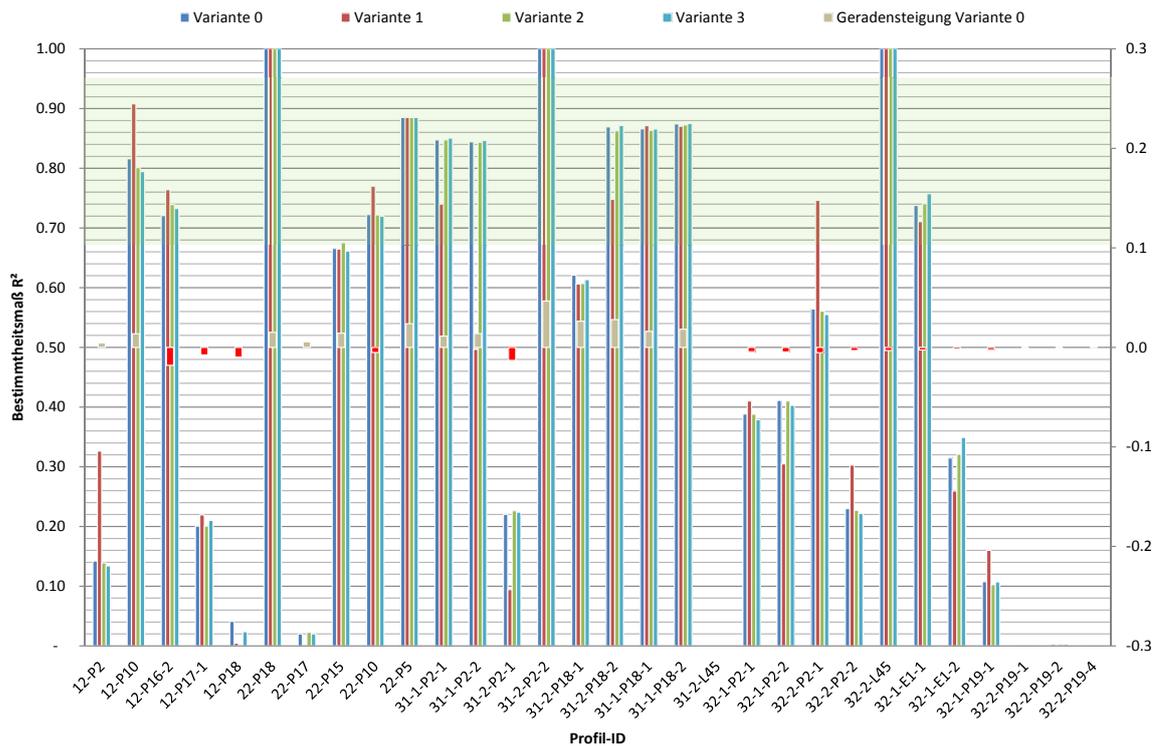
korrigiert. Die Schallgeschwindigkeit wird nach der empirischen Formel aus (RDI, 2006, S. 33) berechnet:

$$c_i = 1449.2 + 4.6T_{s,i} - 0.055 * T_{s,i}^2 + 0.00029T_{s,i}^3 + (1.34 - 0.01 * T_{s,i}) * (0.5 - 35) - 0.016 * r_i \quad (5.4)$$

Wobei hier im Gegensatz zu Variante 2  $T_{s,i}$  die tiefengemittelte Temperatur bis zur Tiefe  $r_i$  ist:

$$T_{s,i} = \frac{\int_0^{r_i} T_s(r) dr}{r_i} \quad (5.5)$$

Die Ergebnisse des Variantenvergleichs sind in Abbildung 5.15 dargestellt. Wie in der genannten Abbildung ersichtlich, haben die Varianten 2 und 3 nur einen minimalen Einfluss auf das Bestimmtheitsmaß  $R^2$ . Um dies zu verifizieren, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, in welcher der Einfluss der Temperatur  $T_s$  auf die Backscatter-Werte untersucht wurde, welche ebenfalls einen geringen Einfluss bescheinigt.



**Abbildung 5.15:** Übersicht Bestimmtheitsmaße  $R^2$  im Variantenvergleich (inkl. Ausreißer)

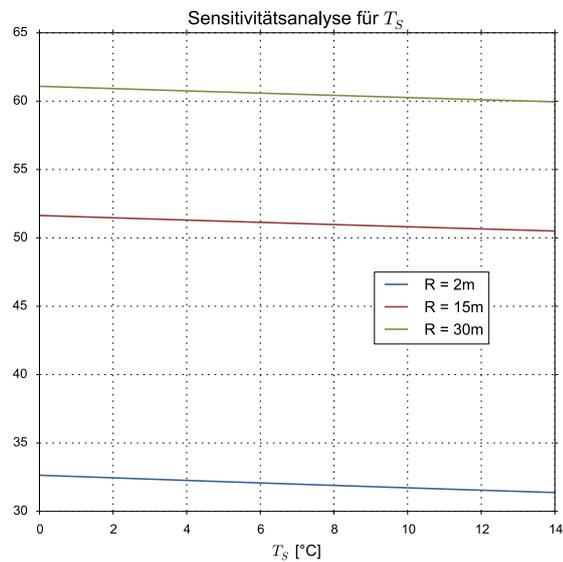
### 5.4.3 Ergebnisse der Korrelation

Bei den Korrelationen herrscht eine hohe Schwankungsbreite beim Bestimmtheitsmaß  $R^2$ , welches auch durch die verschiedenen Varianten nicht wesentlich angehoben werden konnte.

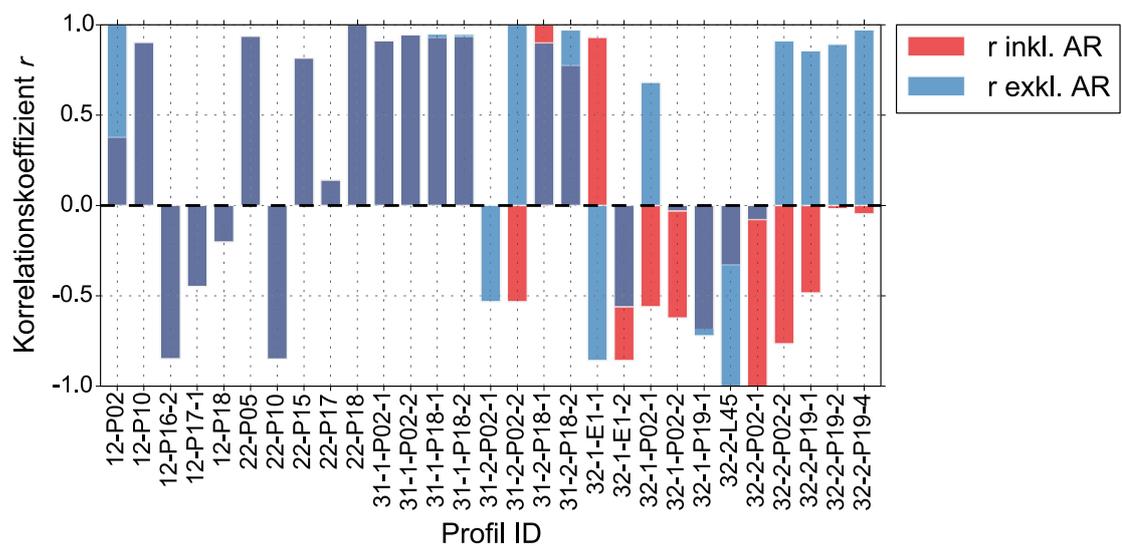
Zunächst konnten keine Gründe gefunden werden, warum bei manchen Profilen scheinbar kein Zusammenhang zwischen Backscatter und Schwebstoffkonzentration bestand. Jedoch ergaben sich nach Entfernung von Ausreißern in den Schwebstoffproben deutlich bessere Bestimmtheitsmaße. Als Ausreißer wurden die Proben 12-P02-1, 31-P18-63, 32-P2-69, 32-P19-80 sowie 32-P19-81 deklariert, da diese Schwebstoffkonzentrationen auswiesen, die an deren Entnahmestelle unpassend erschienen. Dass diese Annahme gerechtfertigt scheint, belegen die höheren Bestimmtheitsmaße in den betreffenden Profilen.

Wie die Ergebnisse in Abbildung 5.17 zeigen, verbleiben trotz Entfernung von Ausreißern noch Profile mit vergleichsweise niedrigem Bestimmtheitsmaß  $R^2$ . Für diese Profile kann es zwei Erklärungen geben:

1. In Profil 2 wurden sich zwischen den ADCP-Aufnahmen bewegende Backscatter-Wolken festgestellt, welche sich im Falle der „schlechten“ Profile am



**Abbildung 5.16:** Auswirkungen der Temperatur  $T_S$  auf die Backscatter-Werte in verschiedenen Tiefen  $R$



**Abbildung 5.17:** Gegenüberstellung Korrelationskoeffizient  $r$  mit und ohne Ausreißer (AR) in Schwebstoffproben

Entnahmeort der Proben befanden. Da die Korrelation bei anderen ADCP-Profilen mit den gleichen Proben sehr gute Ergebnisse lieferte, ist davon auszugehen, dass die Wolken die Ursache für den scheinbar schlechten Zusammenhang sind.

2. In allen weiteren Profilen mit schwacher Korrelation ist eine atypische Backscatter-Verteilung gemessen worden. Daraus ließe sich schließen, dass diese Verteilungen auf eine andere Ursache als geänderte Schwebstoffkonzentrationen zurückzuführen sind.

# 6 Schlussfolgerungen

## 6.1 Fließgeschwindigkeiten im Speicher

Das Strömungsverhalten für den ursprünglich vorgesehenen, maßgebenden Lastfall konnte nicht bestimmt werden, da dieser in den drei Messkampagnen nicht eingetreten ist.

Zusätzlich wurde die Auswertung durch Ausreißer, welche durch Fehler im „Bottom-Tracking“ des verwendeten RiverRay verursacht wurden, erschwert. Durch diese sind keine verlässlichen quantitativen Aussagen zum Durchfluss möglich. Es konnte aber die Grundannahme, dass sich beim Lastfall „Pumpbetrieb Oberstufe, Limberg II, Hauptstufe“ die eingeleiteten Wassermengen von den Auslässen nach der Limberg-Sperre Richtung Süden verteilen, bestätigt werden. Außerdem wurde in den gemessenen Längsprofilen der Trend festgestellt, dass im südlichen Bereich der Speichers die Strömung tendenziell Richtung Süden verläuft, während es im nördlichen Teil sich genau umgekehrt verhält.

## 6.2 Schwebstoffe und Backscatter

Die Konzentration der sich im Speicher befindlichen Schwebstoffe konnte durch Entnahme der Flaschenproben als gering eingestuft werden. Die höchste gemessene Konzentration betrug 35 mg/l. Da die Schwankungsbreite an gemessenen Konzentrationen sich auf jenem Niveau der möglichen Messfehler befindet, ließen sich aus den genommen Direktproben auch keine Trends oder ähnliches ableiten.

Bei den Backscatter-Werten ergaben sich neben Mustern, die eine mit der Wassertiefe ansteigende Schwebstoffkonzentration bedeuten, auch Situationen nach denen sich die geringsten Konzentrationen in etwa 10 m Tiefe befanden.

Die aufgestellte Korrelation zwischen Backscatter-Werten und den Schwebstoffproben ist in Profilen mit linear ansteigenden Backscatter-Werten in der Regel sehr gut und lässt eine Extrapolation der Schwebstoffkonzentrationen in die nicht-messbaren Bereiche zu. In Profilen, wo die Korrelation schwach ausfiel war ein unüblicher Verlauf der Backscatter-Werte festzustellen.

Mit den Ergebnissen des LISST-SL, hätte diese Unsicherheit beseitigt werden können. Jedoch konnten diese, wie in Abschnitt 5.1 ausgeführt, nicht dafür herangezogen werden.

## 6.3 Empfehlungen für künftige Messungen

Um bei erneuten Messungen im Speicher Wasserfallboden eindeutiger Ergebnisse zu erhalten, werden aufgrund der Erfahrungen aus den letzten Messungen folgende Änderungen im Messprogramm vorgeschlagen:

- Messungen bei maßgebenden Lastfall und niedrigem Stauspiegel: Durch den geringen Stauspiegel und Pumpbetrieb der Anlagen Oberstufe und Limberg II und Turbinierung Hauptstufe, kann sich der gewünschte „Durchzugseffekt“ am besten einstellen.
- Messung mit RDI Rio Grande (600 kHz): Wie die Vergleichsuntersuchungen zeigten, bildet dieses Gerät Backscatter-Gradienten wesentlich detaillierter ab. Es kann Backscatter-Werte bis zur systembedingten Tiefengrenze messen und reagiert außerdem weniger anfällig auf steile Gebirgsflanken, welche letztendlich für die Ausreißer der gemessenen Fließgeschwindigkeiten verantwortlich sein dürften.

Zusätzlich sind können noch folgende, optionale, Erweiterungen ins Messprogramm aufgenommen werden:

- LISST-Gerät für ruhende Gewässer: Auch wenn ein derartiges Gerät momentan schwer für Messungen zu bekommen ist, stellt es die einzige Möglichkeit dar, bei so geringen Konzentrationen wie im Speicher Wasserfallboden Kornverteilungen messen zu können.
- Windmesser auf Messboot: Damit können windinduzierte Strömungen an der Wasseroberfläche besser beurteilt werden.

- Vergleichsmessungen mit zwei ADCPs mit unterschiedlichen Frequenzen: Als Alternative zu einem LISST-Gerät könnten mit dieser Konfiguration nach (Guerrero, Szupiany u. a., 2011) und (Guerrero, Rüter u. a., 2014) Veränderungen des mittleren Korndurchmesser festgestellt werden.
- Bottom-Mounted ADCP: Damit ließen sich punktuelle Zeitreihen über Fließgeschwindigkeiten und Backscatter-Werte erhalten. Neben dem Vorteil, dass hier die Geschwindigkeiten nicht durch ein fehlerbehaftetes Bottom-Tracking beeinflusst werden, kann vor allem auch die zeitliche Variabilität bestimmt werden.
- Messung des Versatzes vom GPS-Empfänger auf dem Messboot zum ADCP-Sensor: Durch diese Information ist die Möglichkeit offen gehalten, später eventuelle Fehler in der über das Bottom-Tracking errechneten Boots-Geschwindigkeit zu erkennen und auszugleichen. Im Idealfall könnte man sogar GPS- und ADCP-Sensor vertikal übereinander montieren, um auf das Bottom-Tracking gänzlich verzichten zu können.

# 7 Zusammenfassung

In dieser Arbeit erfolgte die Auswertung von hydrodynamischen und sedimentologischen Messungen im Hochgebirgsspeicher Wasserfallboden.

Nach Einführung in das Projektgebiet und der verwendeten Mess- und Auswertungsmethoden erfolgte eine Erläuterung der Vorgangsweise bei der Auswertung. Den Hauptteil bildete die Auswertung und Interpretation der gewonnenen Daten, die wie folgt nochmals zusammengefasst werden kann:

Aus hydrodynamischer Sicht ist durch Mittellung der Daten eine leichte südwärts gerichtete Strömung erkennbar, welche jedoch betragsmäßig wesentlich geringer als die zufälligen Messfehler bzw. gemessenen Turbulenzen sind. Weiters wurden keine Schichtströmungen beobachtet, was durch die gemessenen Temperaturprofile ebenfalls belegt werden konnte. Lediglich im Bereich der Sperre waren bedingt durch den Kraftwerksbetrieb walzenartige Strömungen beobachtbar.

Sedimentologisch wurden Schwebstoffkonzentrationen von bis zu 35 mg/l gemessen. Eine Korrelation zu den gemessenen Backscatter-Werten war teilweise erfolgreich. Schwache Korrelationen wurden bei Profilen mit ungewöhnlichen Backscatter-Verläufen angetroffen, welche vorwiegend in der südlichen Hälfte des Speichers gemessen wurden.

Abschließend wurden einige Vorschläge ausgearbeitet um bei künftigen Messungen eindeutigere Ergebnisse zu erhalten. Allen voran sind dabei die Verwendung des RioGrande 600 kHz ADCP-Geräts und Messung während des maßgebenden Lastfalls zu nennen.

# A Darstellung Messergebnisse

## A.1 Verwendete Nachbearbeitungsparameter

<i>Ausreißer</i>			
radius_h	22	15	50
radius_v	0	0	0
limit	2.3	2.0	3.0
<i>Glättung</i>			
order	10	31	101

**Tabelle A.1:** Verwendete Parameter für die Nachbearbeitung der ADCP-Daten mit ADCP-tool. Die Bedeutung der Parameter ist in (Steidl, 2013) nachzulesen.

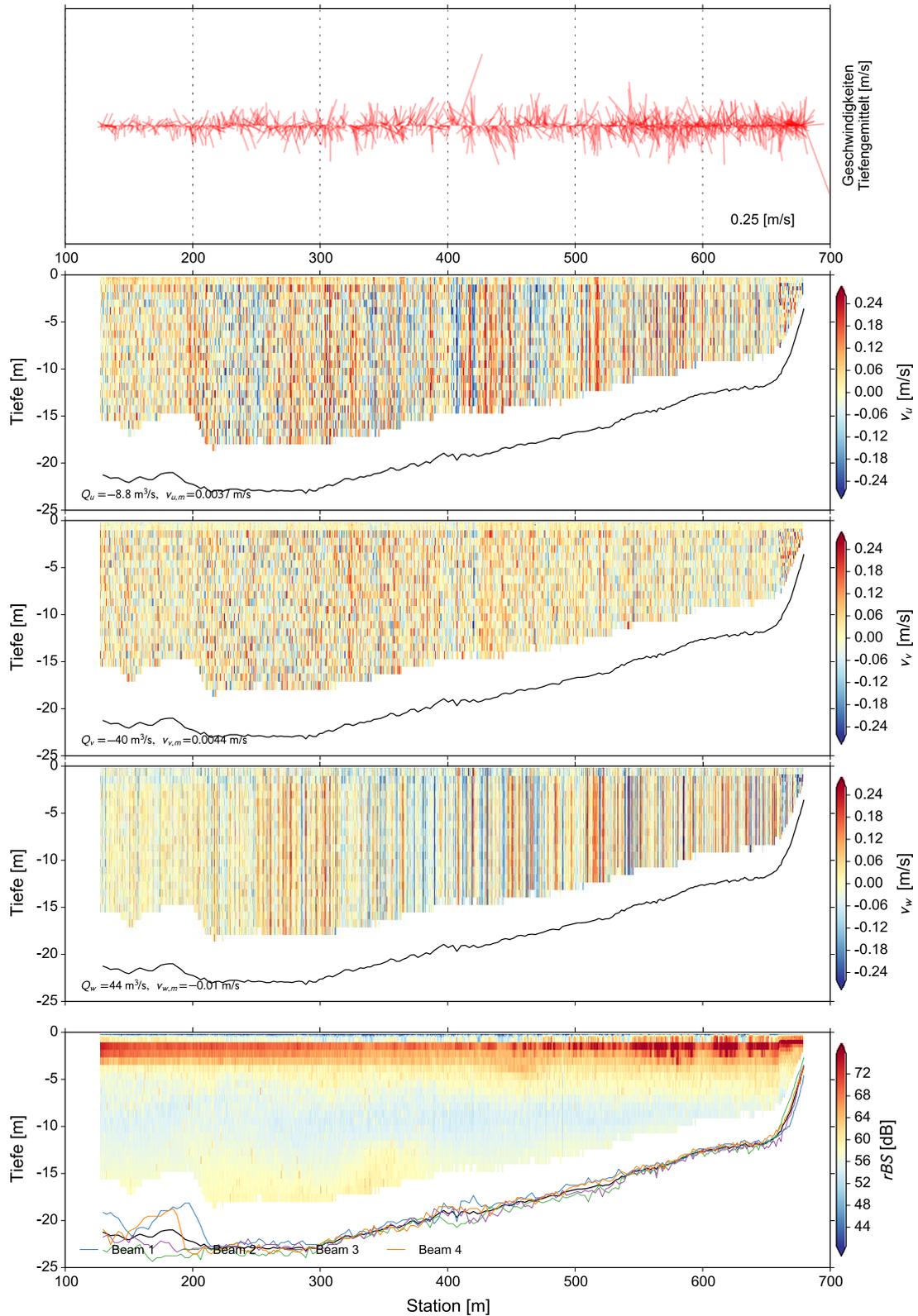
## A.2 Profilweise ADCP-Auswertung

Auf den nachfolgenden Seiten sind die Profilweisen ADCP-Auswertungen zu finden.

**11-P16**

08.07.2013 15:17 – 15:32  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=8.5 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0.014 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=6.0 \text{ m}^3/\text{s}$

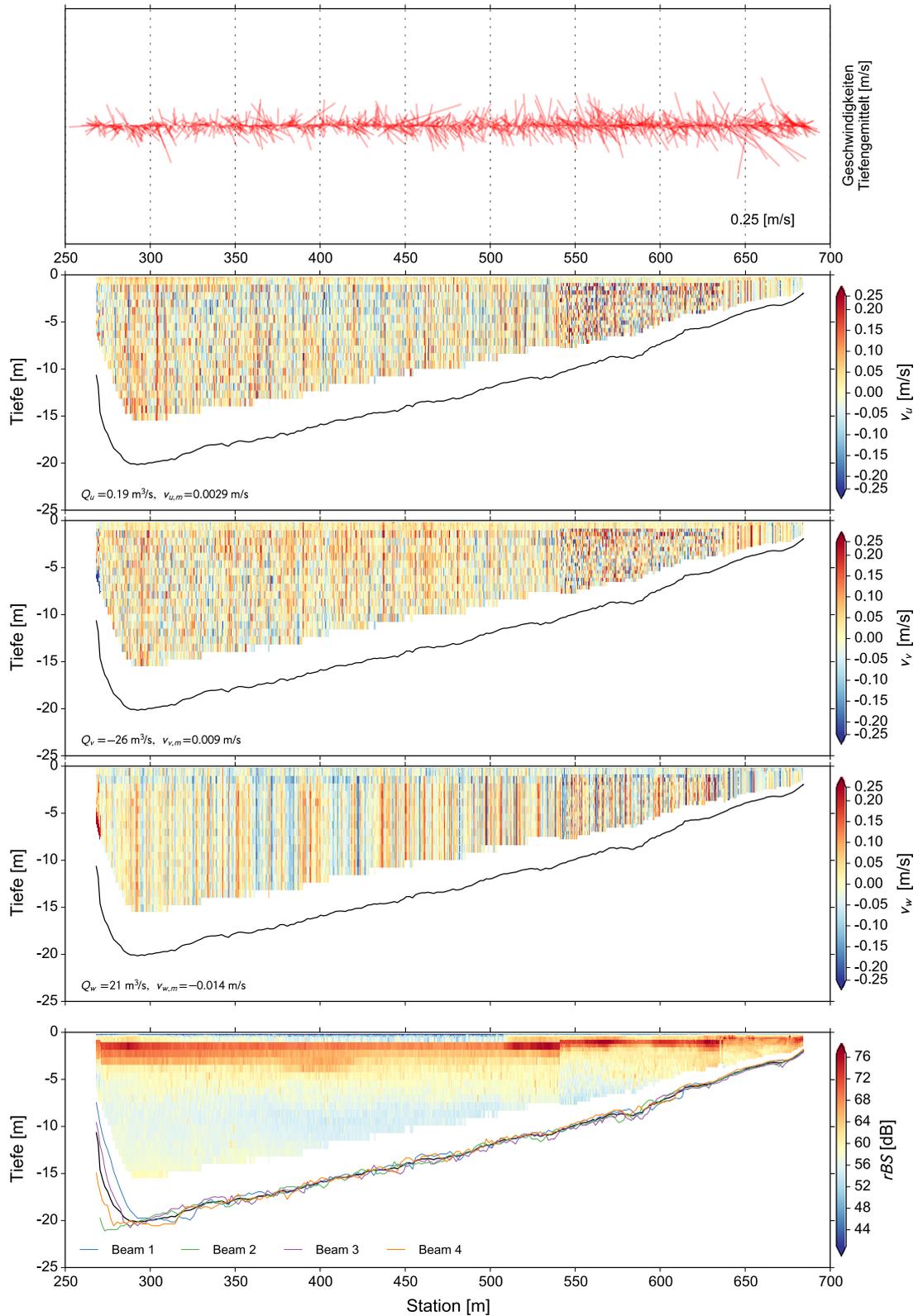


**11-P17-1**

08.07.2013 14:20 – 14:34  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=6.1 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$

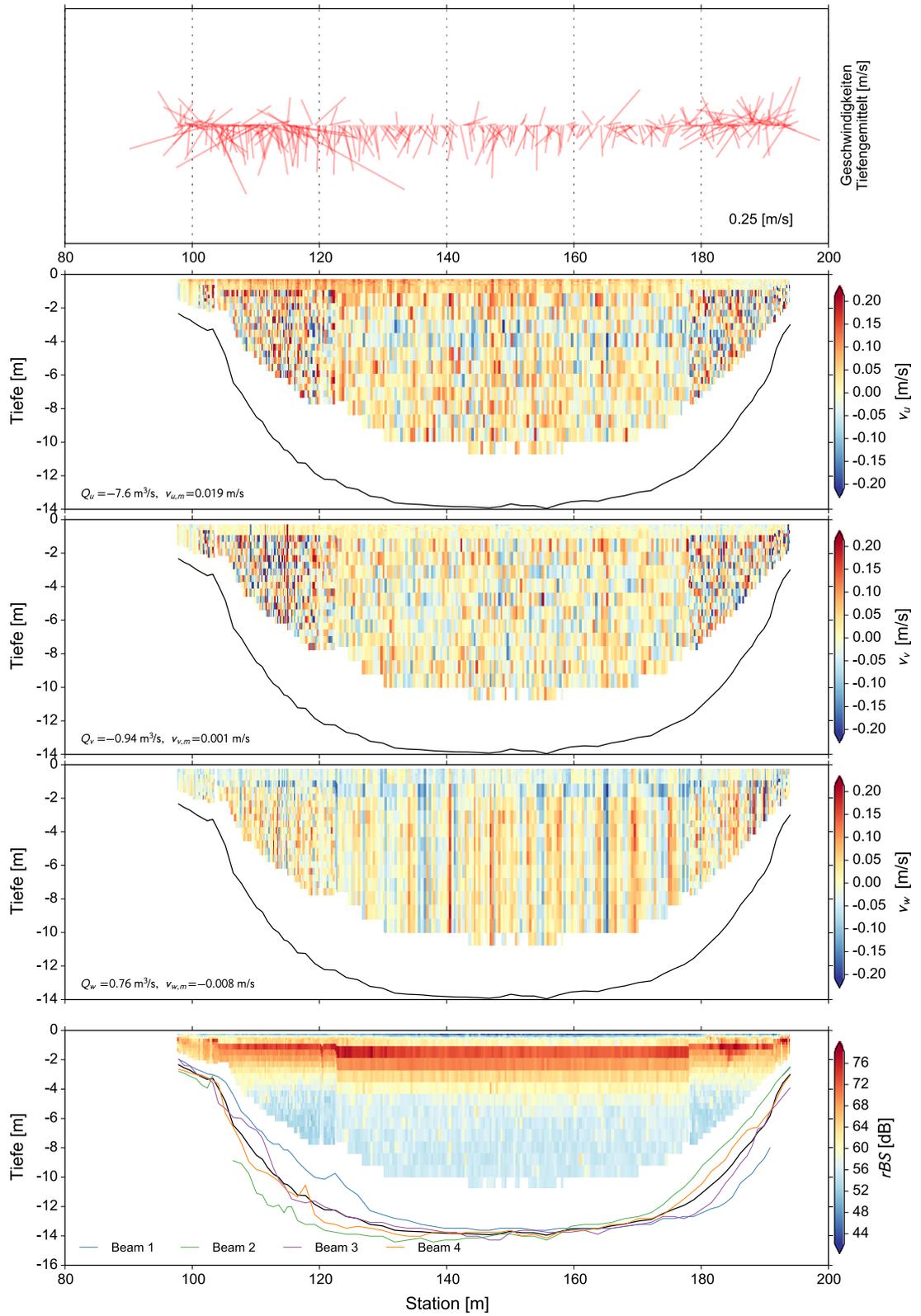
$Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=8.0 \text{ m}^3/\text{s}$



**11-P17-2**

08.07.2013 15:07 – 15:11  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=6.3 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=8.2 \text{ m}^3/\text{s}$

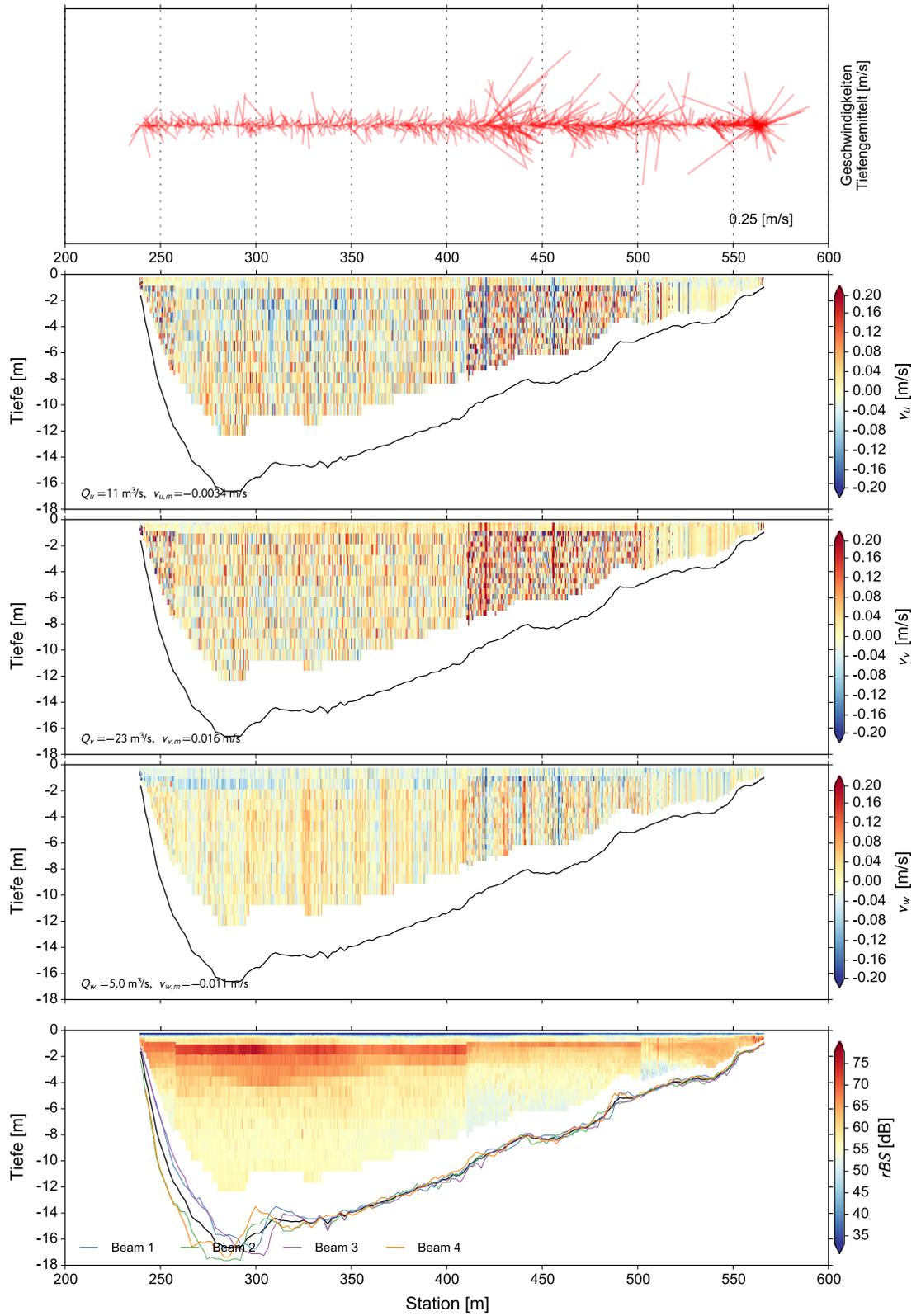


**11-P18-1**

08.07.2013 13:56 – 14:10  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=6.0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$

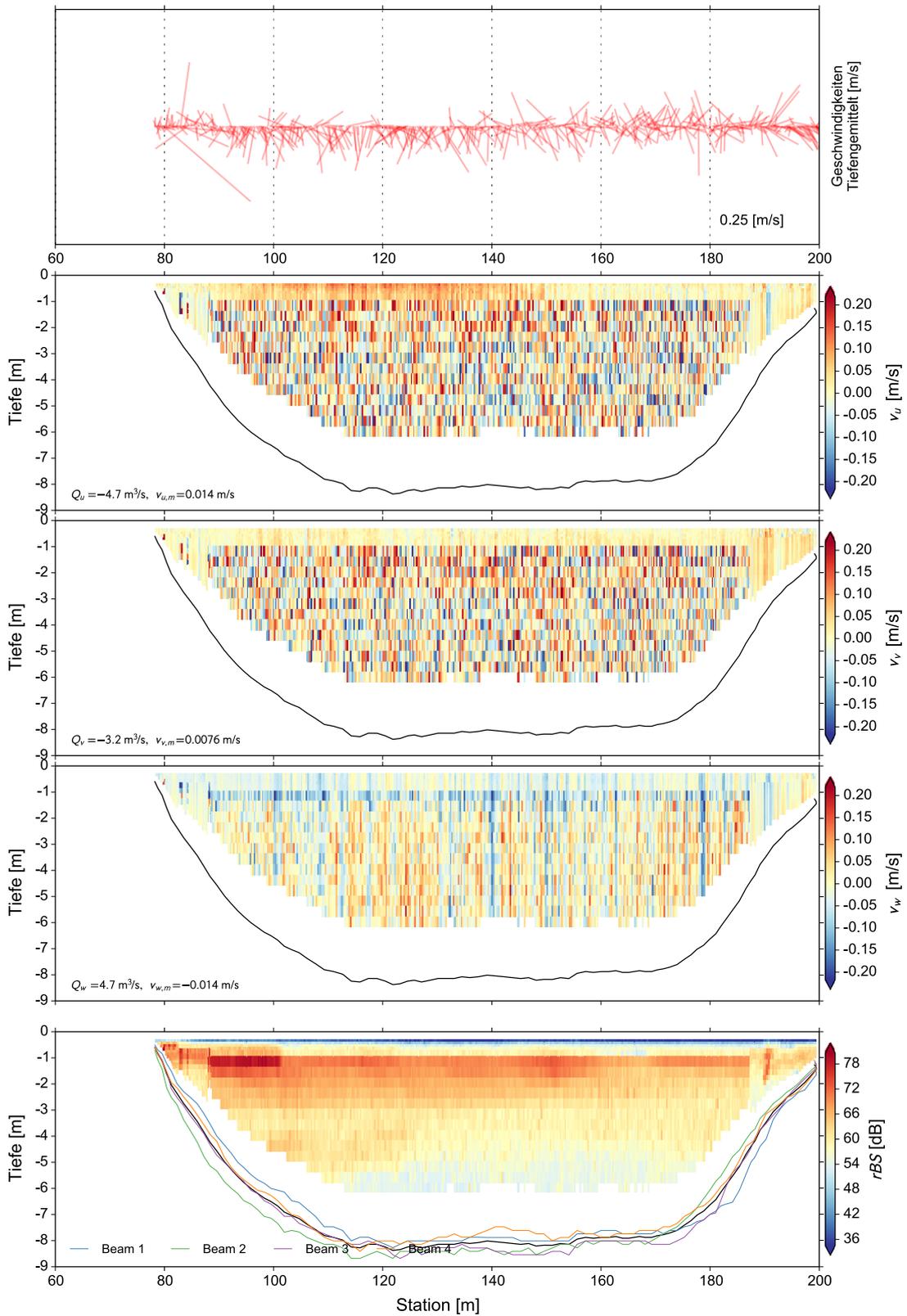
$Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=7.7 \text{ m}^3/\text{s}$



**11-P18-2**

08.07.2013 14:51 – 14:56  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=6.1 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=15 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=8.4 \text{ m}^3/\text{s}$

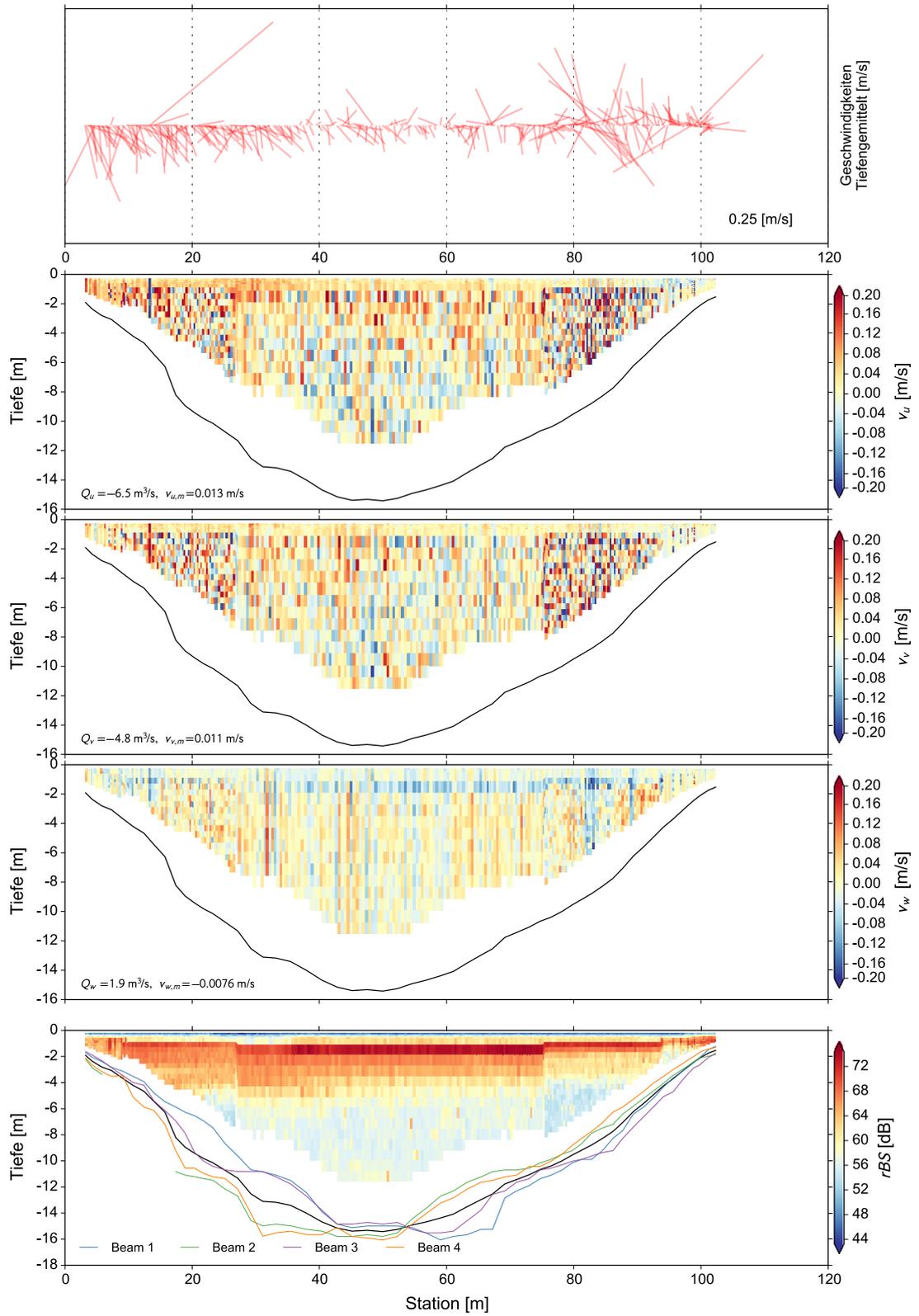


**11-S2019**

08.07.2013 15:00 – 15:03  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=6.3 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=15 \text{ m}^3/\text{s}$

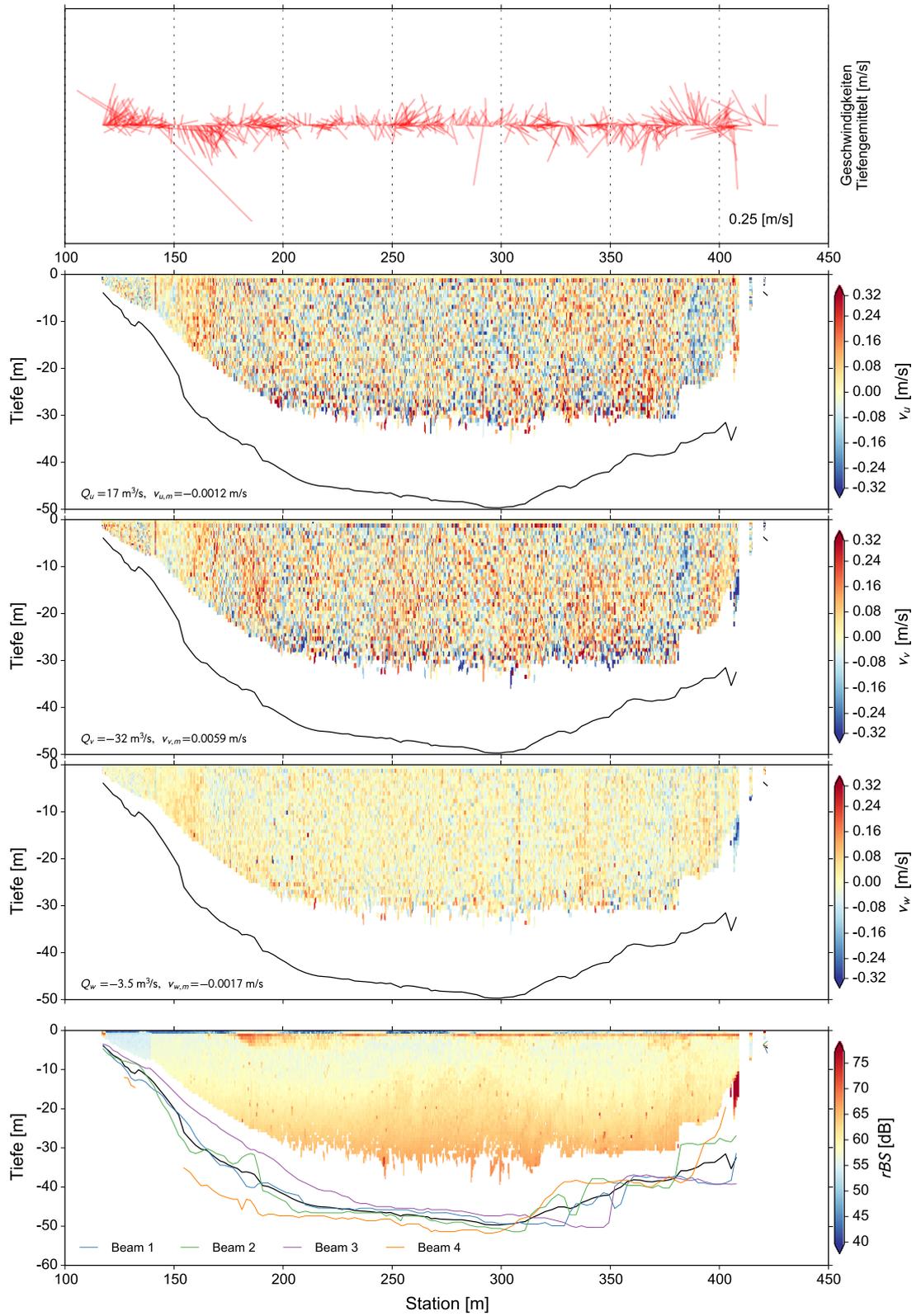
$Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=8.4 \text{ m}^3/\text{s}$



**12-P02**

09.07.2013 14:37 – 14:47  
RDI River Ray

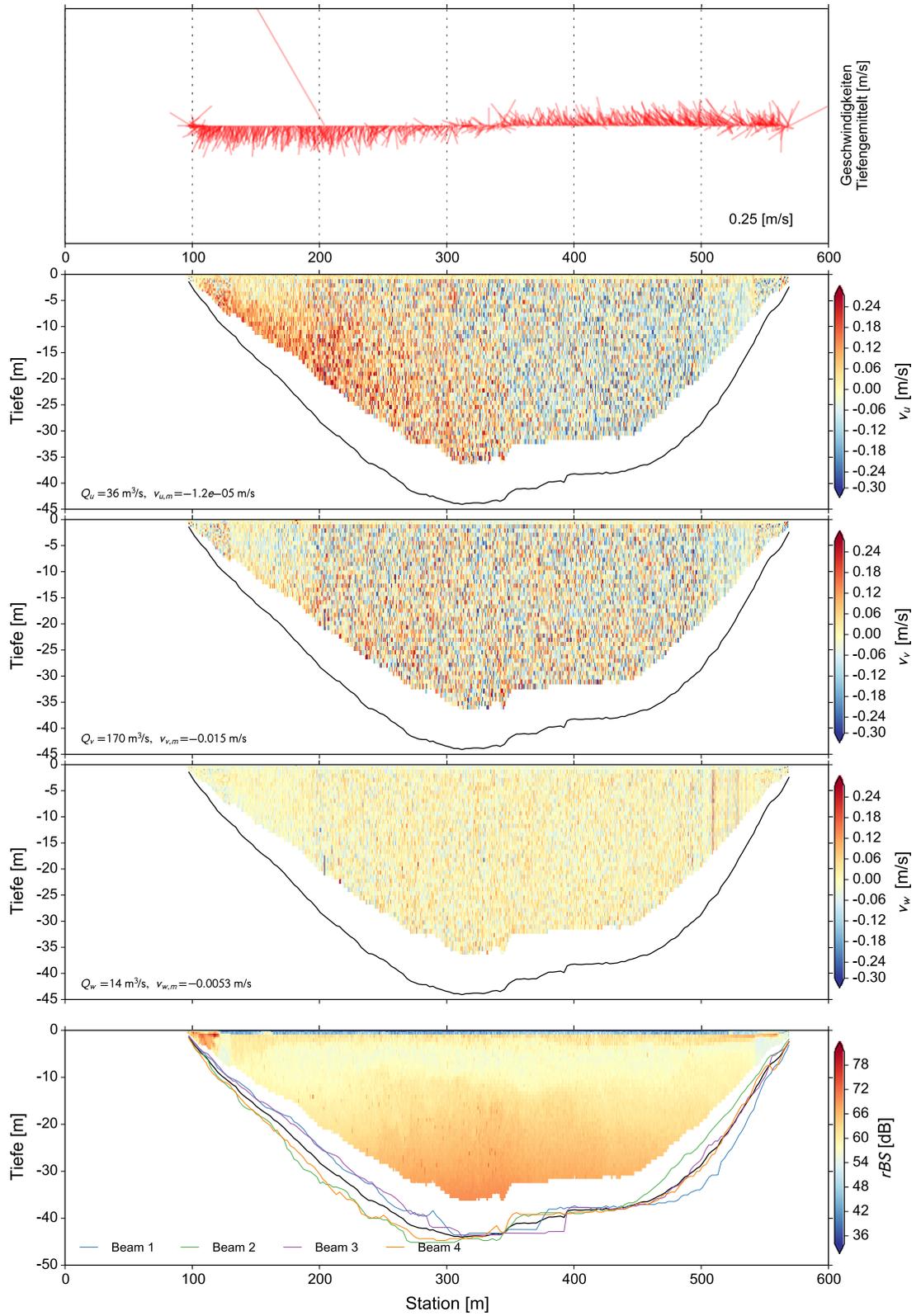
$Q_{TKH}=11 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=57 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.006 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=46 \text{ m}^3/\text{s}$



**12-P05**

09.07.2013 14:07 – 14:20  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=16 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=57 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.009 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=41 \text{ m}^3/\text{s}$

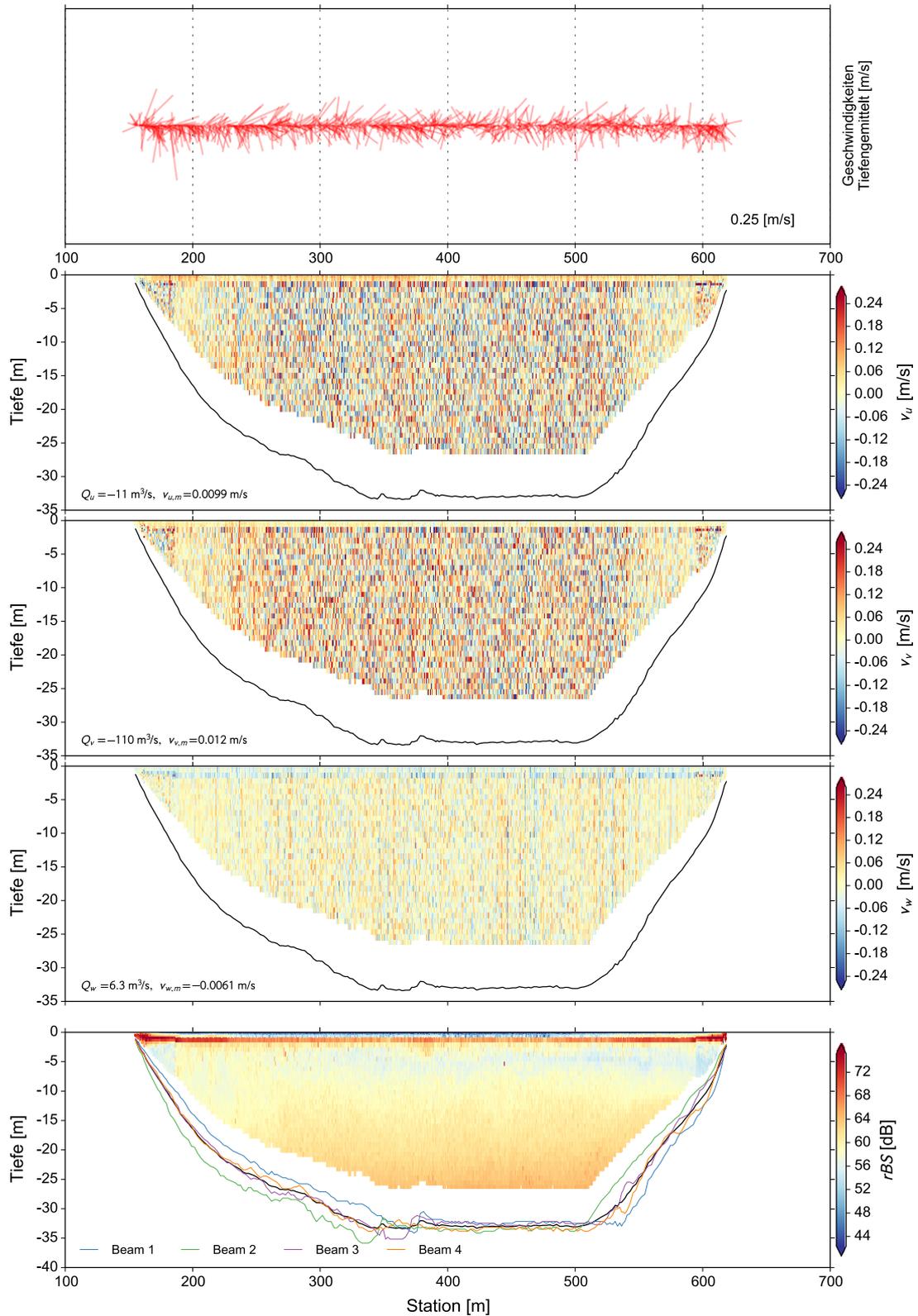


**12-P10**

09.07.2013 13:30 – 13:44  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=13 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=7.6 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=57 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=51 \text{ m}^3/\text{s}$

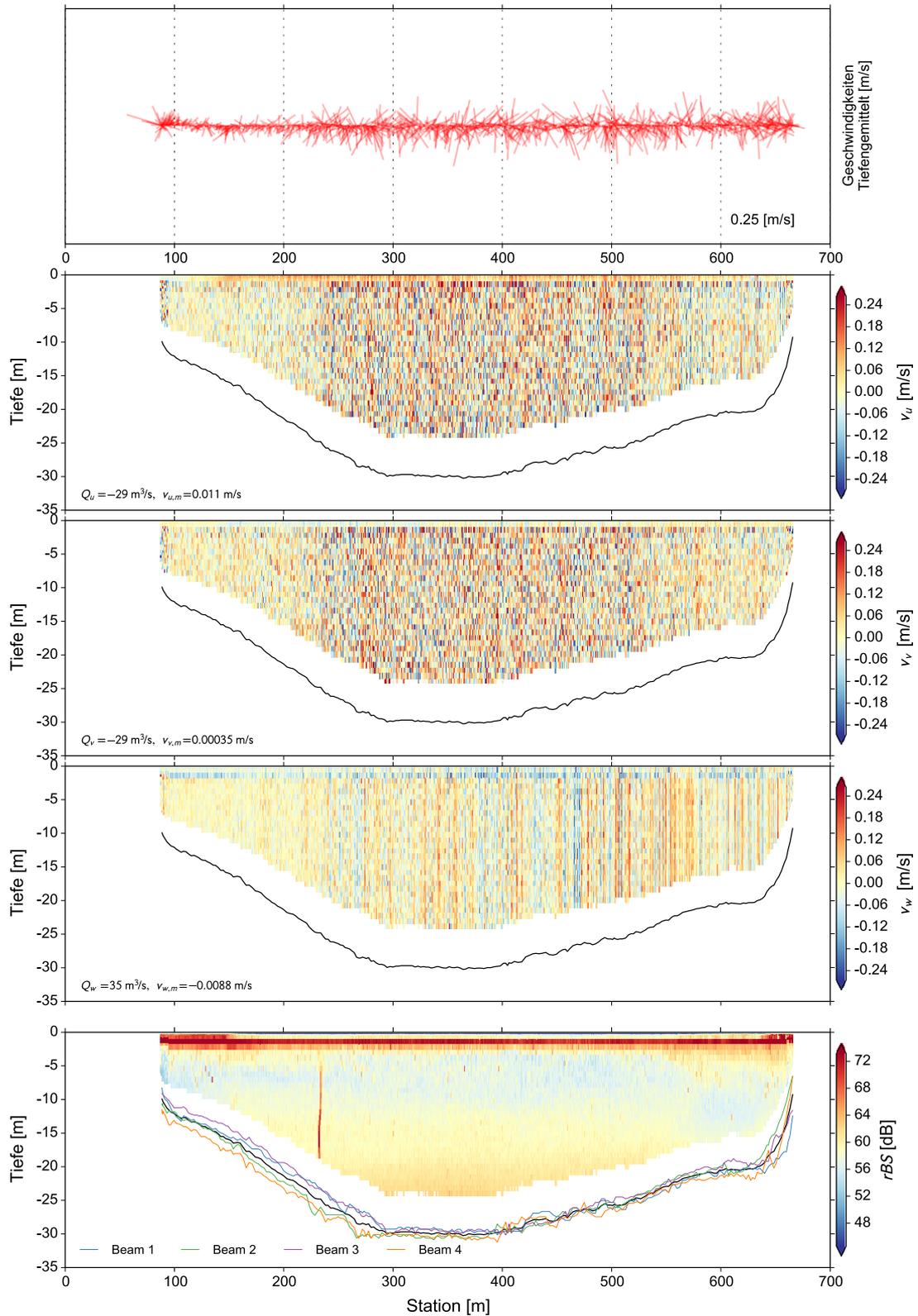


**12-P14**

09.07.2013 13:06 – 13:22  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=10 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=57 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=60 \text{ m}^3/\text{s}$

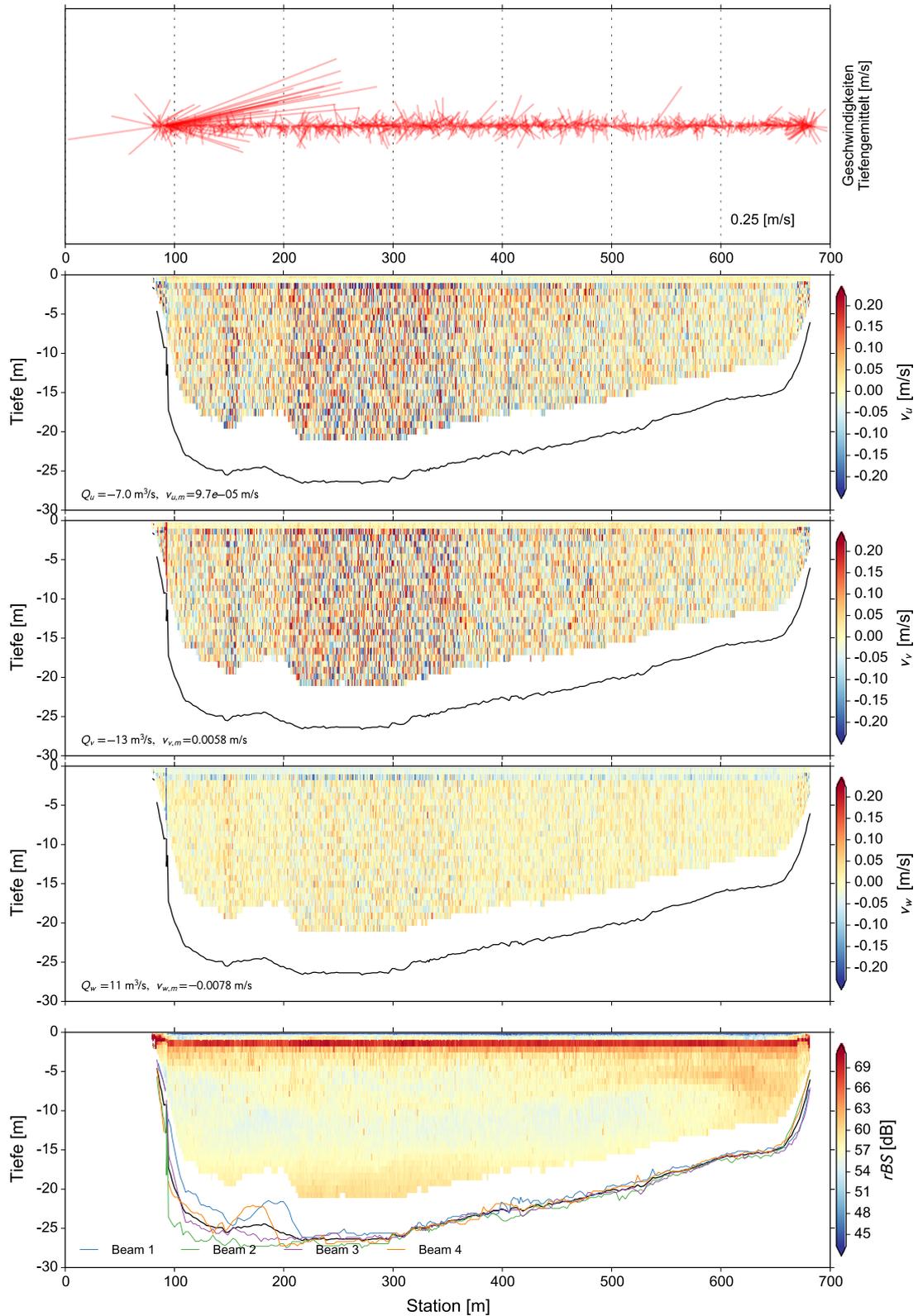


**12-P16-2**

09.07.2013 11:13 – 11:30  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=17 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$

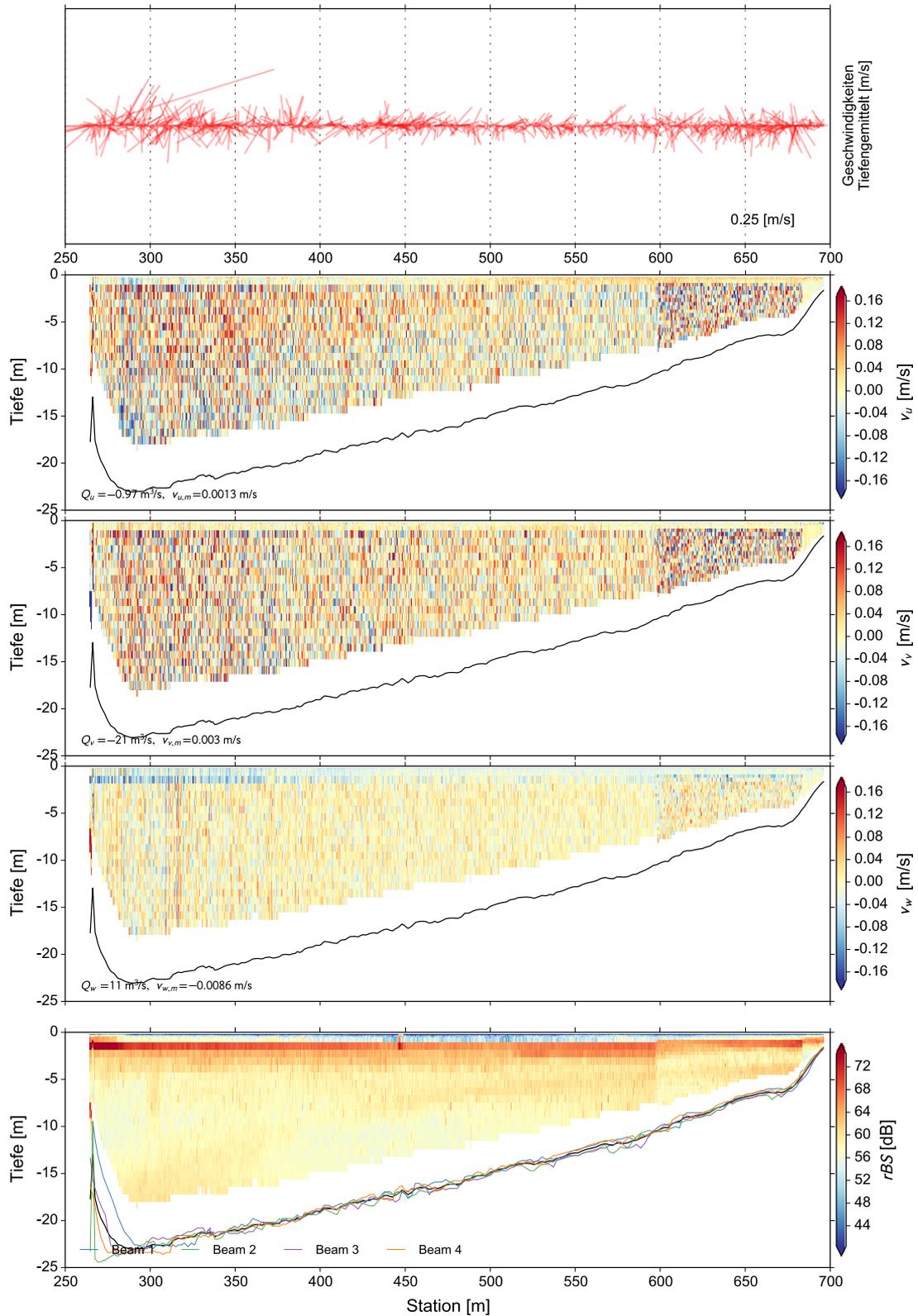
$Q_{TKP}=58 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=56 \text{ m}^3/\text{s}$



**12-P17-1**

09.07.2013 10:22 – 10:36  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=9.1 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=57 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=62 \text{ m}^3/\text{s}$

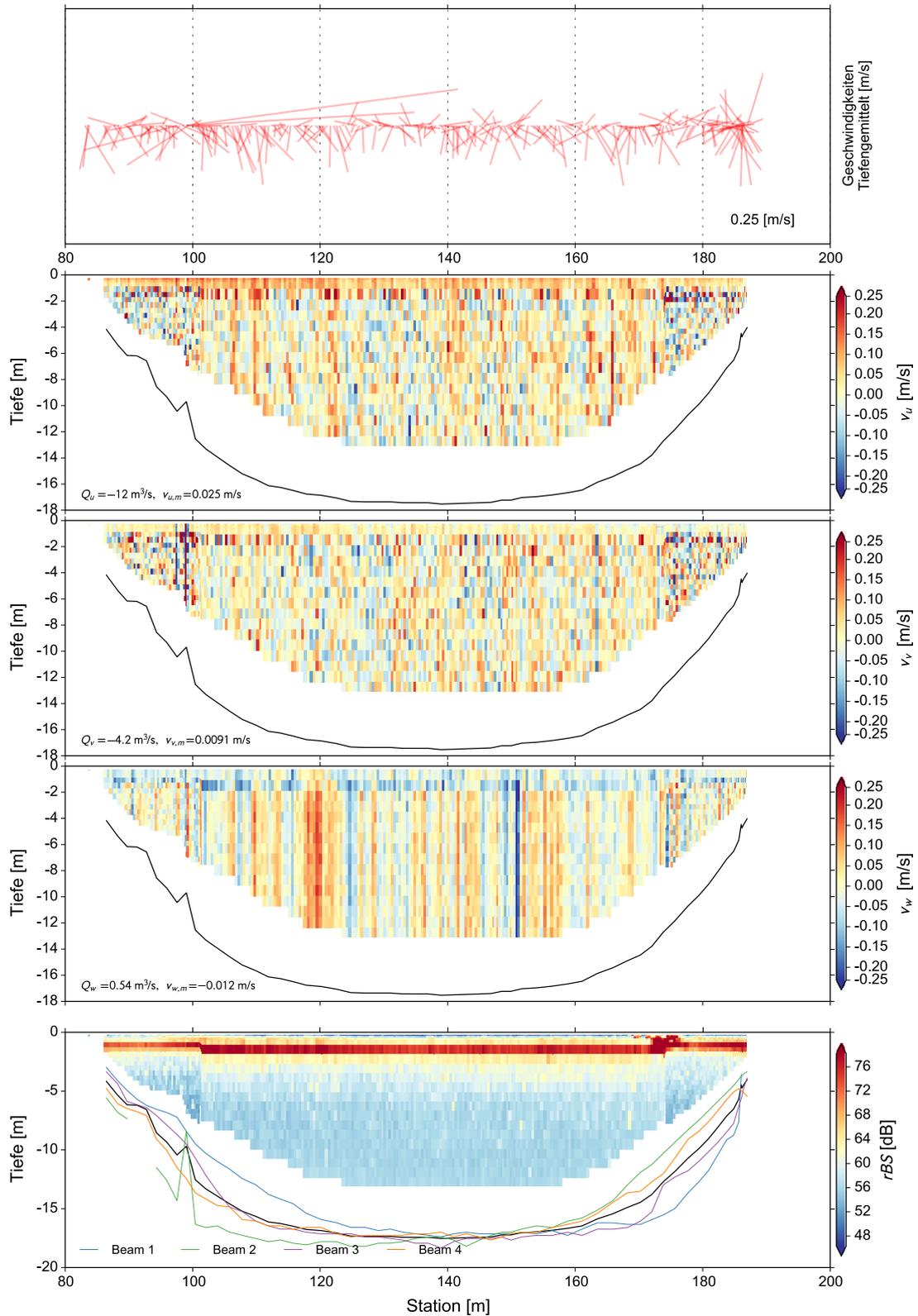


**12-P17-2**

09.07.2013 12:55 – 12:59  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=12 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=55 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=58 \text{ m}^3/\text{s}$

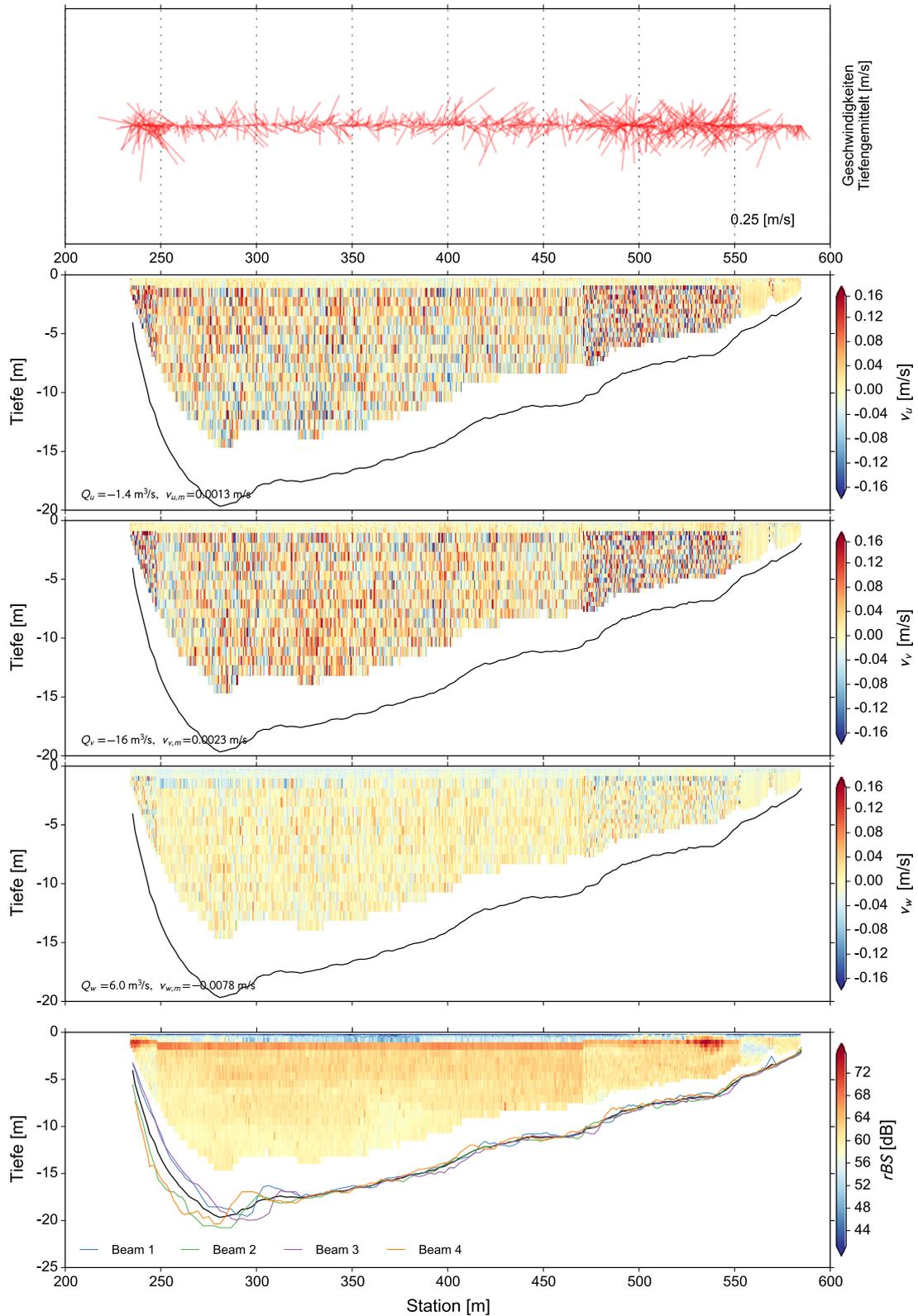


**12-P18**

09.07.2013 09:27 – 09:36  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=19 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$

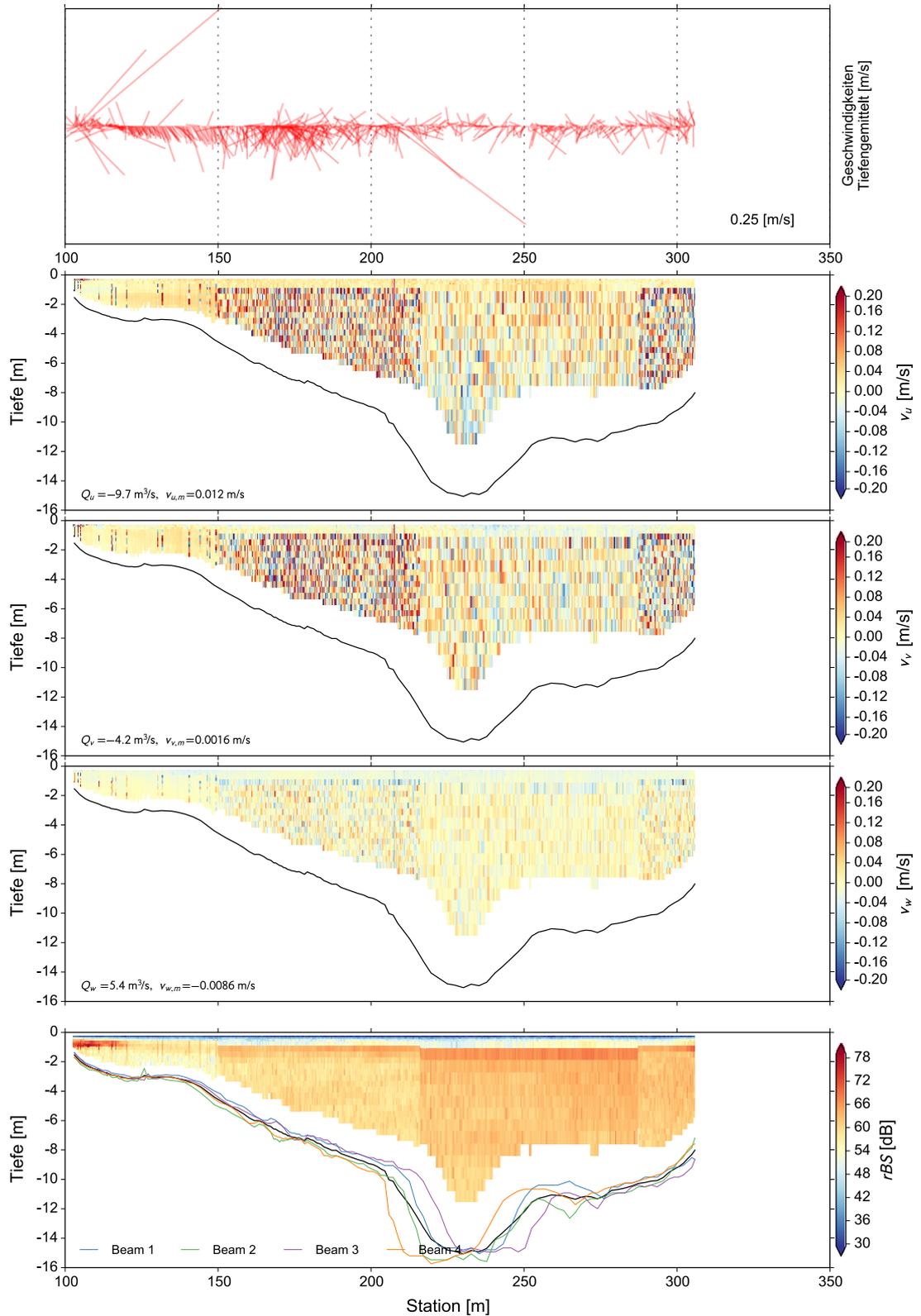
$Q_{TKP}=64 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=60 \text{ m}^3/\text{s}$



**12-P19**

09.07.2013 09:12 – 09:20  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=19 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=67 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=62 \text{ m}^3/\text{s}$

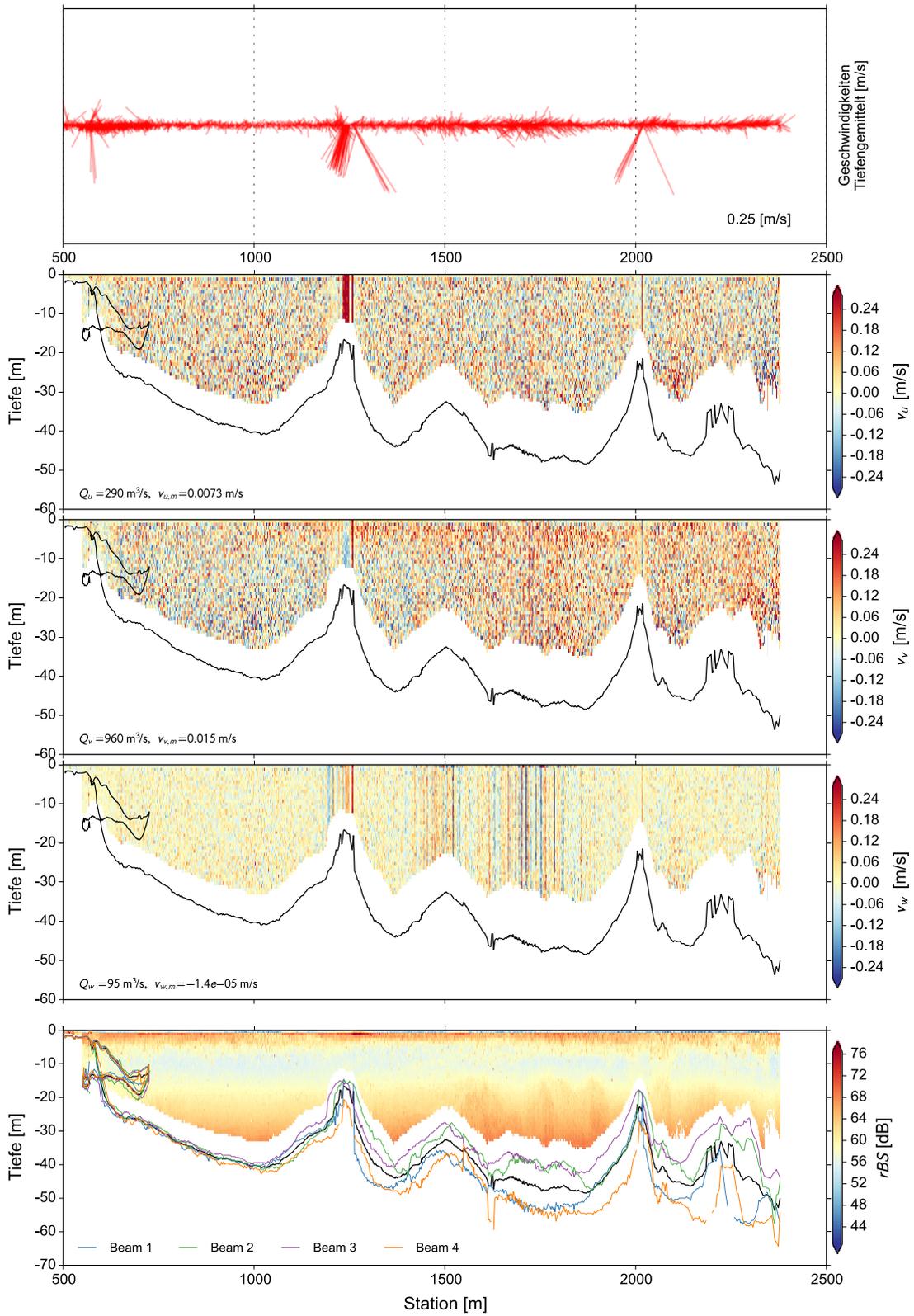


**21-L25**

29.07.2013 12:50 – 14:01  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=19 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=15 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=120 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=120 \text{ m}^3/\text{s}$

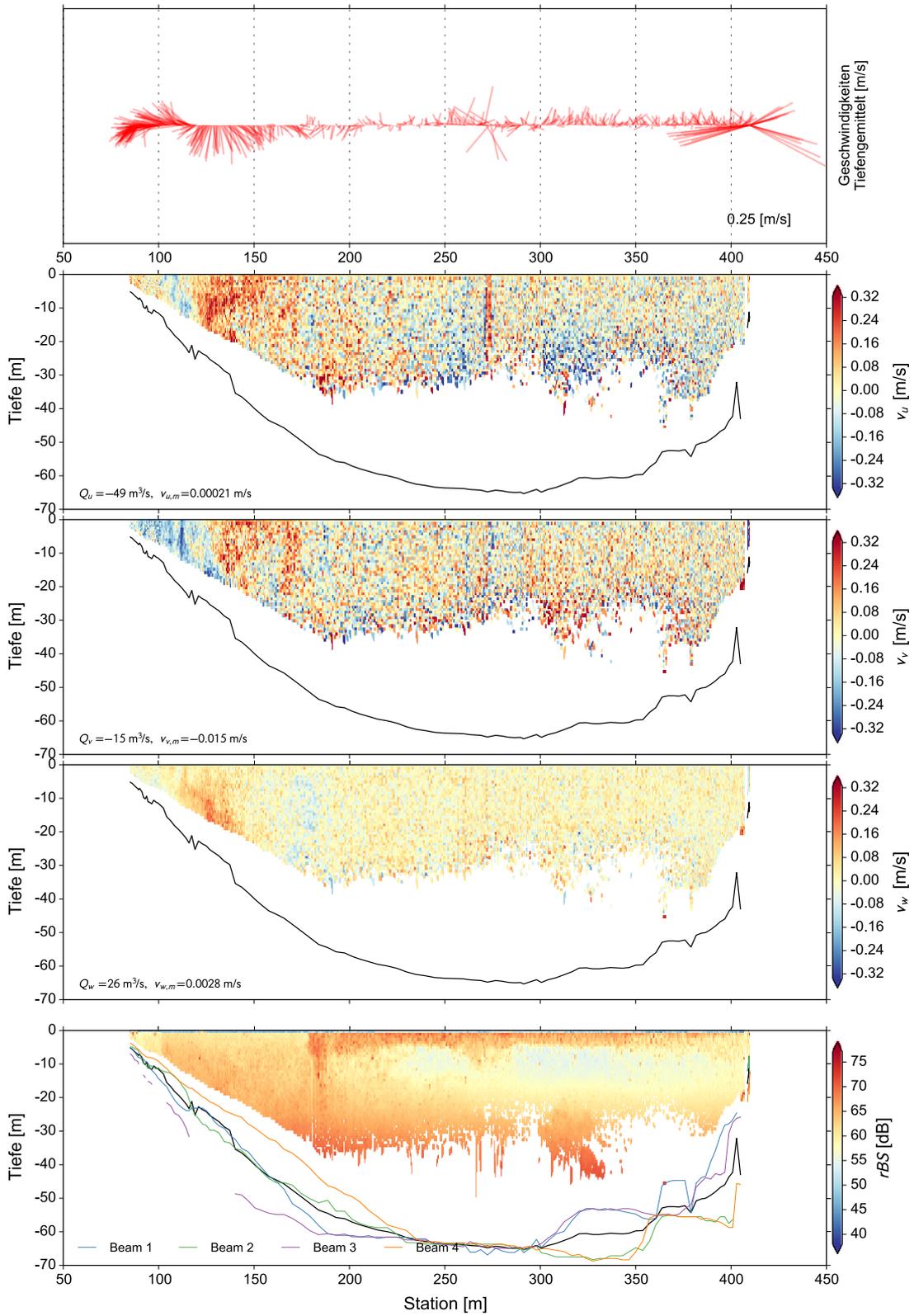


**21-P02**

29.07.2013 11:05 – 11:15  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=15 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=14 \text{ m}^3/\text{s}$

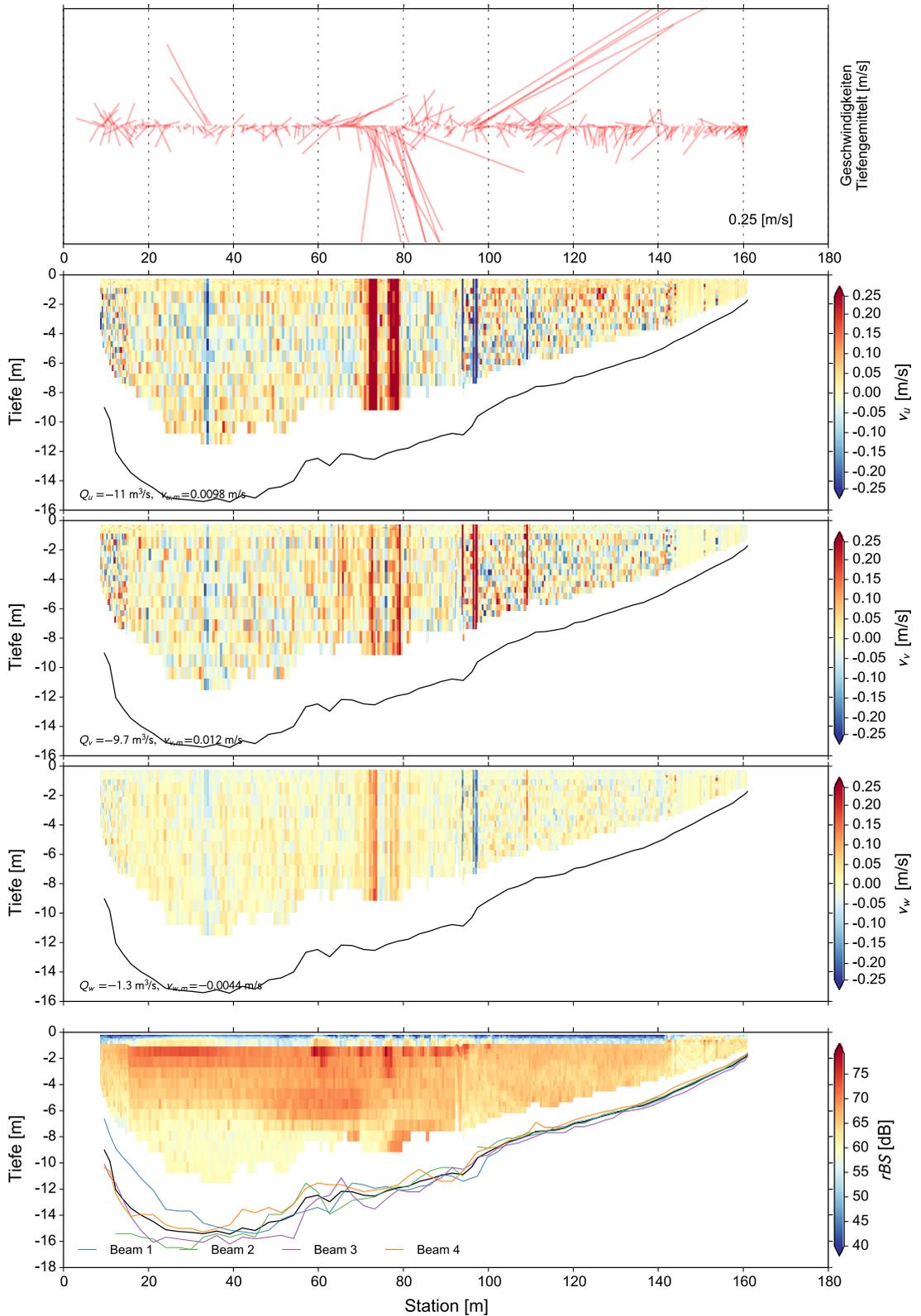
$Q_{TKP}=120 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=120 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-E4-1**

30.07.2013 13:08 – 13:11  
RDI River Ray

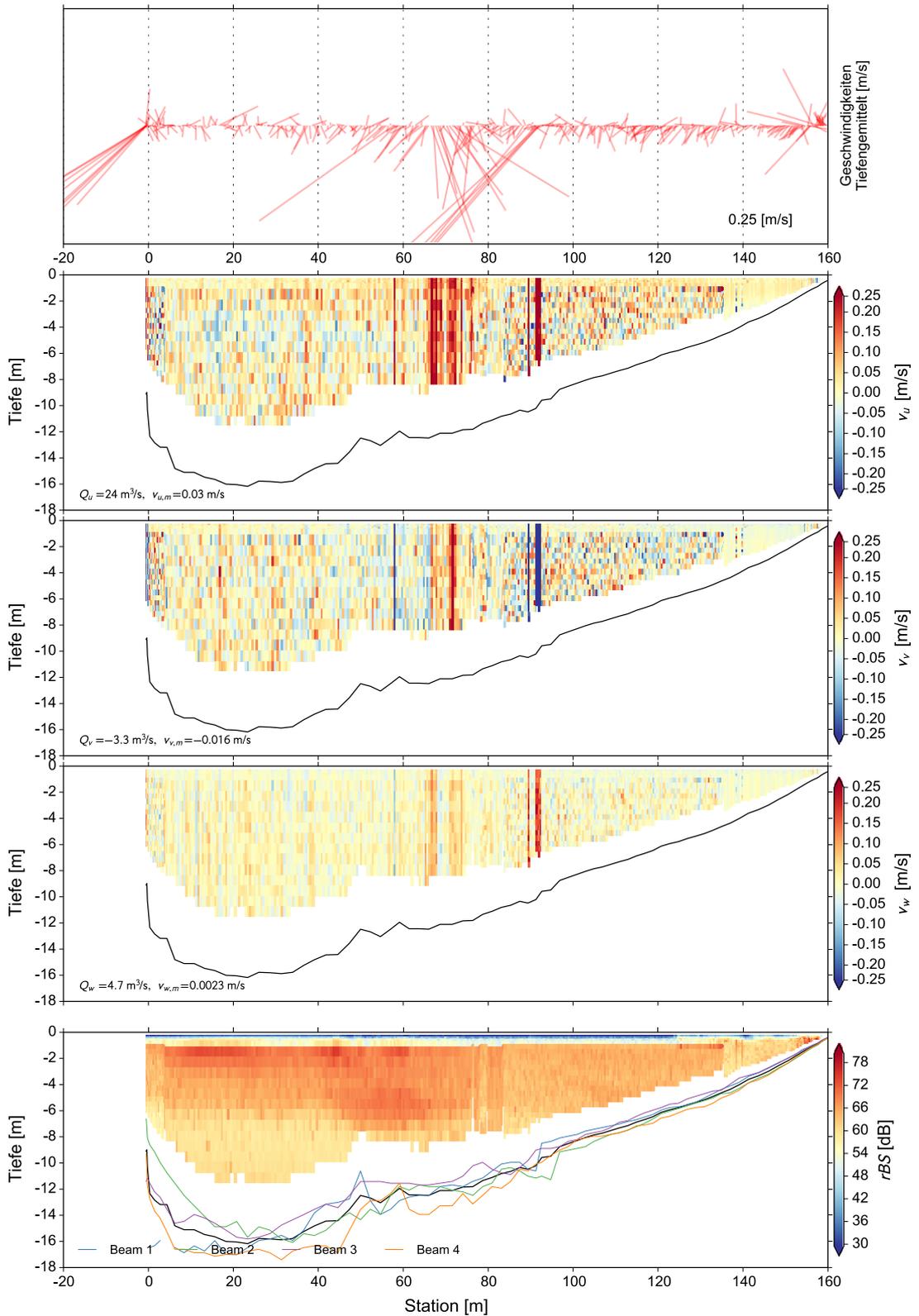
$Q_{TKH}=3.4 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=-0.0066 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.013 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-3.3 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-E4-2**

30.07.2013 13:12 – 13:17  
RDI River Ray

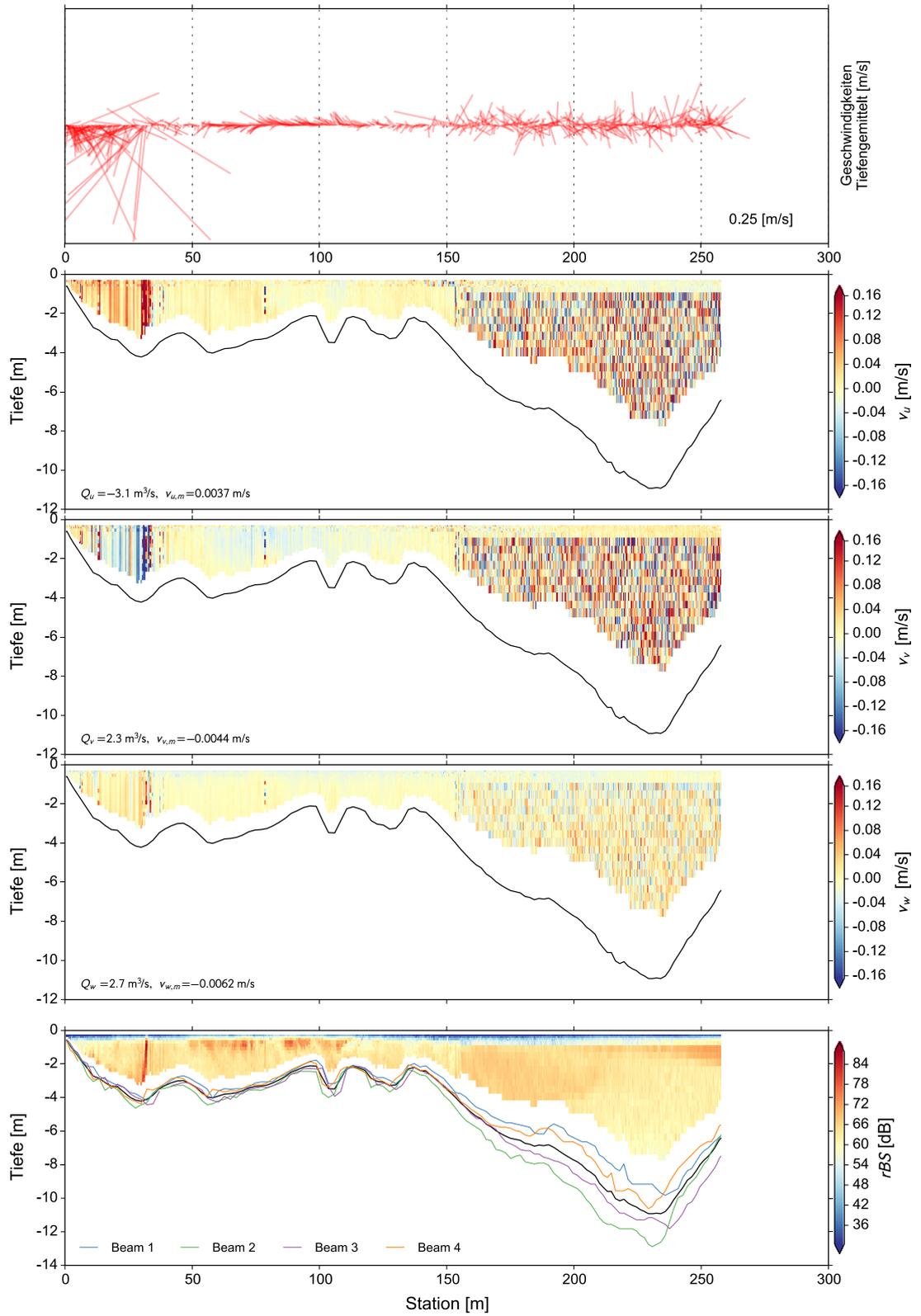
$Q_{TKH}=4.2 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.07 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-4.1 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-E5**

30.07.2013 13:28 – 13:35  
RDI River Ray

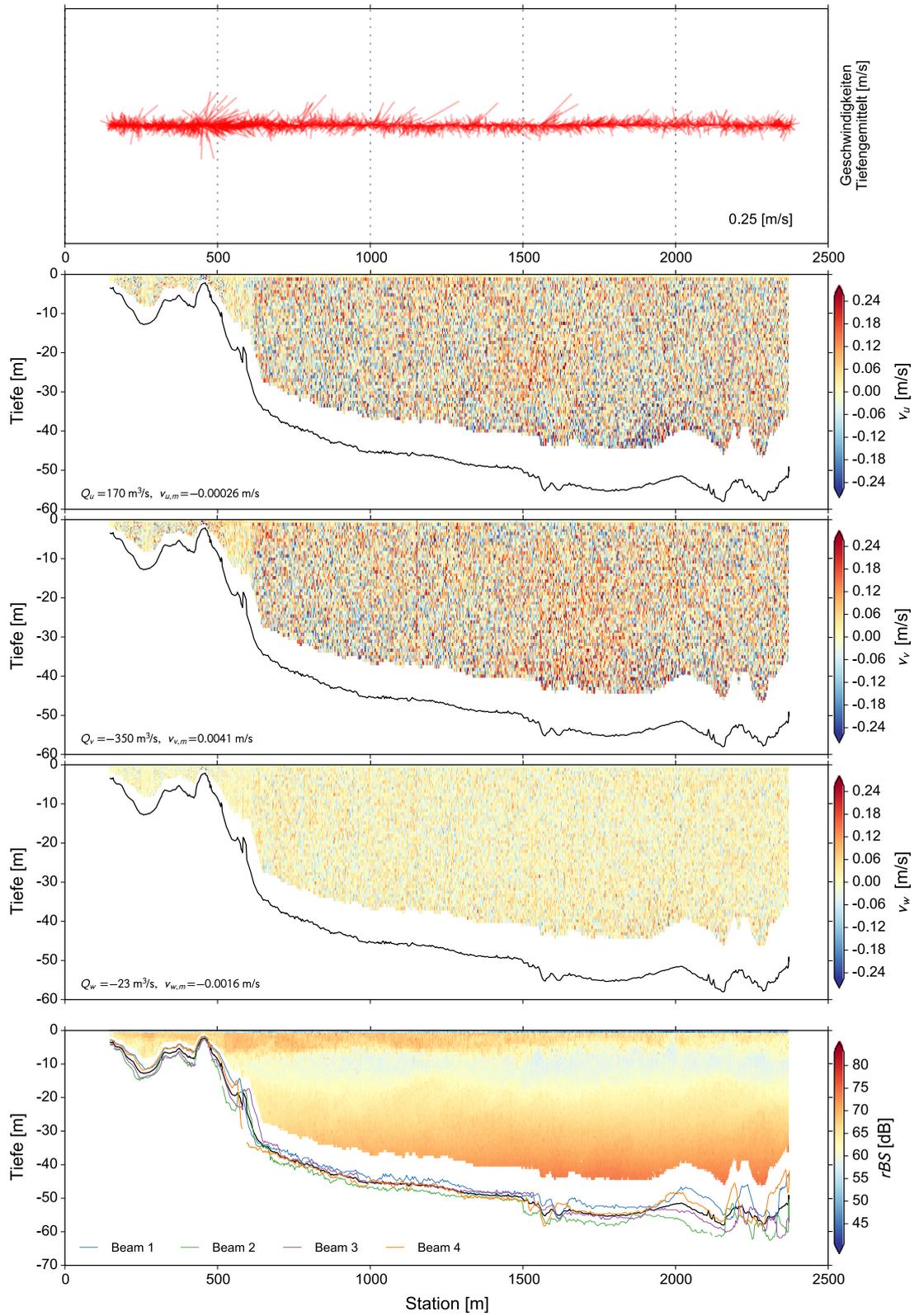
$Q_{TKH}=4.5 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=4.5 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=0.011 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-L45**

30.07.2013 09:15 – 10:08  
RDI River Ray

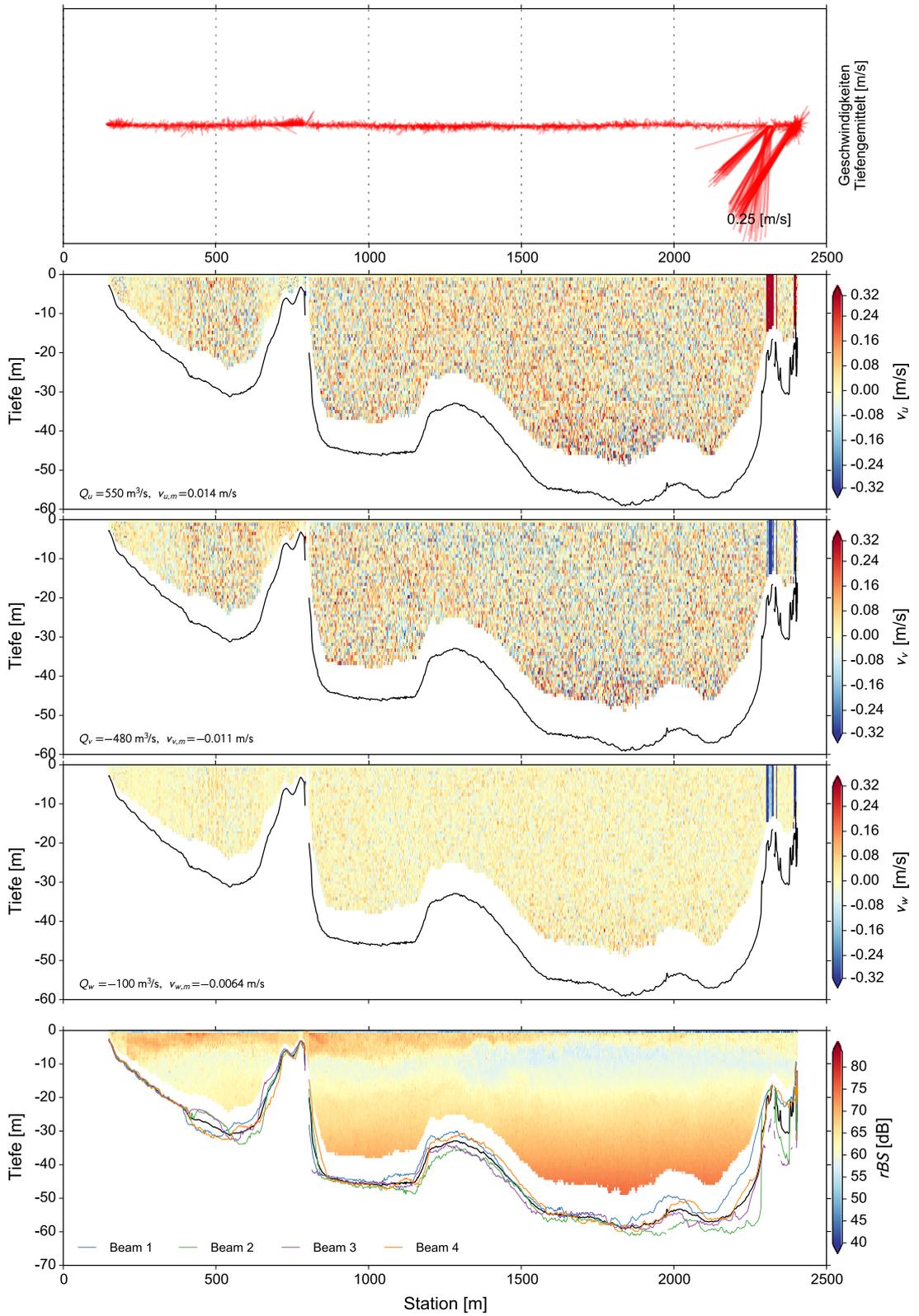
$Q_{TKH}=1.9 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.013 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-1.9 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-L60**

30.07.2013 10:37 – 11:41  
RDI River Ray

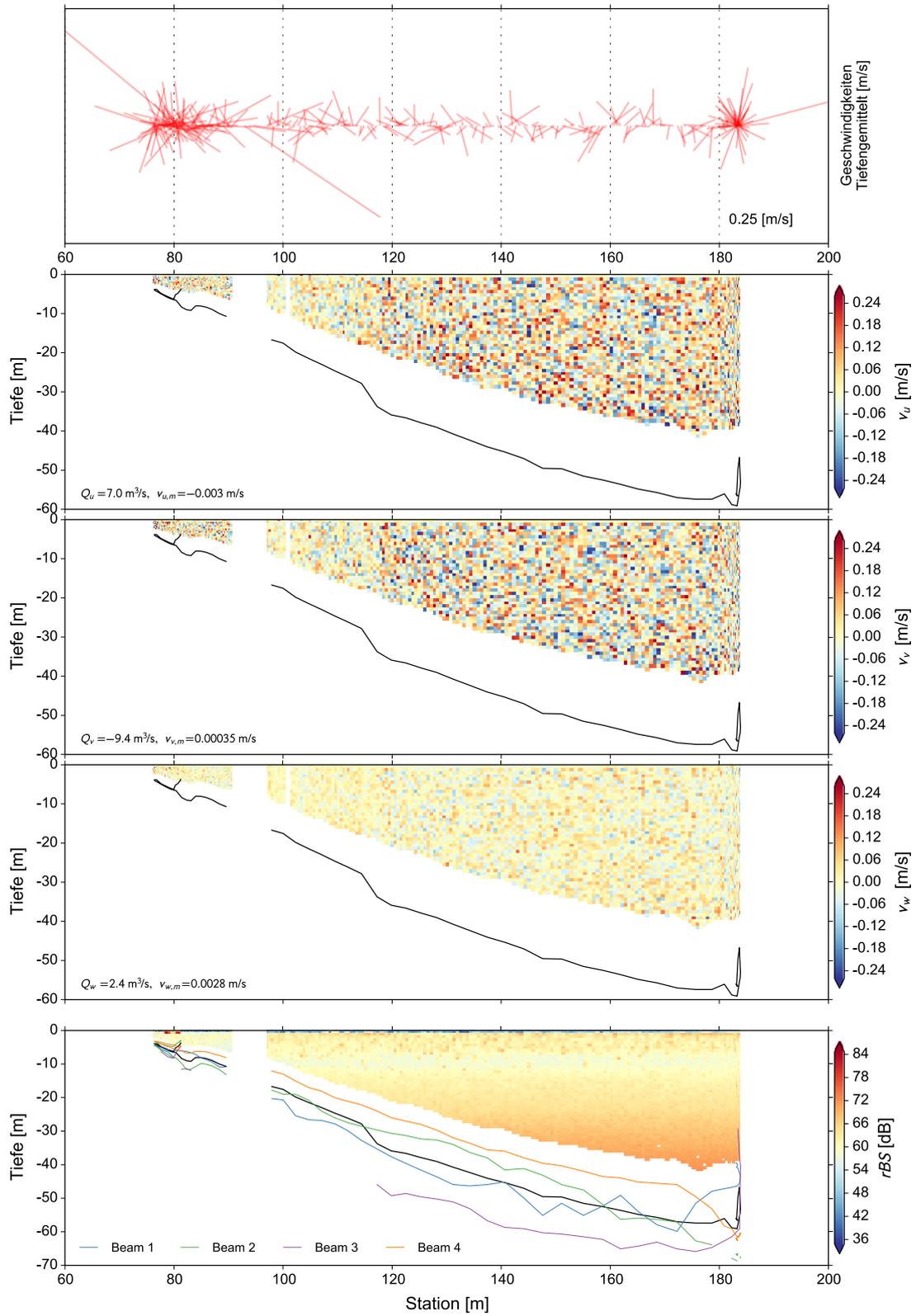
$Q_{TKH}=4.7 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.015 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-4.6 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-P01**

30.07.2013 12:15 – 12:20  
RDI River Ray

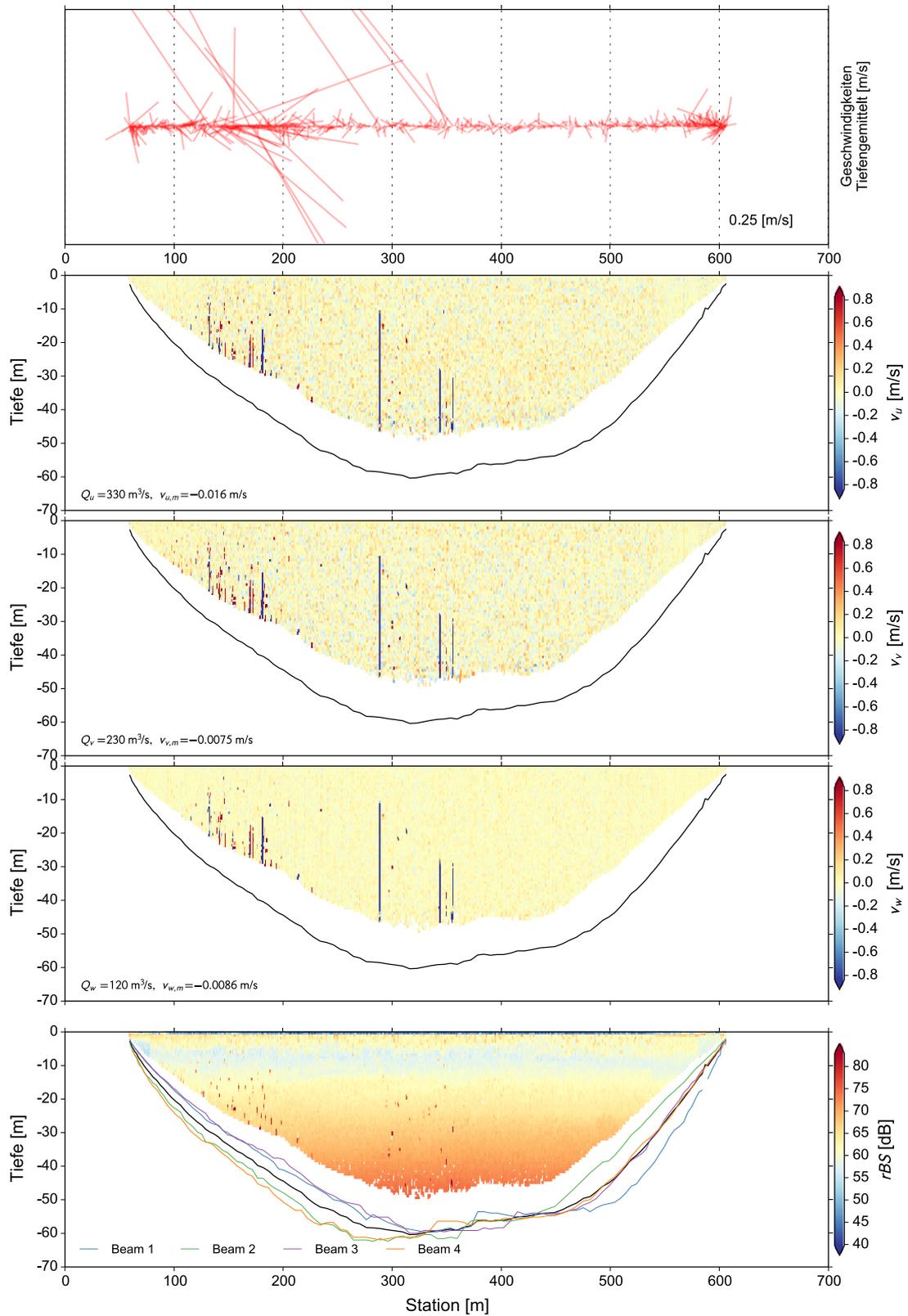
$Q_{TKH}=2.5 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.013 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-2.5 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-P05**

30.07.2013 15:04 – 15:13  
RDI River Ray

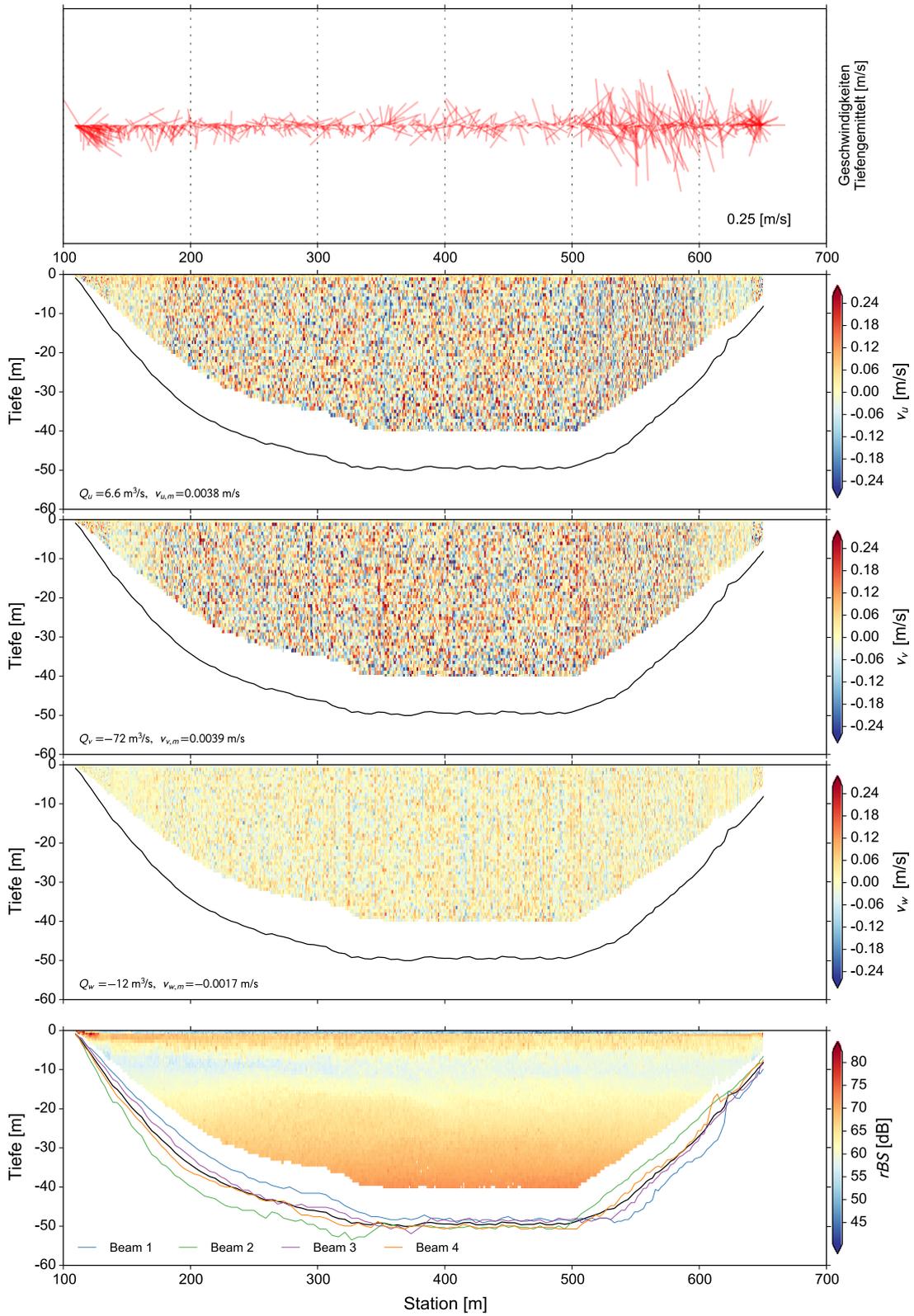
$Q_{TKH}=3.1 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=1.3 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-1.8 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-P10**

30.07.2013 14:42 – 14:54  
RDI River Ray

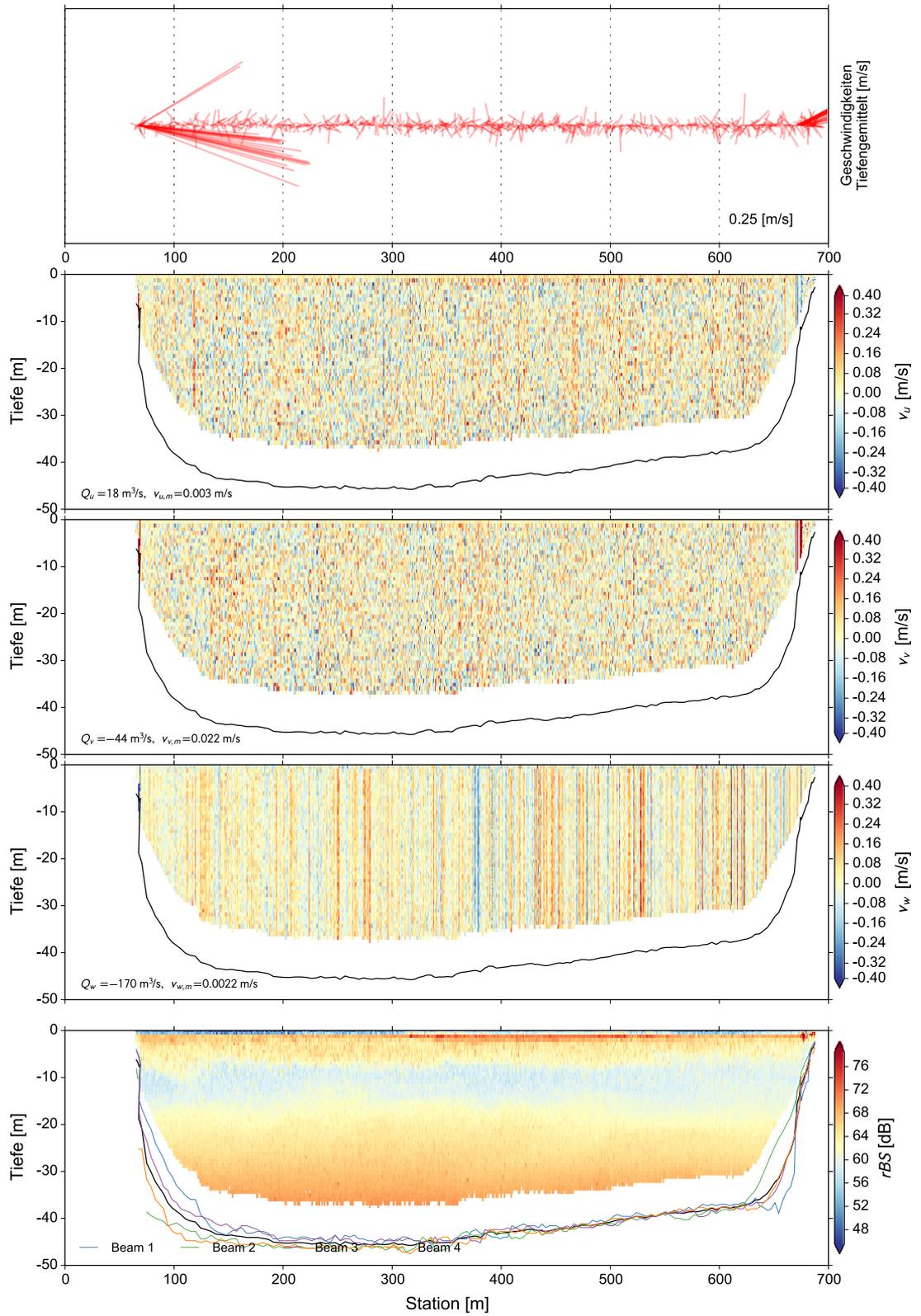
$Q_{TKH}=6.0 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.78 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-5.2 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-P15**

30.07.2013 14:08 – 14:22  
RDI River Ray

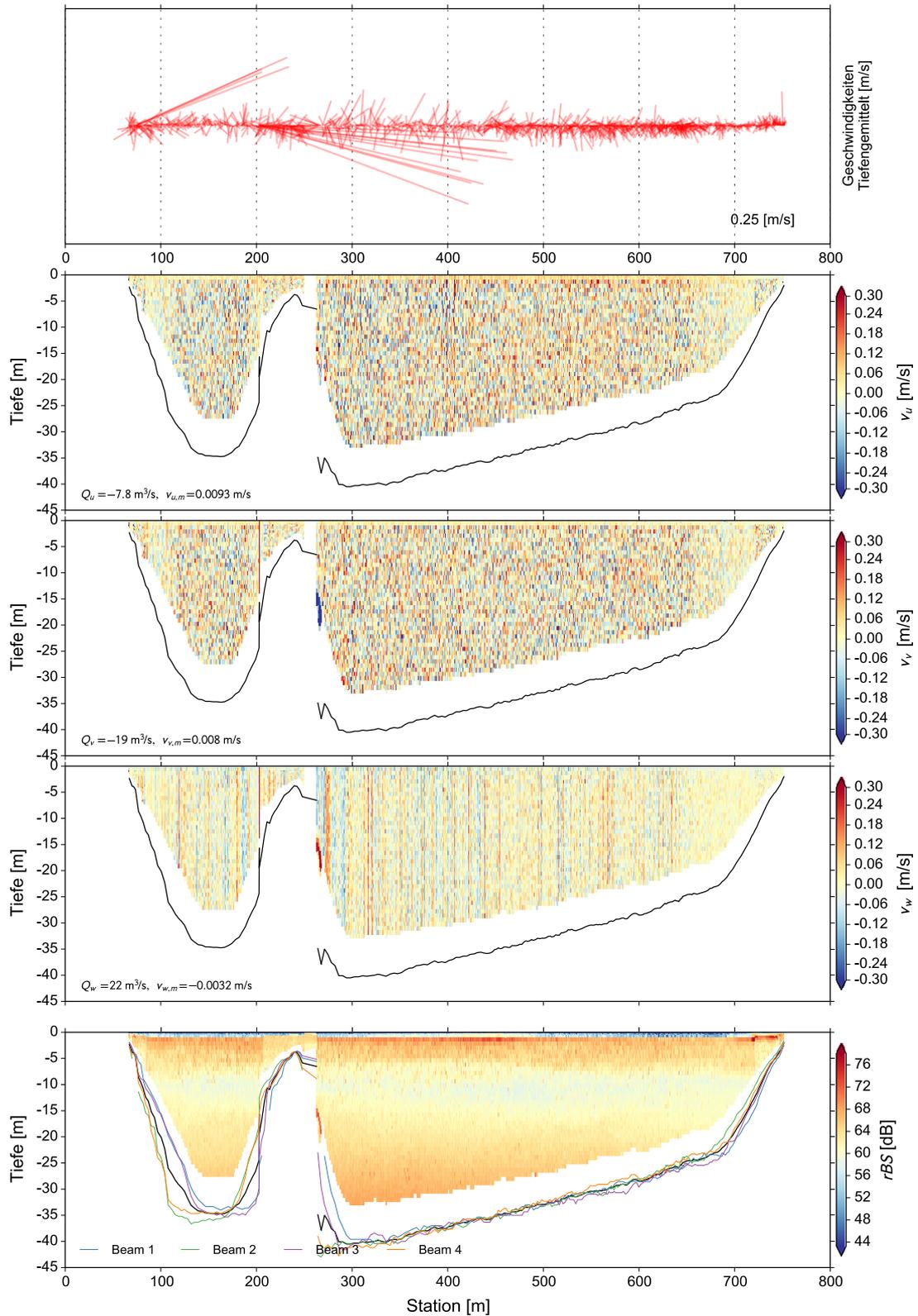
$Q_{TKH}=6.4 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=-0.019 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.0091 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-6.4 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-P17**

30.07.2013 13:40 – 14:00  
RDI River Ray

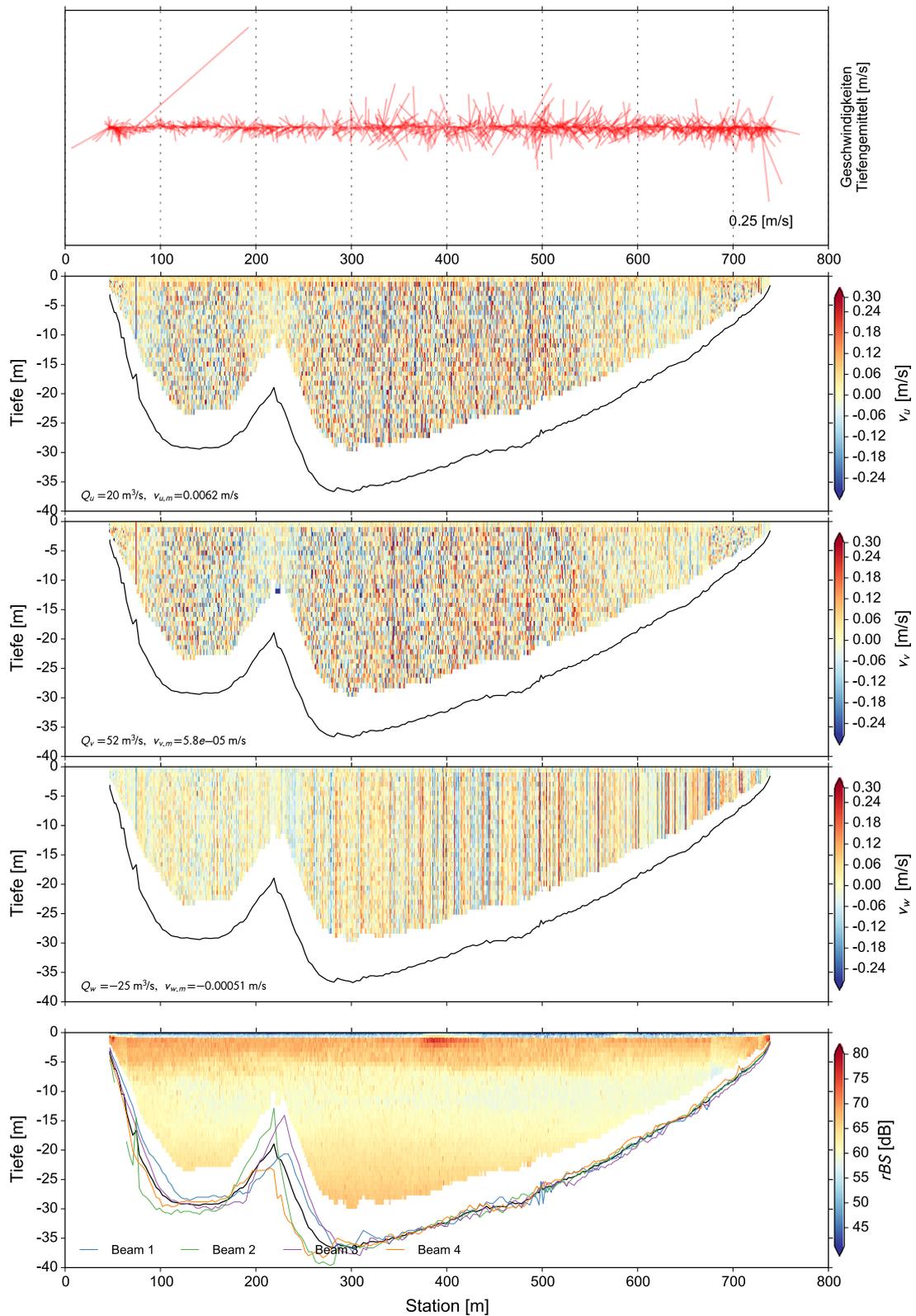
$Q_{TKH}=7.0 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.023 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-7.0 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-P18**

30.07.2013 12:43 – 13:01  
RDI River Ray

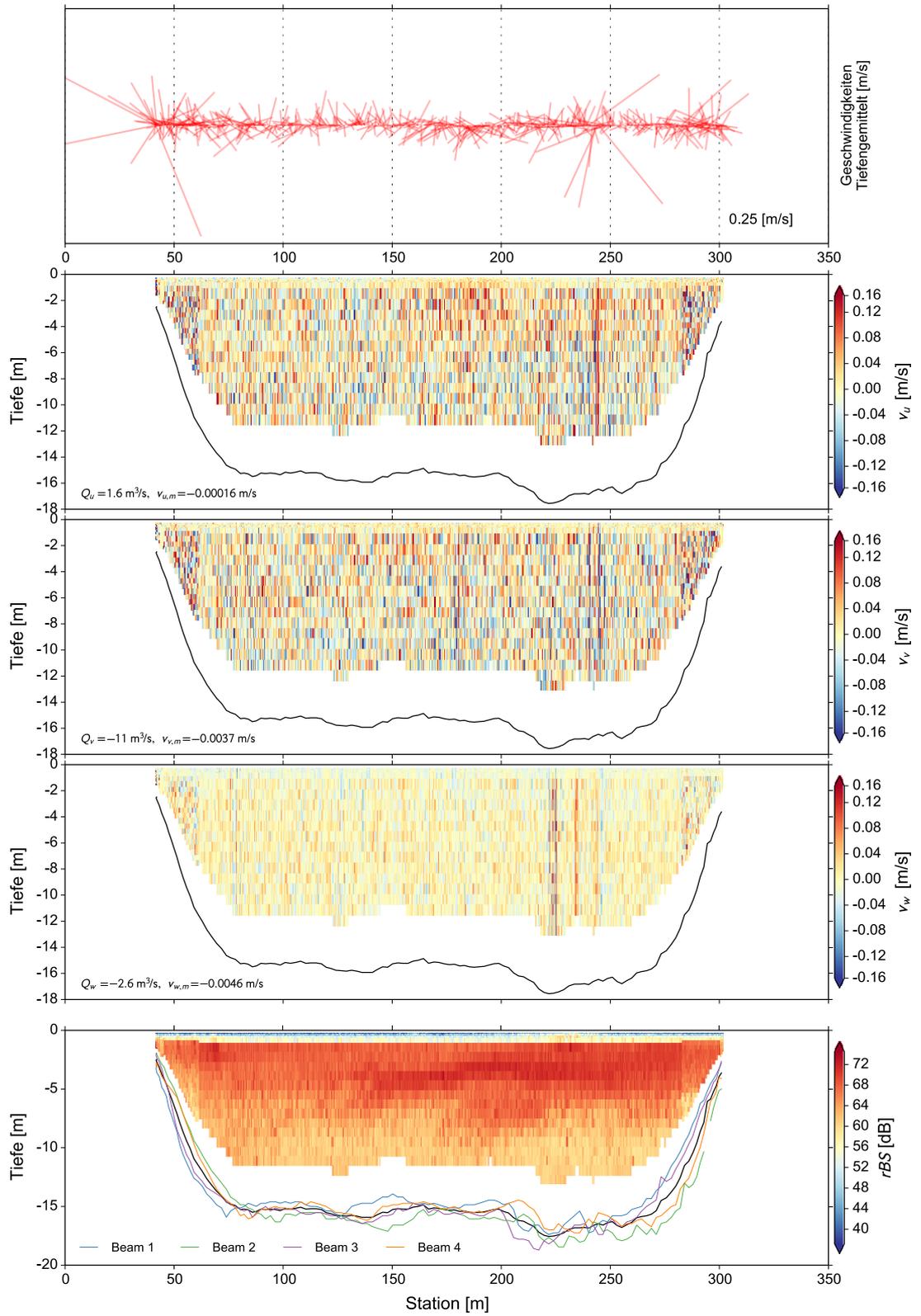
$Q_{TKH}=1.7 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=-0.01 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.013 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-1.7 \text{ m}^3/\text{s}$



**22-P22**

30.07.2013 10:16 – 10:24  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=2.4 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=-0.0069 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=0.013 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=-2.4 \text{ m}^3/\text{s}$

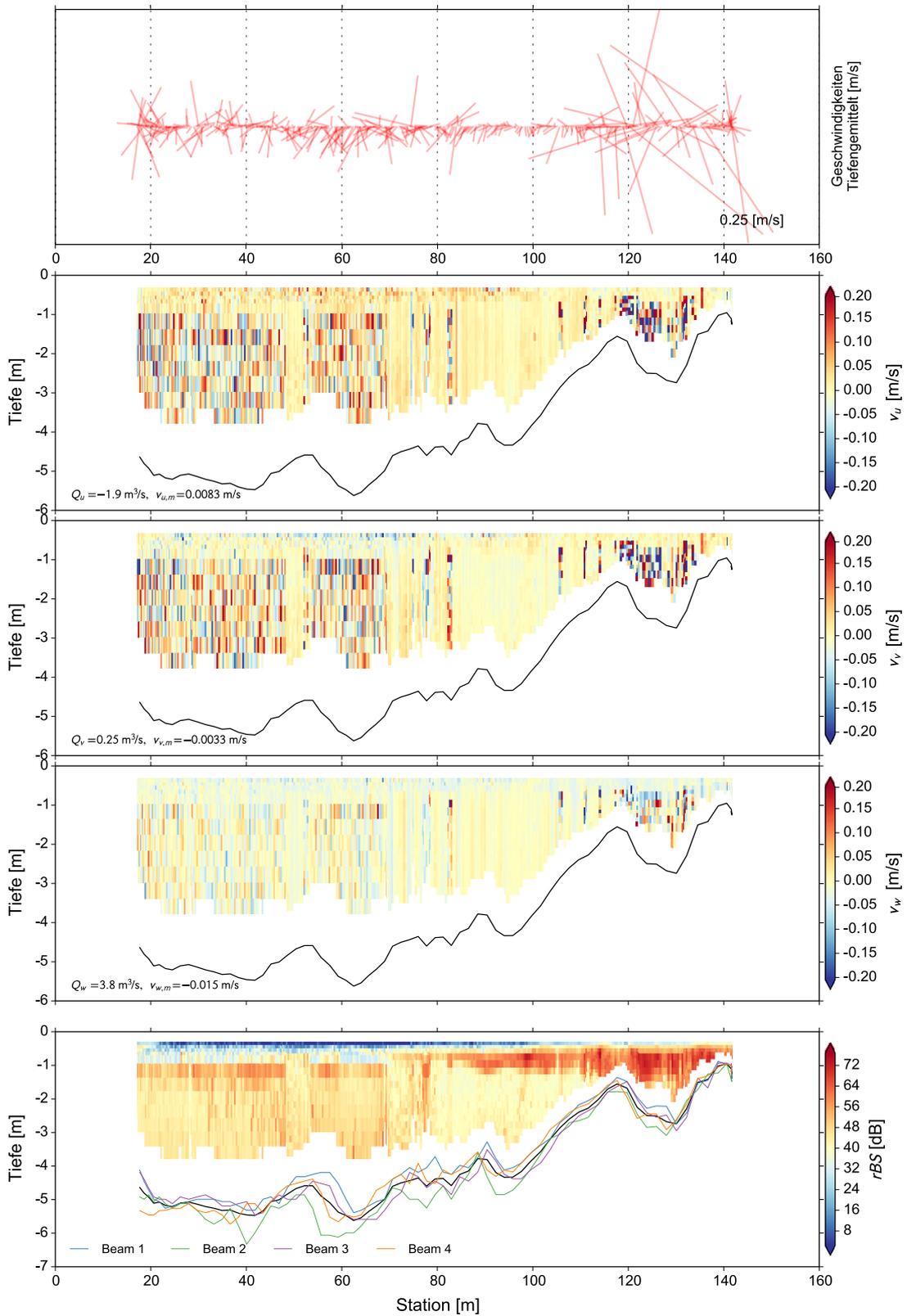


**31-1-E2**

25.09.2013 13:54 – 13:58  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=5.5 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=23 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=42 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=59 \text{ m}^3/\text{s}$

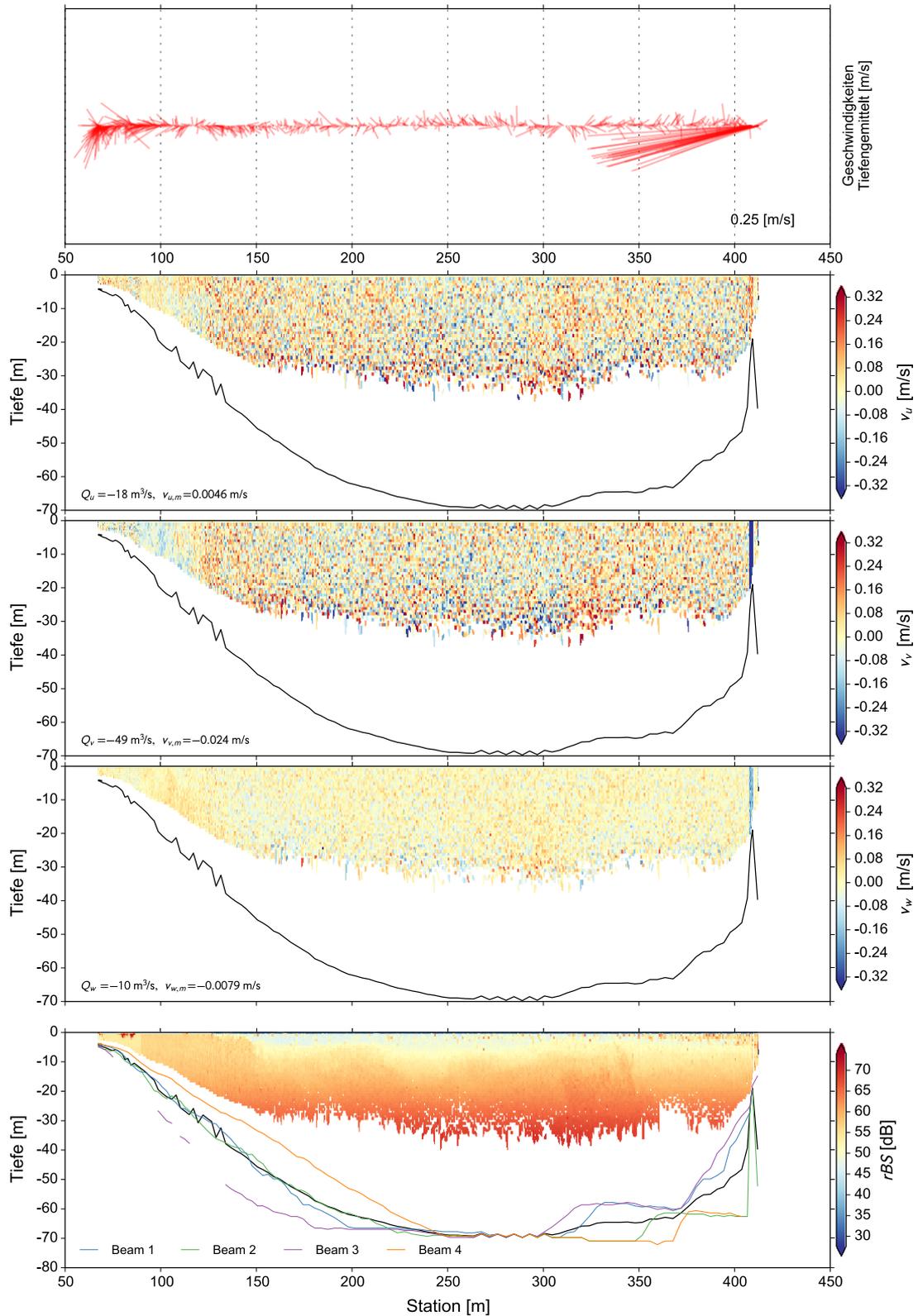


**31-1-P02-1**

25.09.2013 10:16 – 10:27  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=11 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=25 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=51 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=66 \text{ m}^3/\text{s}$

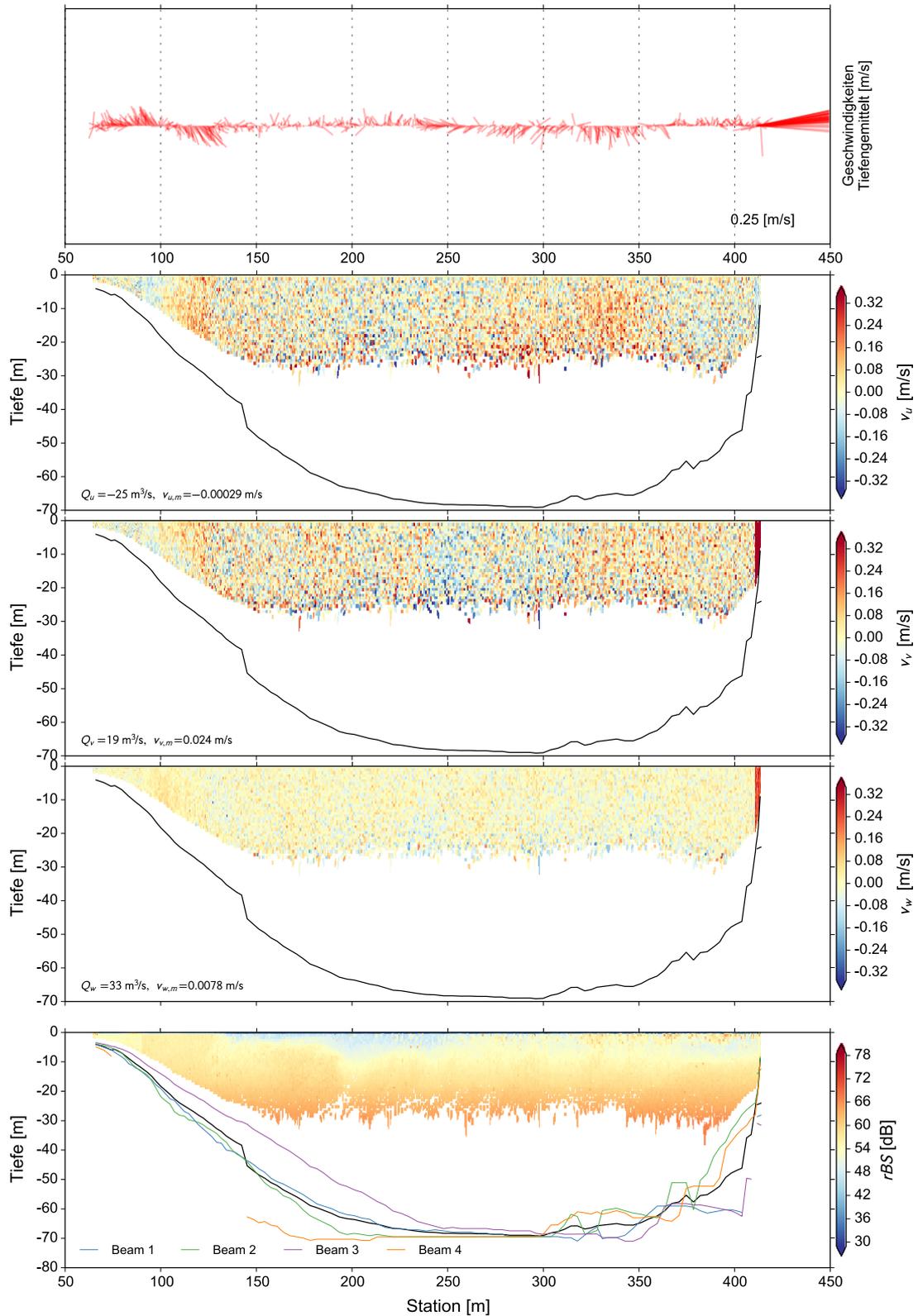


**31-1-P02-2**

25.09.2013 11:02 – 11:13  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=16 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=26 \text{ m}^3/\text{s}$

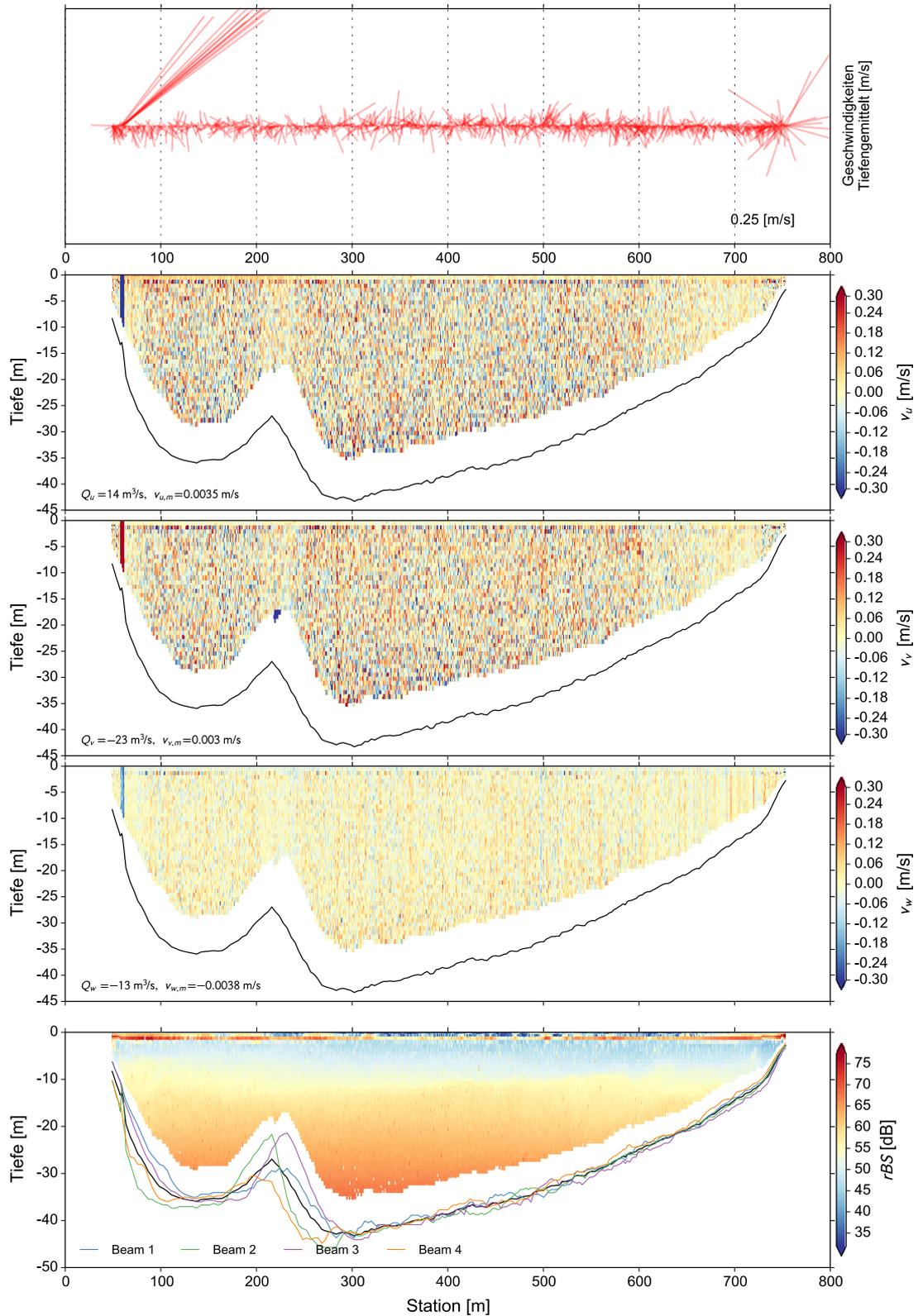
$Q_{TKP}=52 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=62 \text{ m}^3/\text{s}$



**31-1-P18-1**

25.09.2013 14:56 – 15:13  
RDI River Ray

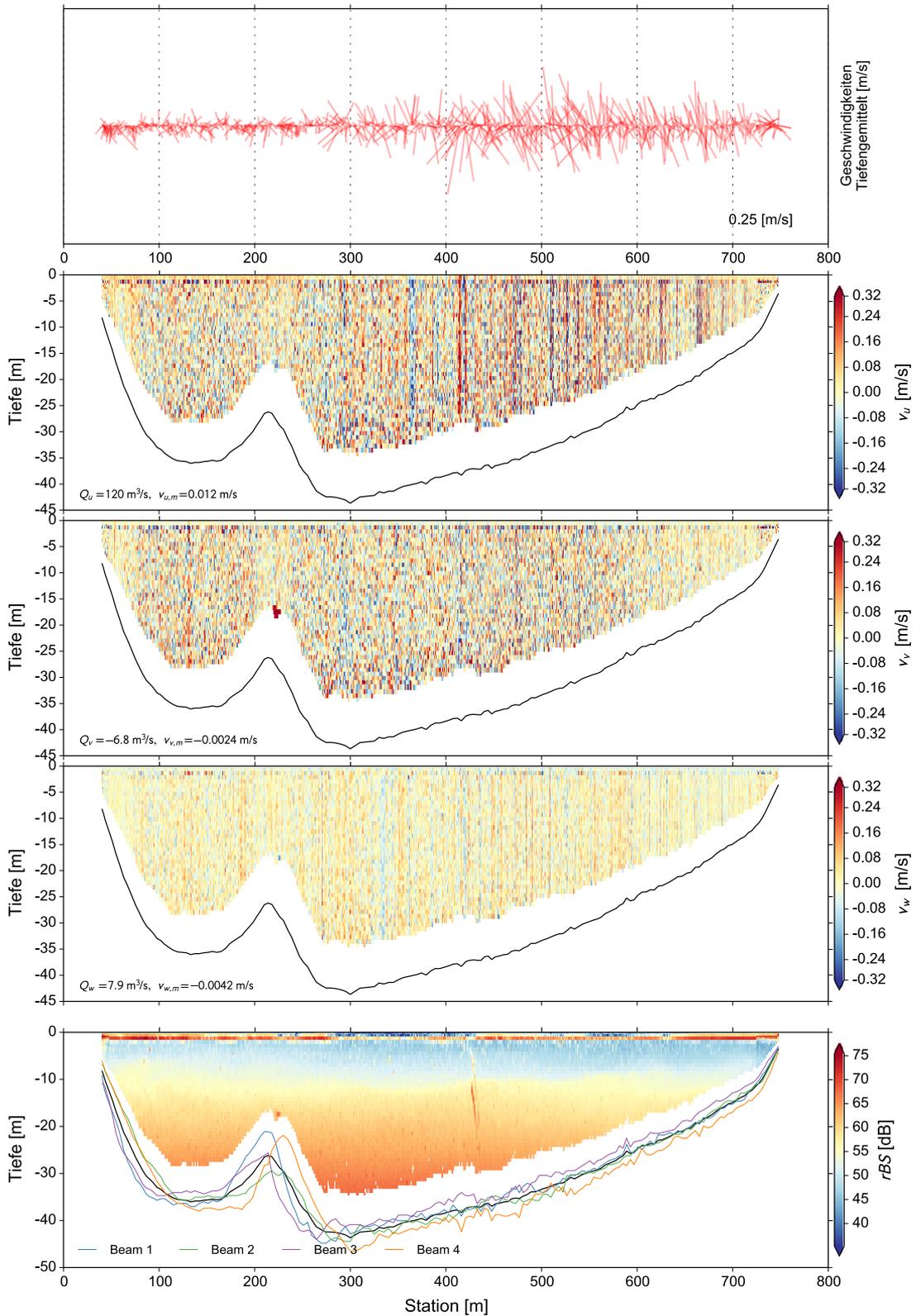
$Q_{TKH}=6.0 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=43 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=18 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=55 \text{ m}^3/\text{s}$



**31-1-P18-2**

25.09.2013 15:13 – 15:25  
RDI River Ray

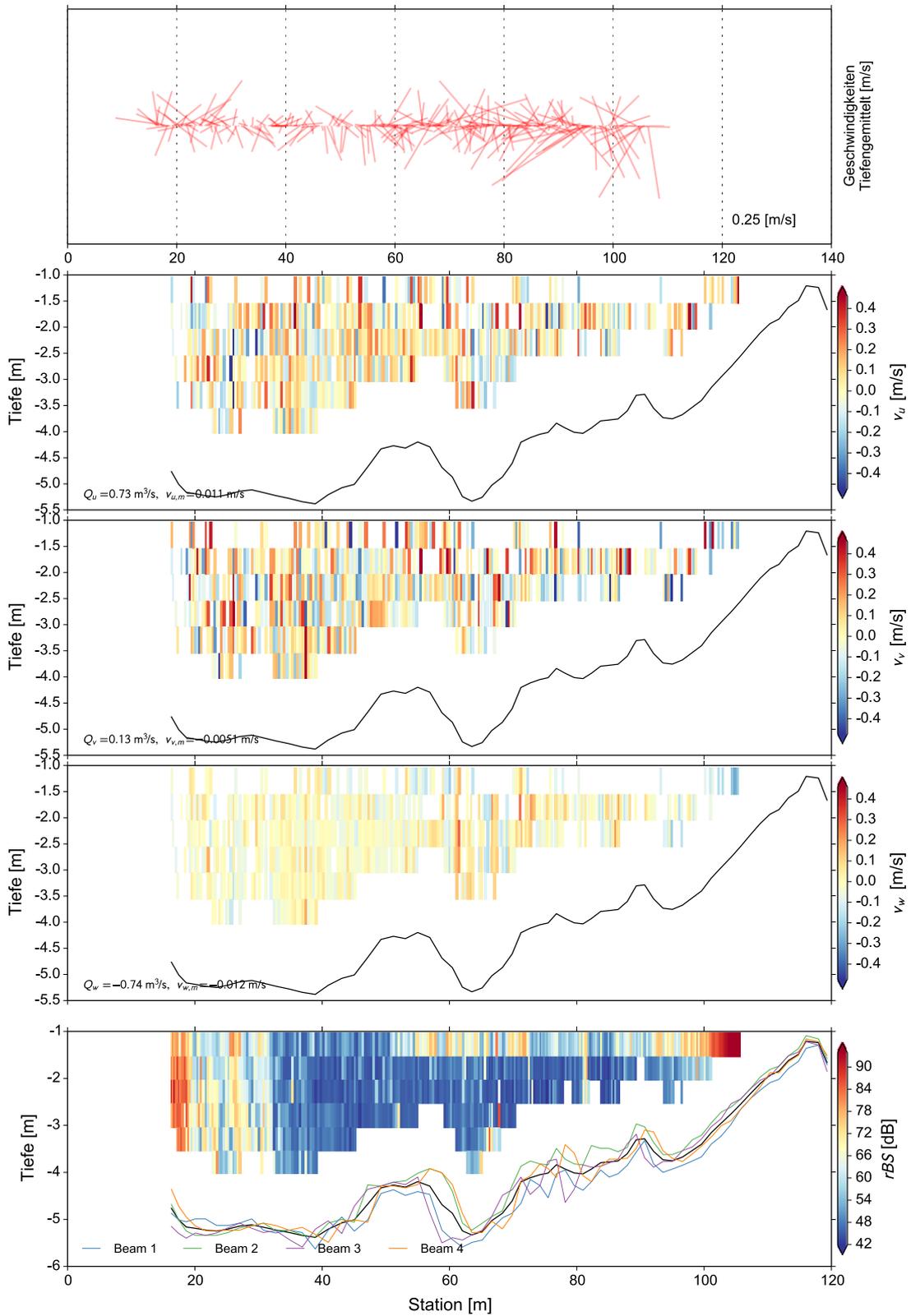
$Q_{TKH}=8.7 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=47 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=18 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=56 \text{ m}^3/\text{s}$



**31-2-E2**

25.09.2013 14:11 – 14:15  
RDI Rio Grande

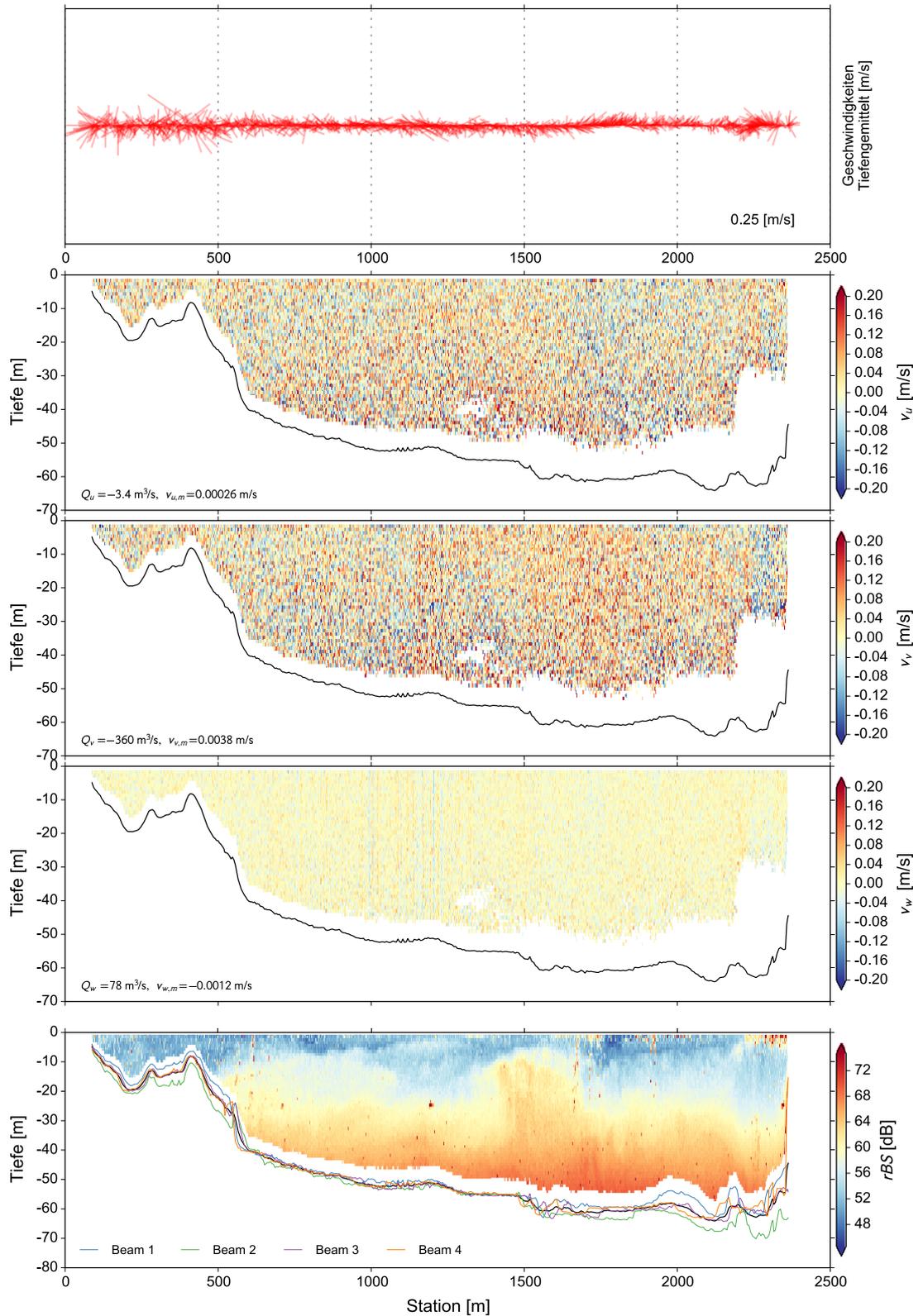
$Q_{TKH}=6.0 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=42 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=12 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=49 \text{ m}^3/\text{s}$



**31-2-L45**

25.09.2013 11:43 – 12:50  
RDI Rio Grande

$Q_{TKH}=20 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=58 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=25 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=64 \text{ m}^3/\text{s}$

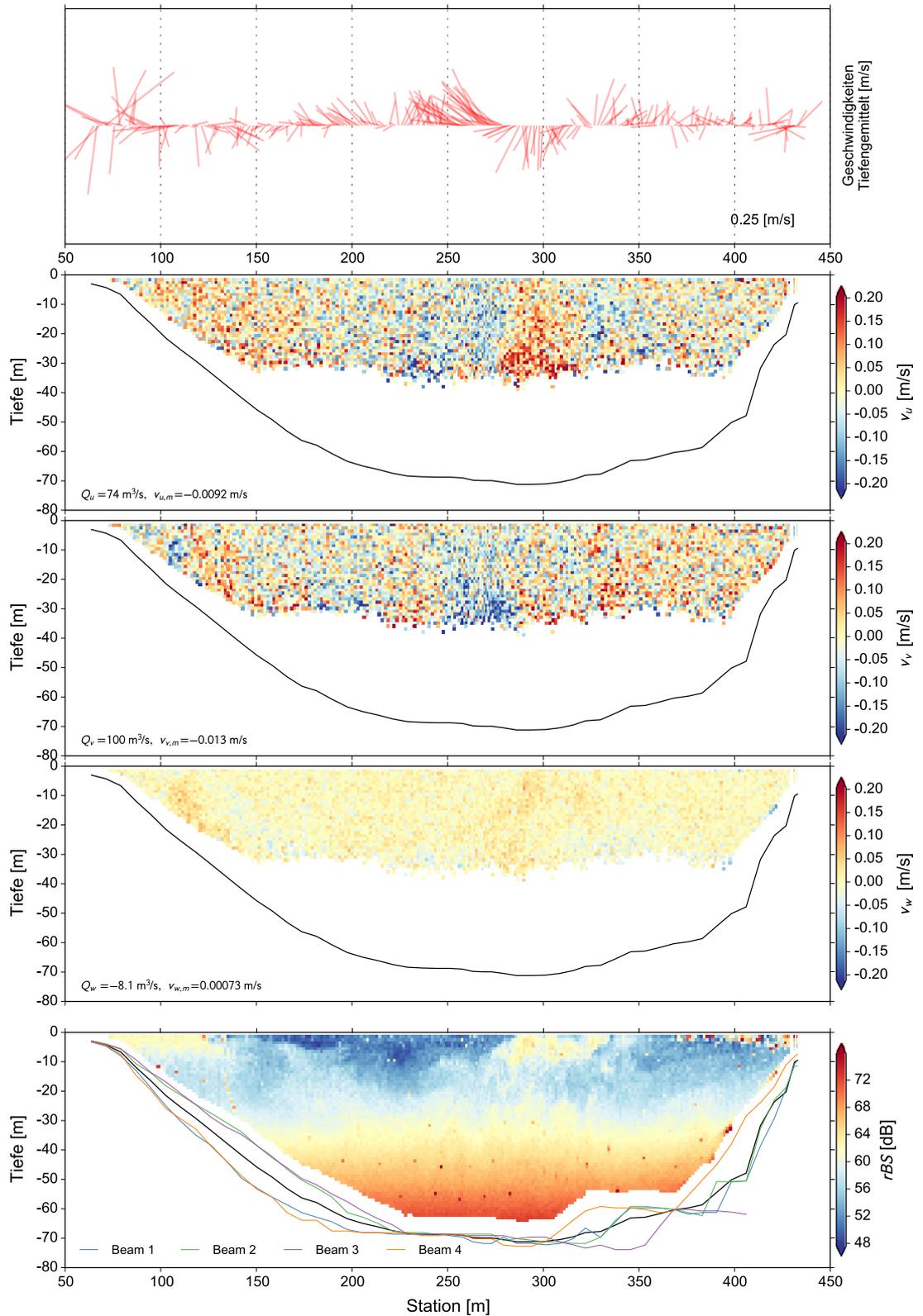


**31-2-P02-1**

25.09.2013 10:30 – 10:40  
RDI Rio Grande

$Q_{TKH}=11 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=25 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=48 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=62 \text{ m}^3/\text{s}$

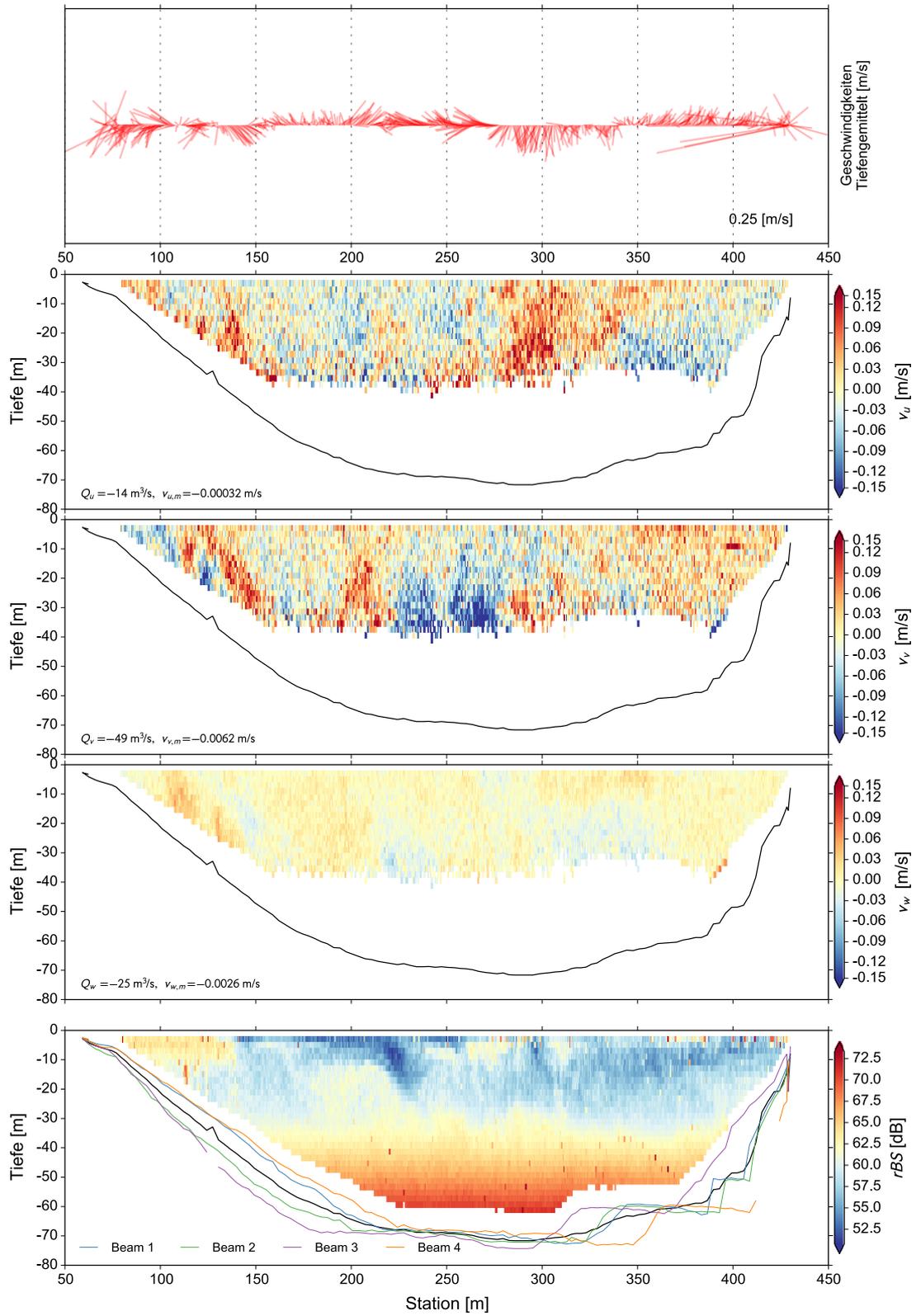


**31-2-P02-2**

25.09.2013 10:47 – 10:59  
RDI Rio Grande

$Q_{TKH}=13 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=25 \text{ m}^3/\text{s}$

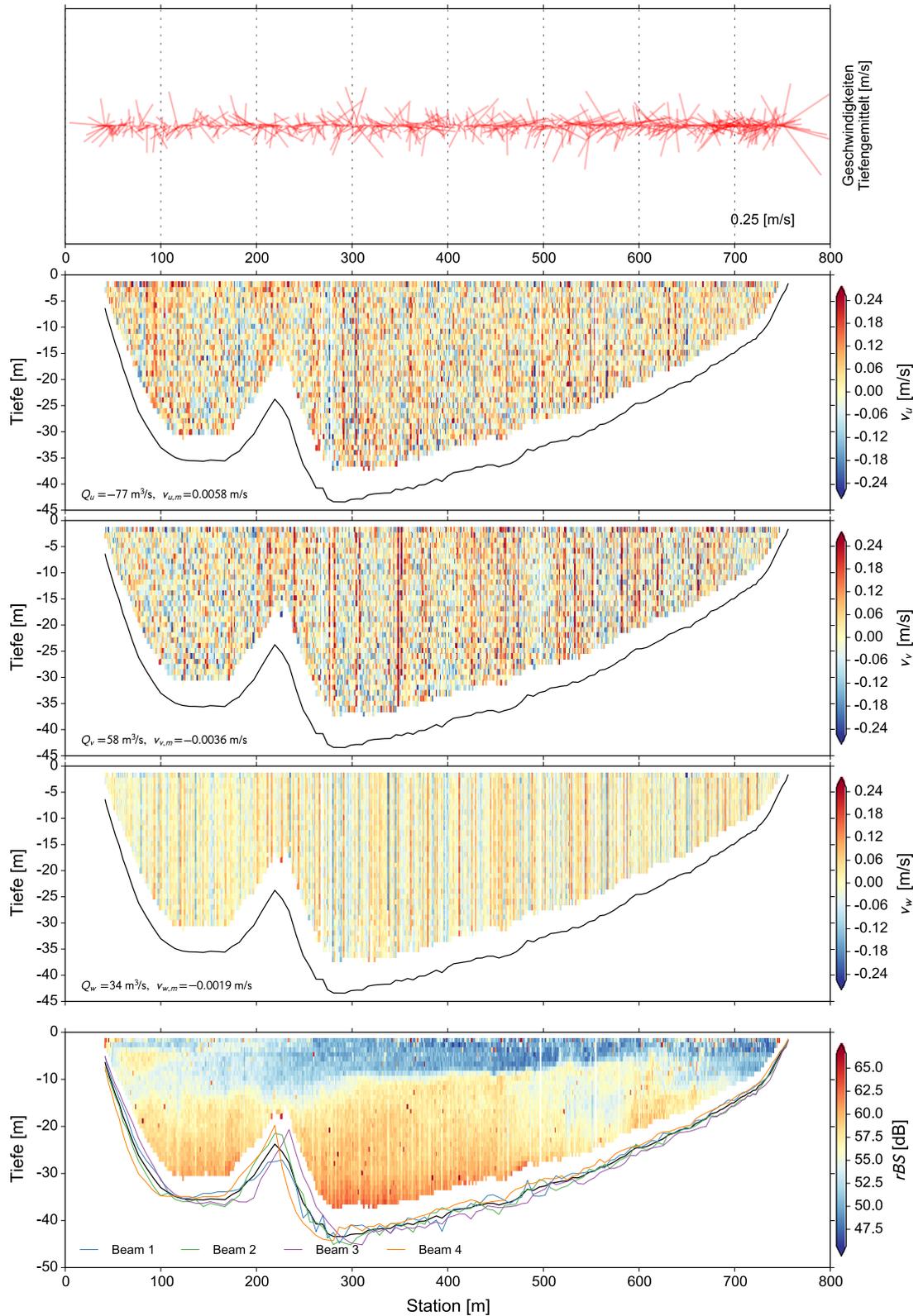
$Q_{TKP}=50 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=62 \text{ m}^3/\text{s}$



**31-2-P18-1**

25.09.2013 14:18 – 14:33  
RDI Rio Grande

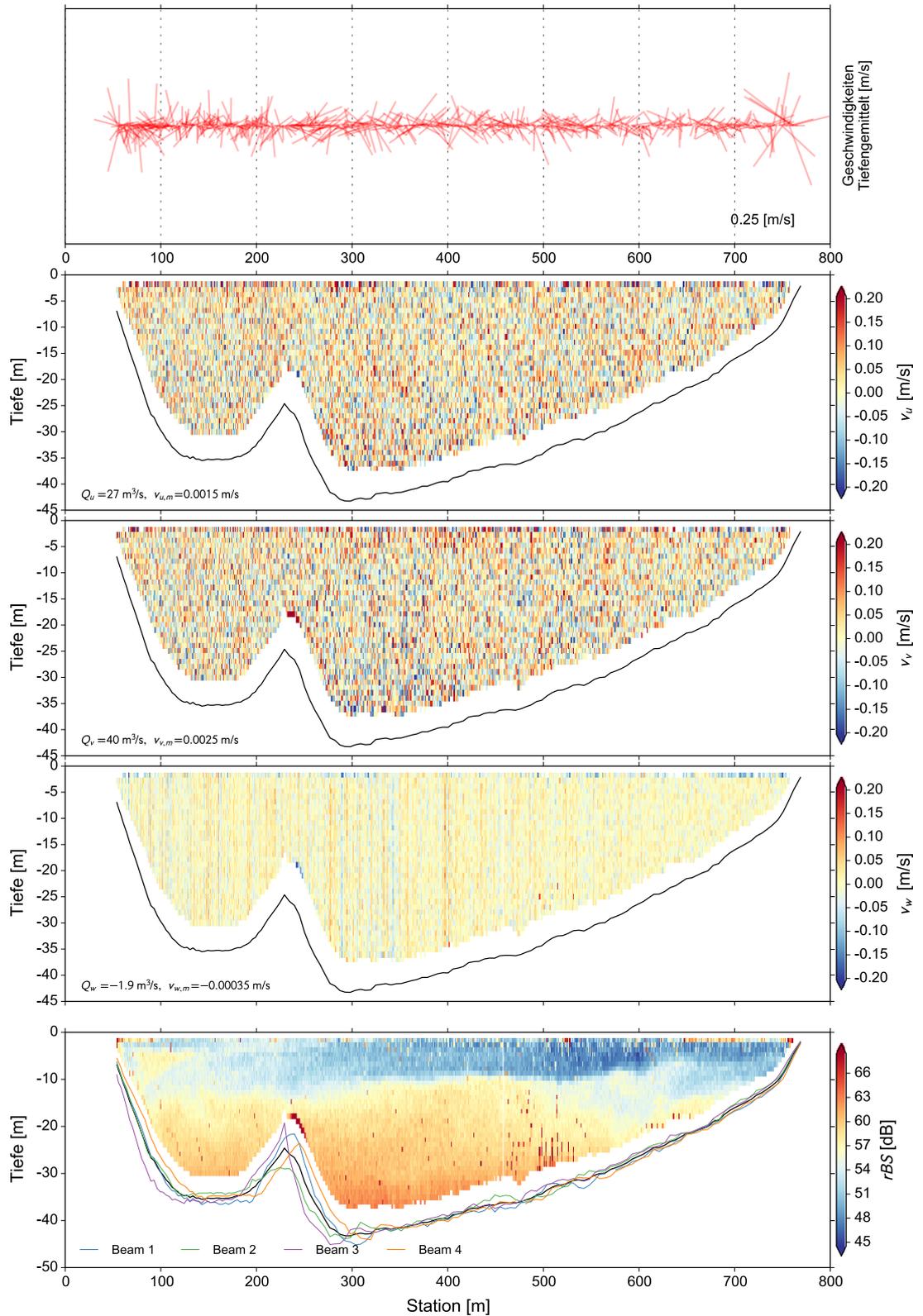
$Q_{TKH}=6.2 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=43 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=12 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=48 \text{ m}^3/\text{s}$



**31-2-P18-2**

25.09.2013 14:37 – 14:53  
RDI Rio Grande

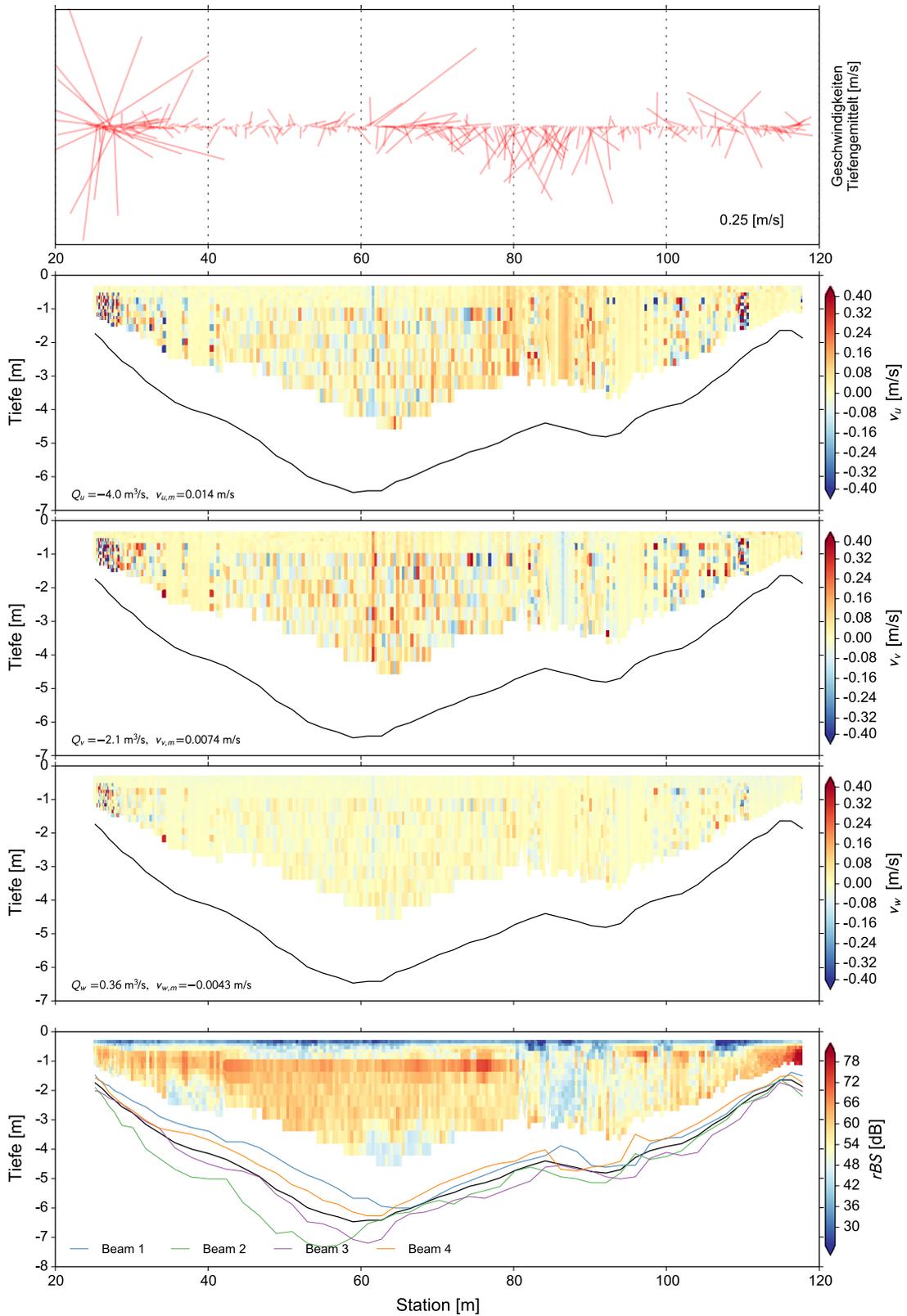
$Q_{TKH}=5.9 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=43 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=25 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=62 \text{ m}^3/\text{s}$



**32-1-E1-1**

26.09.2013 12:30 – 12:33  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=8.6 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=110 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=24 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=130 \text{ m}^3/\text{s}$

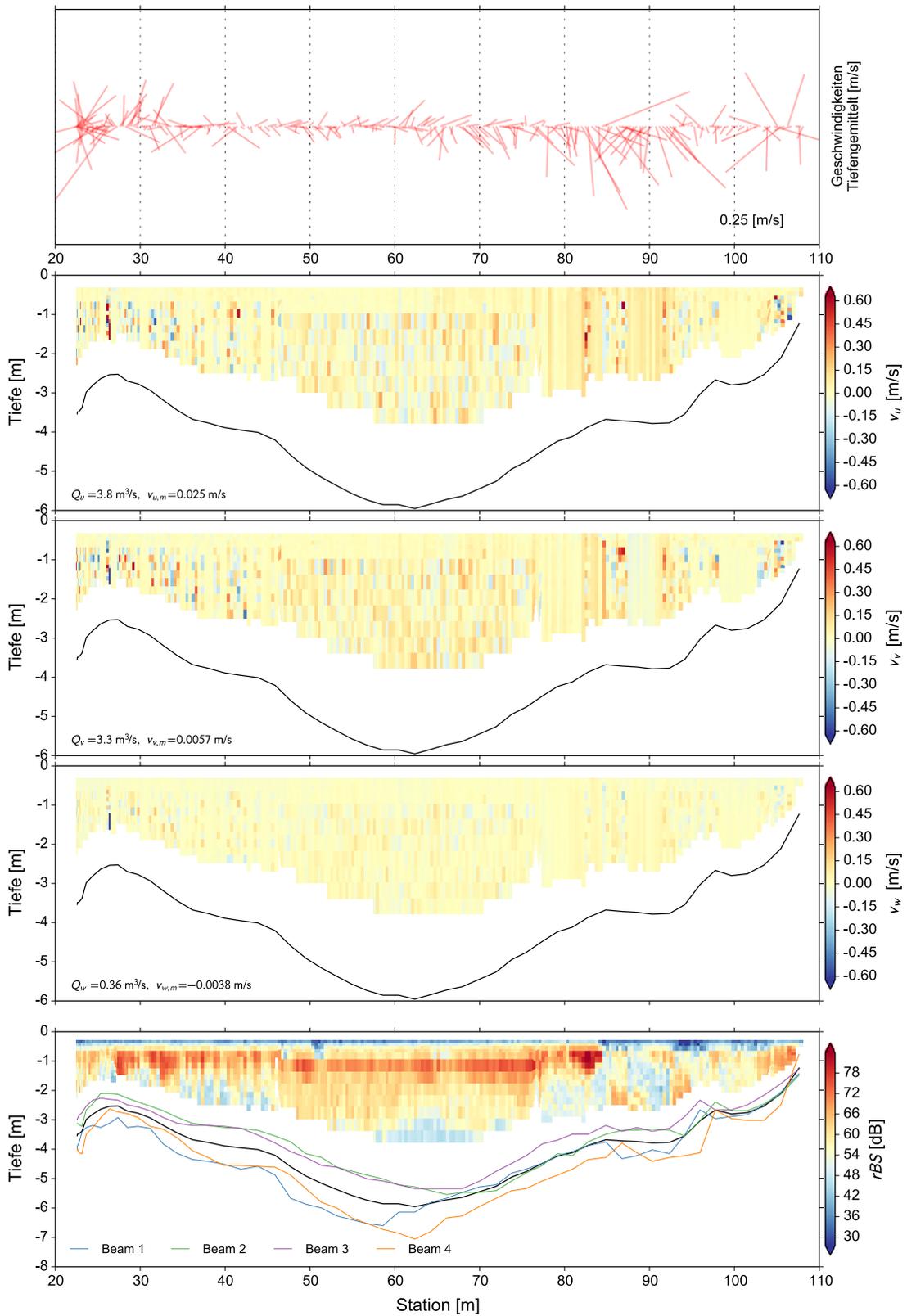


**32-1-E1-2**

26.09.2013 12:35 – 12:38  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=8.0 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=24 \text{ m}^3/\text{s}$

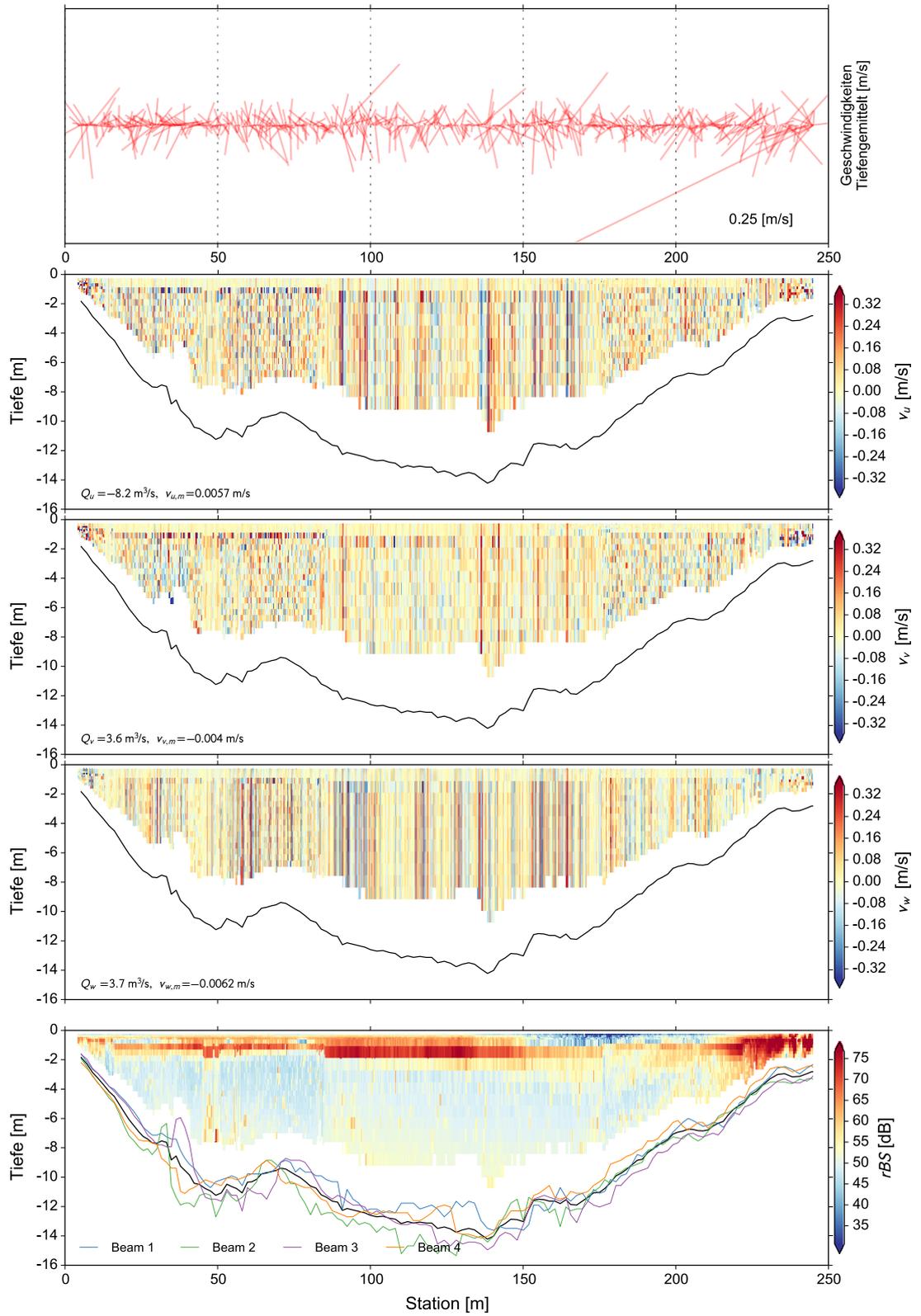
$Q_{TKP}=110 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=130 \text{ m}^3/\text{s}$



**32-1-E3**

26.09.2013 12:52 – 12:59  
RDI River Ray

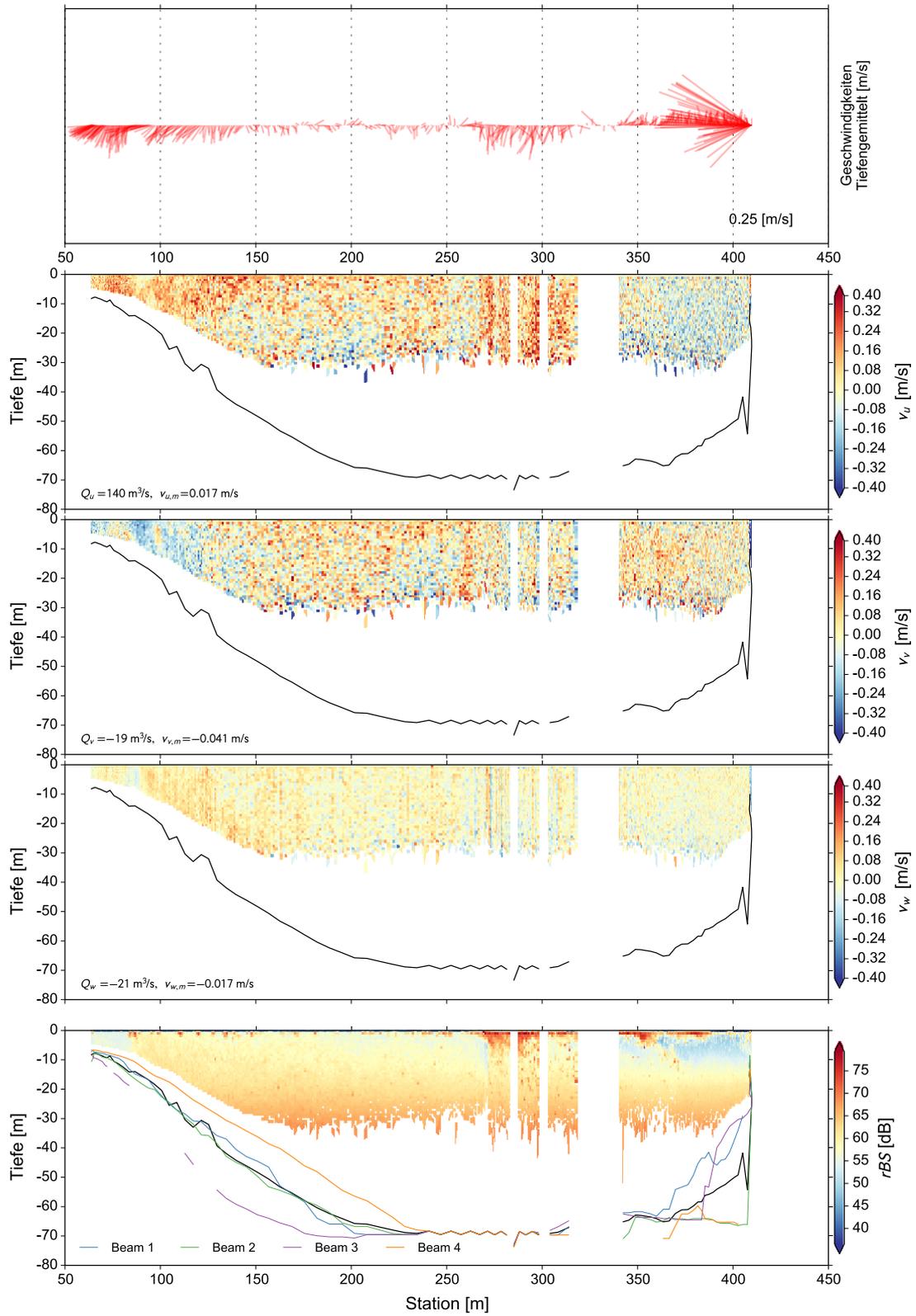
$Q_{TKH}=5.6 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=110 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=19 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=120 \text{ m}^3/\text{s}$



**32-1-P02-1**

26.09.2013 09:21 – 09:31  
RDI River Ray

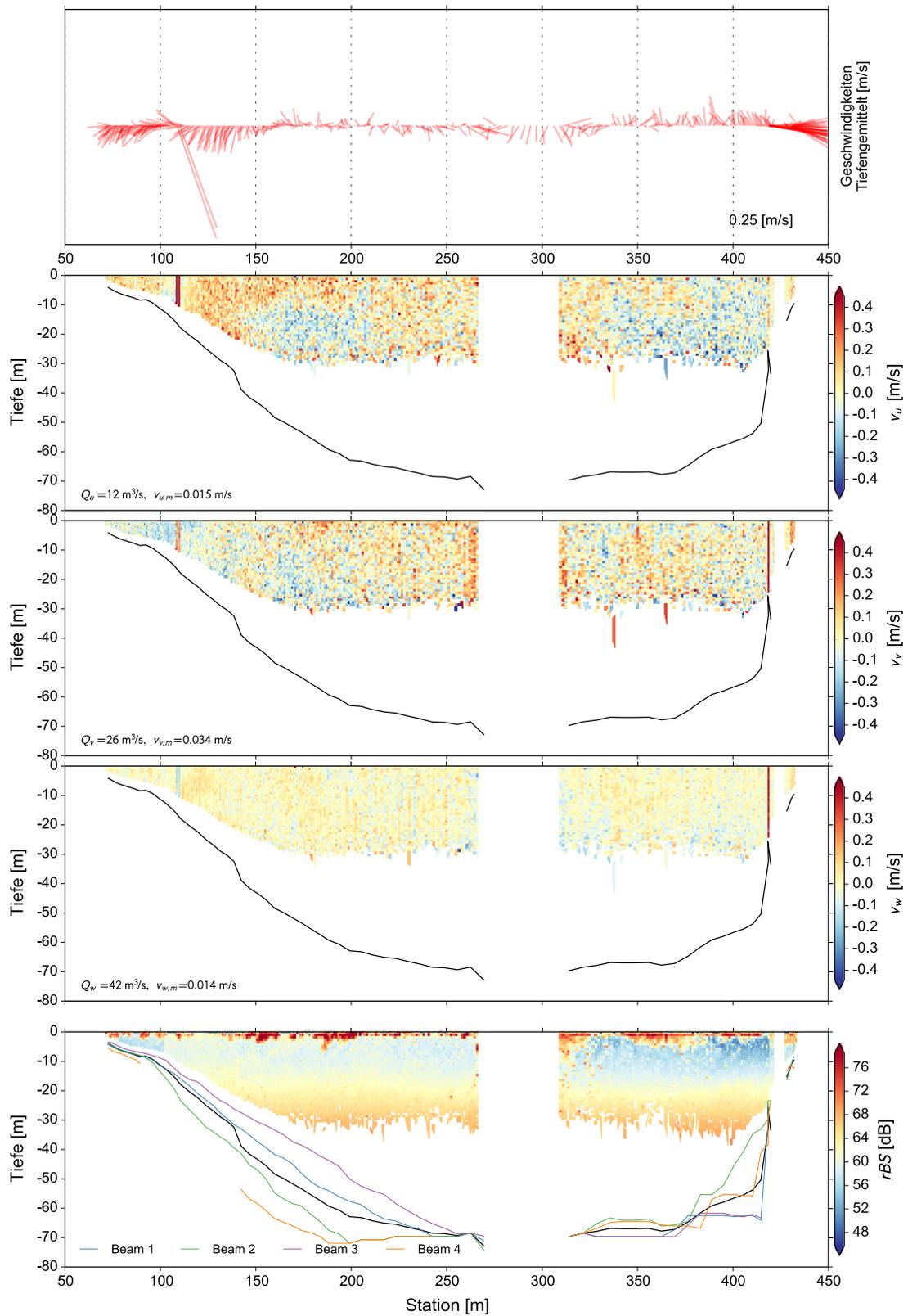
$Q_{TKH}=10.0 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=100 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=23 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=120 \text{ m}^3/\text{s}$



**32-1-P02-2**

26.09.2013 09:32 – 09:39  
RDI River Ray

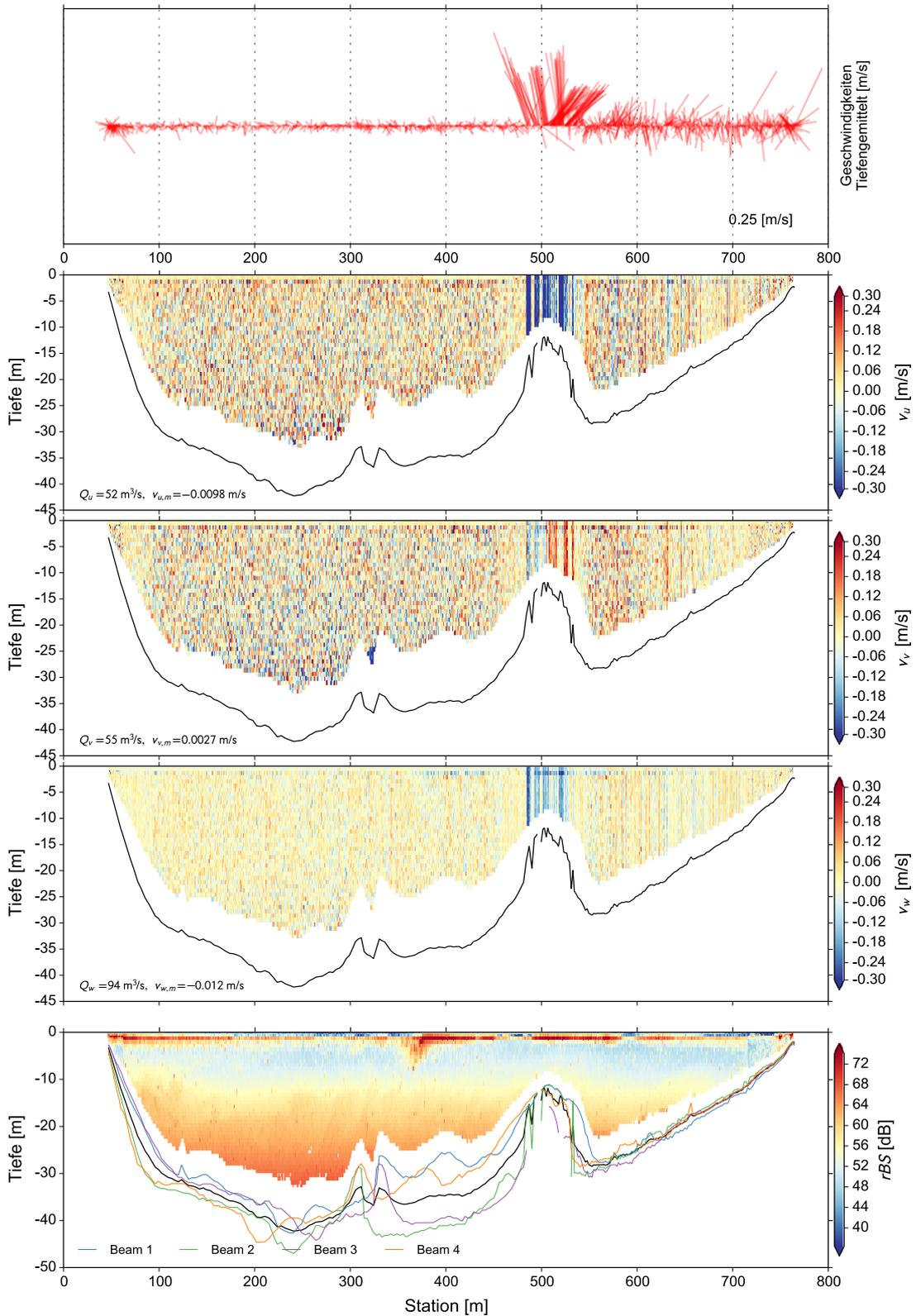
$Q_{TKH}=9.0 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=100 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=23 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=120 \text{ m}^3/\text{s}$



**32-1-P19-1**

26.09.2013 13:16 – 13:35  
RDI River Ray

$Q_{TKH}=5.6 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=89 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=16 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=99 \text{ m}^3/\text{s}$

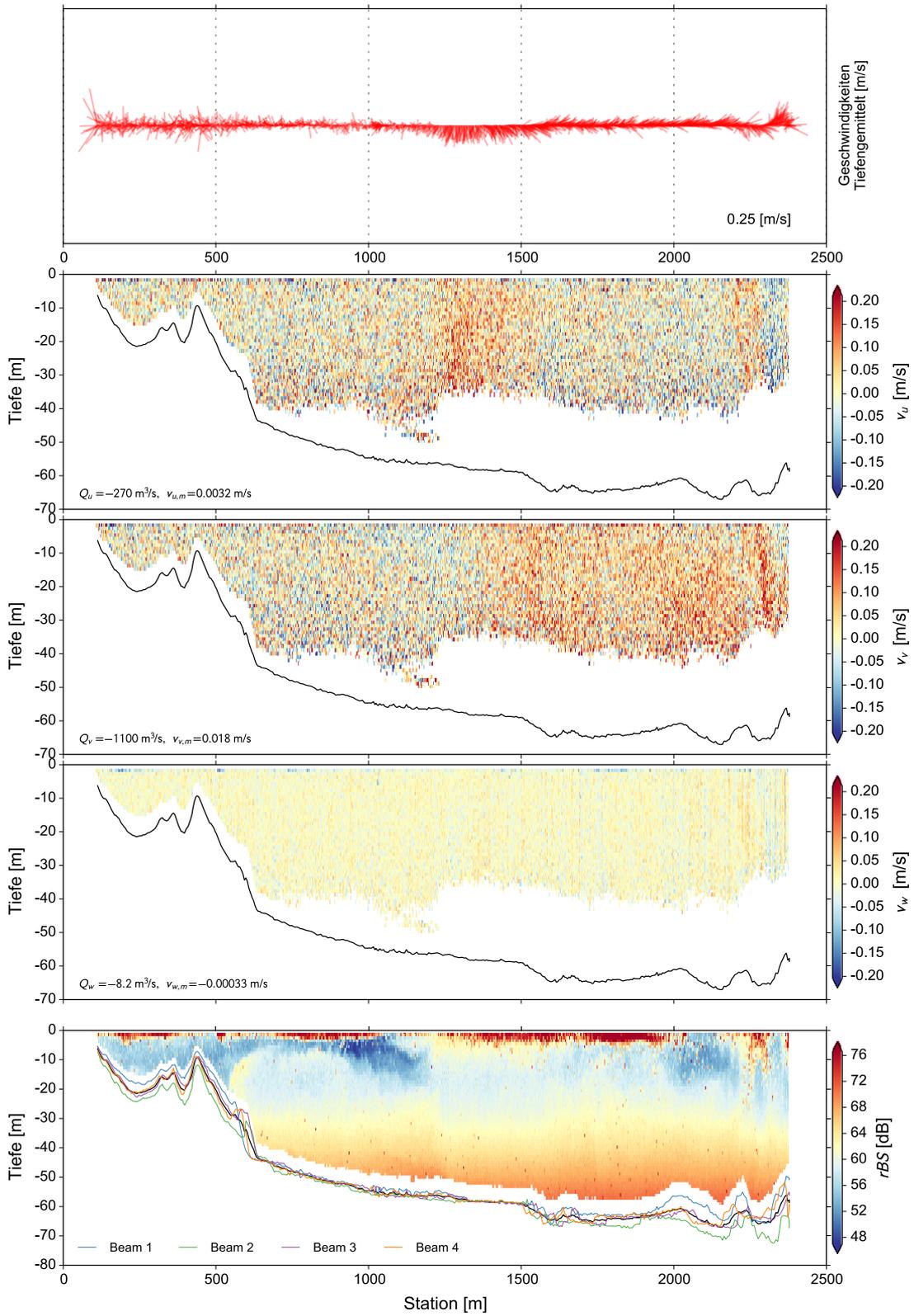


**32-2-L45**

26.09.2013 10:15 – 11:26  
RDI Rio Grande

$Q_{TKH}=12 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=23 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=100 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=110 \text{ m}^3/\text{s}$

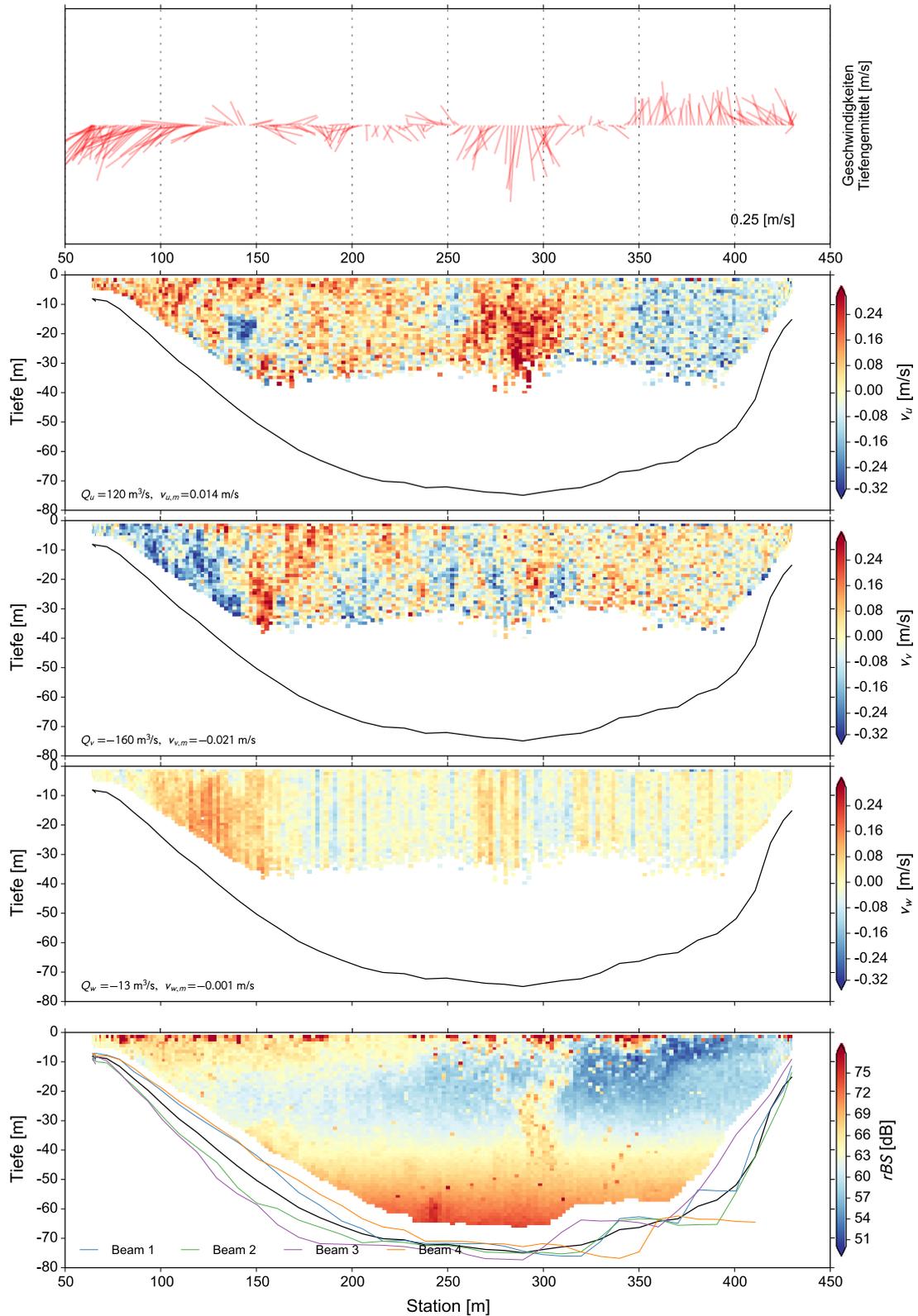


**32-2-P02-1**

26.09.2013 09:00 – 09:07  
RDI Rio Grande

$Q_{TKH}=15 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=26 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=110 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=120 \text{ m}^3/\text{s}$

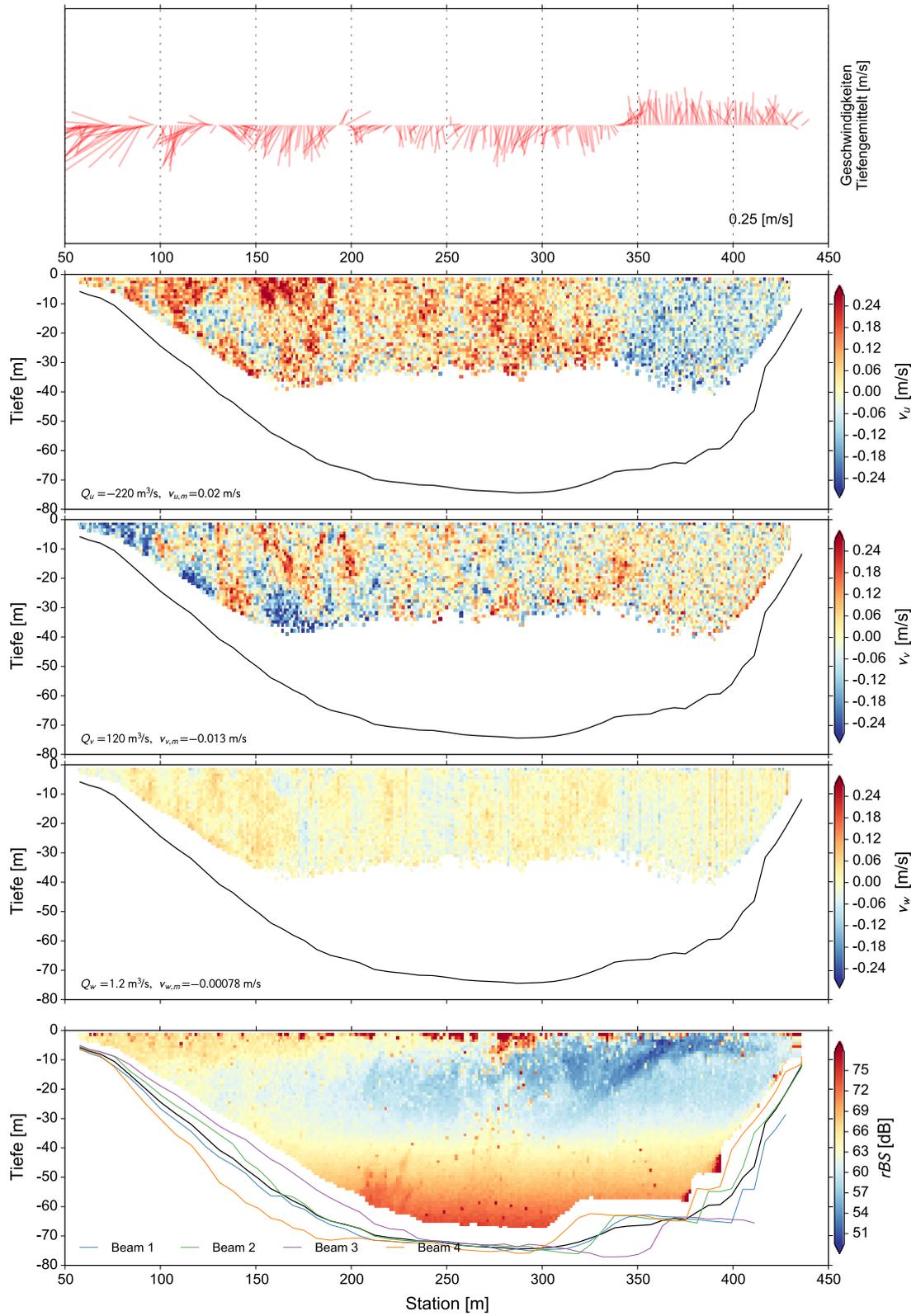


**32-2-P02-2**

26.09.2013 09:07 – 09:16  
RDI Rio Grande

$Q_{TKH}=13 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=24 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=110 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=120 \text{ m}^3/\text{s}$

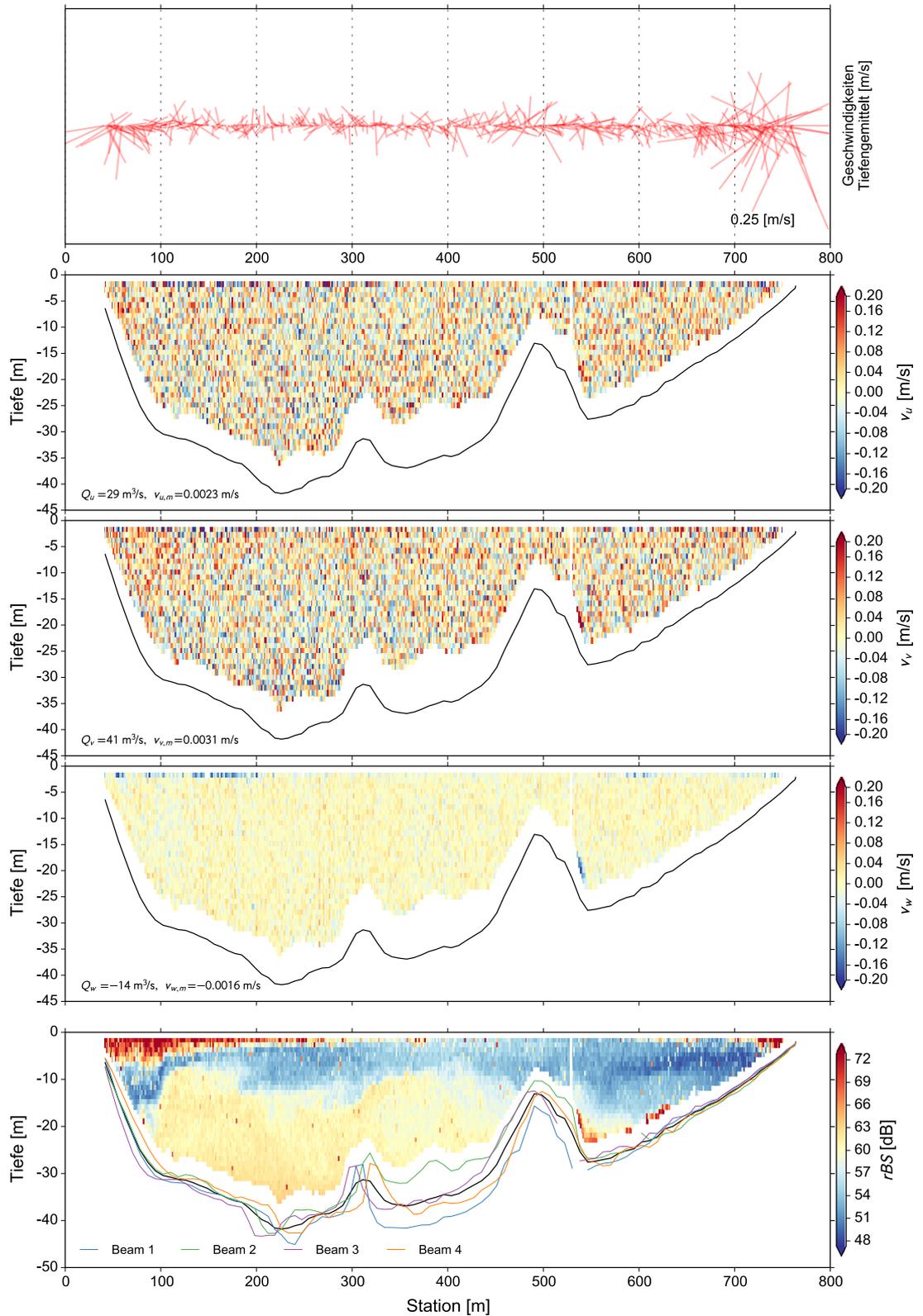


**32-2-P19-1**

26.09.2013 11:40 – 11:57  
RDI Rio Grande

$Q_{TKH}=13 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=24 \text{ m}^3/\text{s}$

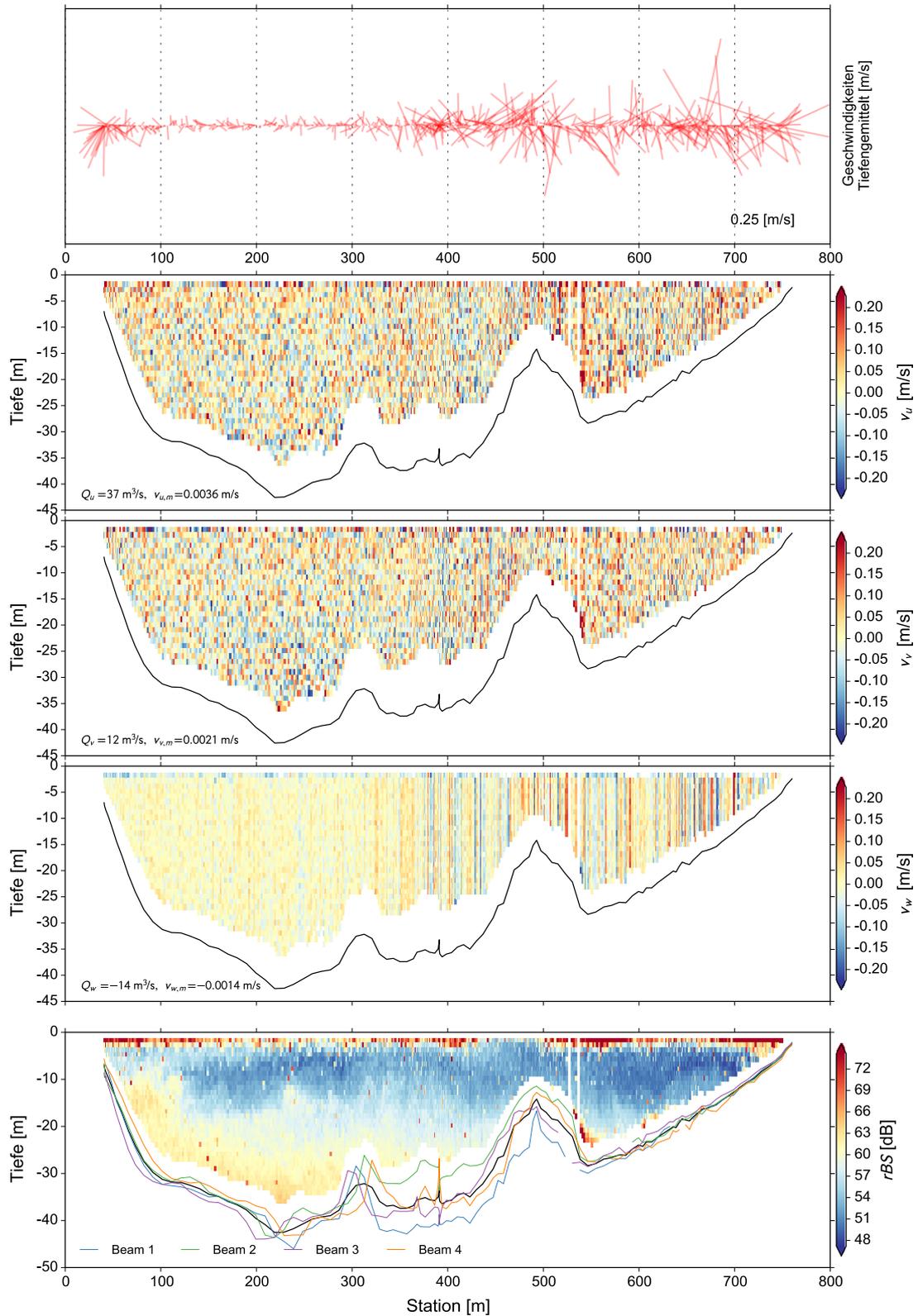
$Q_{TKP}=100 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=110 \text{ m}^3/\text{s}$



**32-2-P19-2**

26.09.2013 13:37 – 13:55  
RDI Rio Grande

$Q_{TKH}=7.2 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{TKP}=84 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=18 \text{ m}^3/\text{s}$      $Q_{ZU-AB}=95 \text{ m}^3/\text{s}$

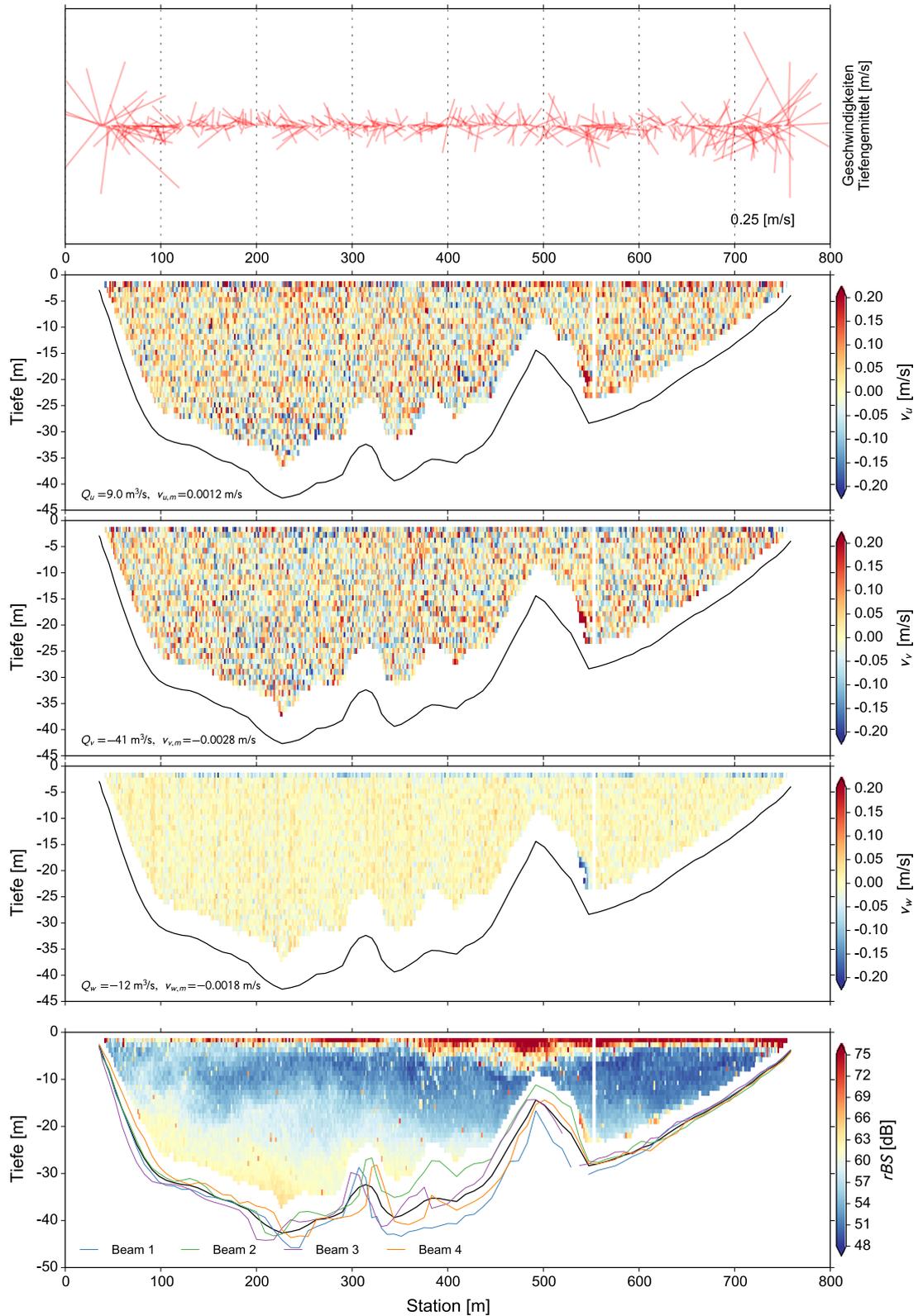


**32-2-P19-4**

26.09.2013 14:33 – 14:44  
RDI Rio Grande

$Q_{TKH}=22 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{TKO}=27 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q_{TKP}=99 \text{ m}^3/\text{s}$   
 $Q_{ZU-AB}=100 \text{ m}^3/\text{s}$



Profil-ID	$v_{m,i}$ [m/s]			$\sigma_i$ [m/s]			$Q_i$ [m <sup>3</sup> /s]		
	$v_{m,u}$	$v_{m,v}$	$v_{m,w}$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	$\sigma_w$	$Q_u$	$Q_v$	$Q_w$
11-P16	0.002	-0.003	-0.006	0.011	0.019	0.017	-24.5	8.2	19.2
11-P17-1	0.004	-0.002	-0.008	0.013	0.015	0.017	-16.3	0.2	11.1
11-P17-2	-0.002	-0.014	-0.007	0.010	0.023	0.015	0.4	5.3	0.7
11-P18-1	0.010	0.004	-0.004	0.015	0.013	0.012	-17.7	-10.0	-1.6
11-P18-2	0.002	-0.010	-0.010	0.012	0.023	0.015	-1.0	3.5	3.3
11-S2019	0.002	0.012	-0.003	0.011	0.021	0.011	-1.0	-5.4	0.2
12-P02	0.005	0.001	0.001	0.023	0.025	0.014	-31.6	-12.1	-17.5
12-P05	-0.011	-0.004	-0.006	0.015	0.032	0.013	109.7	14.1	29.2
12-P10	0.007	-0.007	-0.004	0.015	0.023	0.015	-72.2	-1.8	-9.8
12-P14	-0.002	-0.010	-0.007	0.017	0.027	0.019	-12.1	32.7	24.3
12-P16-2	0.003	-0.000	-0.005	0.027	0.015	0.014	-8.2	5.5	8.2
12-P17-1	0.001	-0.002	-0.006	0.009	0.014	0.012	-13.8	-0.4	6.7
12-P17-2	0.001	-0.020	-0.010	0.012	0.029	0.018	-1.1	8.6	2.4
12-P18	0.000	-0.002	-0.006	0.010	0.010	0.010	-9.3	0.7	3.2
12-P19	-0.001	-0.010	-0.008	0.013	0.013	0.009	-0.4	7.3	4.8
21-L25	0.005	0.012	0.003	0.024	0.022	0.014	231.5	692.7	242.3
21-P02	-0.007	0.001	0.001	0.050	0.046	0.024	25.2	89.1	32.9
22-E4-1	0.005	-0.007	-0.002	0.015	0.016	0.011	-7.4	1.9	-1.8
22-E4-2	-0.006	-0.019	-0.005	0.018	0.020	0.011	0.0	-13.2	0.1
22-E5	0.001	-0.003	-0.004	0.012	0.013	0.009	-1.2	1.5	1.7
22-L45	0.000	0.002	-0.001	0.015	0.016	0.009	66.8	-217.8	-29.4
22-L60	0.007	-0.007	-0.004	0.054	0.032	0.025	317.8	-305.4	-78.4
22-P01	-0.000	0.002	0.002	0.014	0.015	0.010	-9.0	-5.3	-0.7
22-P05	-0.003	0.000	-0.002	0.020	0.021	0.015	62.7	-9.3	-4.7
22-P10	0.002	-0.003	-0.001	0.014	0.018	0.011	-51.6	-12.1	-18.6
22-P15	0.016	-0.000	0.001	0.087	0.030	0.037	-68.9	-36.4	-104.5
22-P17	0.003	-0.006	-0.004	0.022	0.023	0.018	-25.7	1.6	14.7
22-P18	-0.000	-0.005	-0.000	0.015	0.020	0.014	19.2	-8.6	-20.1
22-P22	0.002	0.000	-0.003	0.008	0.008	0.007	7.5	2.1	-0.4
31-1-E2	0.003	-0.004	-0.011	0.009	0.010	0.009	-0.8	0.7	2.9
31-1-P18-1	0.002	-0.002	-0.002	0.023	0.026	0.014	-31.1	-25.5	-21.8
31-1-P18-2	-0.004	-0.010	-0.005	0.016	0.021	0.015	-35.3	-93.6	-11.7
31-1-P02-1	-0.017	-0.009	-0.008	0.072	0.035	0.032	-43.7	-25.4	-23.7
31-1-P02-2	0.017	0.003	0.007	0.087	0.041	0.051	26.8	43.6	40.0
31-2-E2	0.002	-0.003	-0.009	0.035	0.039	0.021	0.5	-0.4	-1.4
31-2-L45	0.001	0.002	-0.001	0.015	0.016	0.007	-49.3	-249.7	30.0

Fortsetzung auf nächster Seite

Profil-ID	$v_{m,i}$ [m/s]			$\sigma_i$ [m/s]			$Q_i$ [m <sup>3</sup> /s]		
	$v_{m,u}$	$v_{m,v}$	$v_{m,w}$	$\sigma_u$	$\sigma_v$	$\sigma_w$	$Q_u$	$Q_v$	$Q_w$
31-2-P02-1	-0.006	0.002	-0.000	0.020	0.019	0.007	88.2	-35.7	4.0
31-2-P02-2	-0.004	-0.000	-0.002	0.027	0.020	0.010	-62.0	-0.5	-34.0
31-2-P18-1	-0.005	-0.005	-0.003	0.014	0.013	0.010	88.5	84.4	52.1
31-2-P18-2	0.001	-0.001	0.000	0.011	0.011	0.006	13.7	-22.2	0.6
32-1-E1-1	0.009	0.004	-0.003	0.020	0.017	0.011	-3.0	-1.7	-0.1
32-1-E1-2	0.014	0.009	0.002	0.019	0.013	0.011	2.8	2.5	1.1
32-1-E3	-0.001	-0.004	-0.004	0.015	0.016	0.014	1.9	6.1	3.2
32-1-P02-1	-0.031	-0.015	-0.019	0.098	0.054	0.041	-37.9	-82.7	-57.1
32-1-P02-2	0.025	0.001	0.011	0.112	0.051	0.059	7.7	-30.2	22.7
32-1-P19-1	0.001	0.005	-0.007	0.024	0.042	0.015	46.4	-8.2	68.1
32-2-L45	0.003	0.010	0.002	0.019	0.022	0.008	-371.0	-987.5	-213.0
32-2-P02-1	-0.010	-0.009	-0.004	0.029	0.044	0.019	-138.3	-139.8	-68.0
32-2-P02-2	-0.008	-0.010	-0.003	0.028	0.042	0.012	136.5	177.1	55.1
32-2-P19-1	0.002	-0.001	-0.001	0.011	0.010	0.005	21.4	-15.0	-7.5
32-2-P19-2	0.001	-0.002	-0.001	0.012	0.012	0.009	0.2	-28.7	-11.9
32-2-P19-4	-0.003	-0.001	-0.001	0.011	0.011	0.006	-46.0	-11.7	-11.8

**Tabelle A.2:** Medianwerte, Standardabweichungen und Durchflüsse der Geschwindigkeitsvektoren aller gemessenen ADCP-Profile in m/s bzw. m<sup>3</sup>/s

## A.3 Schwebstoffproben

Proben-ID	SSC [mg/l]	Tiefe [m]	Profil	lokale Position ( $X_v$ ) [m]	Bestimmung der lok. Pos.
12-P2-0	27.0	6.0	P2	269	○
12-P2-1	24.6	18.0	P2	269	○
12-P2-2	31.9	28.0	P2	269	○
12-P2-3	30.7	40.0	P2	269	○
12-P10-4	25.9	4.0	P10	422	○
12-P10-5	26.5	10.0	P10	422	○
12-P10-6	29.2	16.0	P10	422	○
12-P10-7	31.0	26.0	P10	422	○
12-P16-8	18.4	5.0	P16	624	○
12-P16-9	21.6	2.5	P16	275	○
12-P16-10	26.3	6.0	P16	275	○
12-P16-11	24.2	9.0	P16	275	○
12-P16-12	26.0	12.0	P16	275	○
12-P16-13	22.9	16.0	P16	275	○
12-P16-14	23.1	20.0	P16	275	○
12-P17-15	20.0	6.0	P17	450	○
12-P17-16	22.6	2.0	P17	450	○
12-P17-17	27.1	12.0	P17	450	○
12-P17-18	19.6	1.5	P17	630	○
12-P17-19	20.0	3.5	P17	630	○
12-P17-20	22.6	6.0	P17	630	○
12-P18-21	17.9	0.6	P18	521	○
12-P18-22	22.4	2.5	P18	521	○
12-P18-23	28.2	4.5	P18	521	○
12-P18-24	18.2	1.2	P18	300	○
12-P18-25	33.7	3.5	P18	300	○
12-P18-26	20.8	10.0	P18	300	○
22-P18-27	28.1	3.0	P18	638	○
22-P18-28	22.1	10.0	P18	638	○
22-P18-29	16.1	2.0	Bucht Zuleitung		—
22-P17-30	27.3	3.0	P17	674	○
22-P17-31	31.3	10.0	P17	674	○
22-P17-32	26.3	15.0	P17	674	○
22-P17-33	21.7	3.0	P17	507	○

Fortsetzung auf nächster Seite

Proben-ID	SSC [mg/l]	Tiefe [m]	Profil	lokale Position ( $X_v$ ) [m]	Bestimmung der lok. Pos.
22-P17-34	14.5	10.0	P17	507	○
22-P17-35	25.9	15.0	P17	507	○
22-P17-36	19.6	22.0	P17	507	○
22-P15-37	26.9	3.0	P15	398	○
22-P15-38	23.2	10.0	P15	398	○
22-P15-39	25.4	20.0	P15	398	○
22-P15-40	34.9	30.0	P15	398	○
22-P10-41	17.3	3.0	P10	382	○
22-P10-42	19.0	10.0	P10	382	○
22-P10-43	16.9	20.0	P10	382	○
22-P10-44	17.4	30.0	P10	382	○
22-P10-45	15.6	39.5	P10	382	○
22-P5-46	23.0	2.5	P5	342	○
22-P5-47	14.2	7.5	P5	342	○
22-P5-48	17.8	10.0	P5	342	○
22-P5-49	19.2	20.0	P5	342	○
22-P5-50	30.8	40.0	P5	342	○
22-P5-51	30.5	30.0	P5	342	○
22-P5-52	16.2	0.0	Stauwurzel	ÜL	—
31-P2-53	12.0	2.0	P2	289	○
31-P2-54	14.8	8.0	P2	289	○
31-P2-55	15.5	14.0	P2	289	○
31-P18-56	18.3	15.0	P18	297	◇
31-P18-57	20.2	18.0	P18	297	◇
31-P18-58	21.3	25.0	P18	297	◇
31-P18-59	12.5	5.0	P18	606	*
31-P18-60	13.2	10.0	P18	606	*
31-P18-61	16.5	15.0	P18	606	*
31-P18-62	12.0	5.0	P18	228	◇
31-P18-63	16.4	10.0	P18	228	◇
31-L45-64	16.2	25.0	L45	1910	○
32-P2-65	16.7	5.0	P2	358	○
32-P2-66	17.3	10.0	P2	358	○
32-P2-67	18.8	15.0	P2	358	○
32-P2-68	18.9	20.0	P2	358	○
32-P2-69	15.5	35.0	P2	358	○
32-L45-70	13.5	2.0	L45	1289	○ / Uhrzeit

Fortsetzung auf nächster Seite

Proben-ID	SSC [mg/l]	Tiefe [m]	Profil	lokale Position ( $X_v$ ) [m]	Bestimmung der lok. Pos.
32-L45-71	15.6	9.0	L45	1015	○
32-E1-72	13.2	1.2	E1	66	○
32-E1-73	12.9	2.5	E1	66	○
32-E1-74	14.7	0.5	E1	66	○
32-E1-75	14.3	4.2	E1	66	○
32-P19-76	12.3	1.5	P19	226	○
32-P19-77	15.6	5.0	P19	226	○
32-P19-78	15.0	10.0	P19	226	○
32-P19-79	16.2	15.0	P19	226	○
32-P19-80	14.3	20.0	P19	226	○
32-P19-81	15.6	30.0	P19	226	○

○ ... via differentielltem GPS, \* ... via Handheld GPS, ◇ ... geschätzt

**Tabelle A.3:** Ergebnisse der Laborauswertung der Schwebstoffproben

## A.4 Berechnete profilweise Schwebstoffkonzentrationen

Profil-ID	inkl. Ausreißer				exkl. Ausreißer			
	<i>A</i>	<i>B</i>	$R^2$	<i>n</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	$R^2$	<i>n</i>
12-P02	1.18	0.004	0.14	3	1.01	0.008	1.00	2
12-P10	0.62	0.014	0.82	4	0.62	0.014	0.82	4
12-P16-2	2.40	-0.018	0.72	7	2.40	-0.018	0.72	7
12-P17-1	1.79	-0.007	0.20	6	1.79	-0.007	0.20	6
12-P18	1.96	-0.010	0.04	6	1.96	-0.010	0.04	6
22-P18	0.44	0.015	1.00	2	0.44	0.015	1.00	2
22-P17	1.03	0.005	0.02	7	1.03	0.005	0.02	7
22-P15	0.53	0.014	0.67	4	0.53	0.014	0.67	4
22-P10	1.57	-0.005	0.72	5	1.57	-0.005	0.72	5
22-P05	-0.18	0.024	0.89	6	-0.13	0.023	0.88	6
31-1-P02-1	0.55	0.011	0.85	3	0.52	0.012	0.83	3
31-1-P02-2	0.40	0.014	0.84	3	0.53	0.012	0.89	3
31-2-P02-1	1.96	-0.013	0.22	3	1.96	-0.013	0.22	3
31-2-P02-2	-1.54	0.047	1.00	2	-1.54	0.047	1.00	2
31-1-P18-1	0.31	0.016	0.87	8	0.28	0.017	0.90	7
31-1-P18-2	0.19	0.018	0.87	8	0.17	0.019	0.90	7
31-2-P18-1	-0.32	0.026	0.62	8	-0.77	0.034	0.82	7
31-2-P18-2	-0.36	0.028	0.87	8	-0.48	0.030	0.94	7
32-1-P02-1	1.50	-0.004	0.39	5	0.60	0.011	0.47	4
32-1-P02-2	1.52	-0.005	0.41	5	1.27	0.000	0.00	4
32-2-P02-1	1.57	-0.005	0.56	5	1.06	0.003	0.01	4
32-2-P02-2	1.43	-0.003	0.23	5	0.67	0.010	0.86	4
32-2-L45	1.36	-0.003	1.00	2	1.36	-0.003	1.00	2
32-1-E1-1	1.28	-0.003	0.74	4	1.28	-0.003	0.74	4
32-1-E1-2	1.24	-0.002	0.31	4	1.24	-0.002	0.31	4
32-1-P19-1	1.31	-0.002	0.11	6	1.59	-0.008	0.52	4
32-2-P19-1	1.19	0.000	0.00	5	0.96	0.004	0.72	3
32-2-P19-2	1.20	0.000	0.00	5	0.90	0.005	0.78	3
32-2-P19-4	1.18	0.000	0.00	5	0.89	0.005	0.93	3

**Tabelle A.4:** Korrelationsergebnisse gemäß Variante 0, vgl. Abschnitt 5.4.2), *A*, *B* ... gem. Formel 2.14, *n* ... Anzahl der Proben

Die folgenden Diagramme stellen die Auswertung der Korrelation Backscatter/Schwebstoffkonzentration dar. Während die Diagramme in der rechten Spalte selbsterklärend sind, ist rechts oben die Korrelation mit Regressionsgerade und unterhalb befinden sich jene Ensembles, in denen die Proben entnommen wurden, abgedruckt. Um Platz zu sparen ist die Legende hierfür in Abbildung A.1 ausgelagert. Zusätzlich sind auf diesen Auswertungen die Schwebstoffproben eingetragen, wobei die dargestellten Nummern der

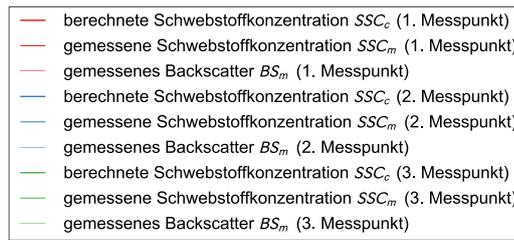
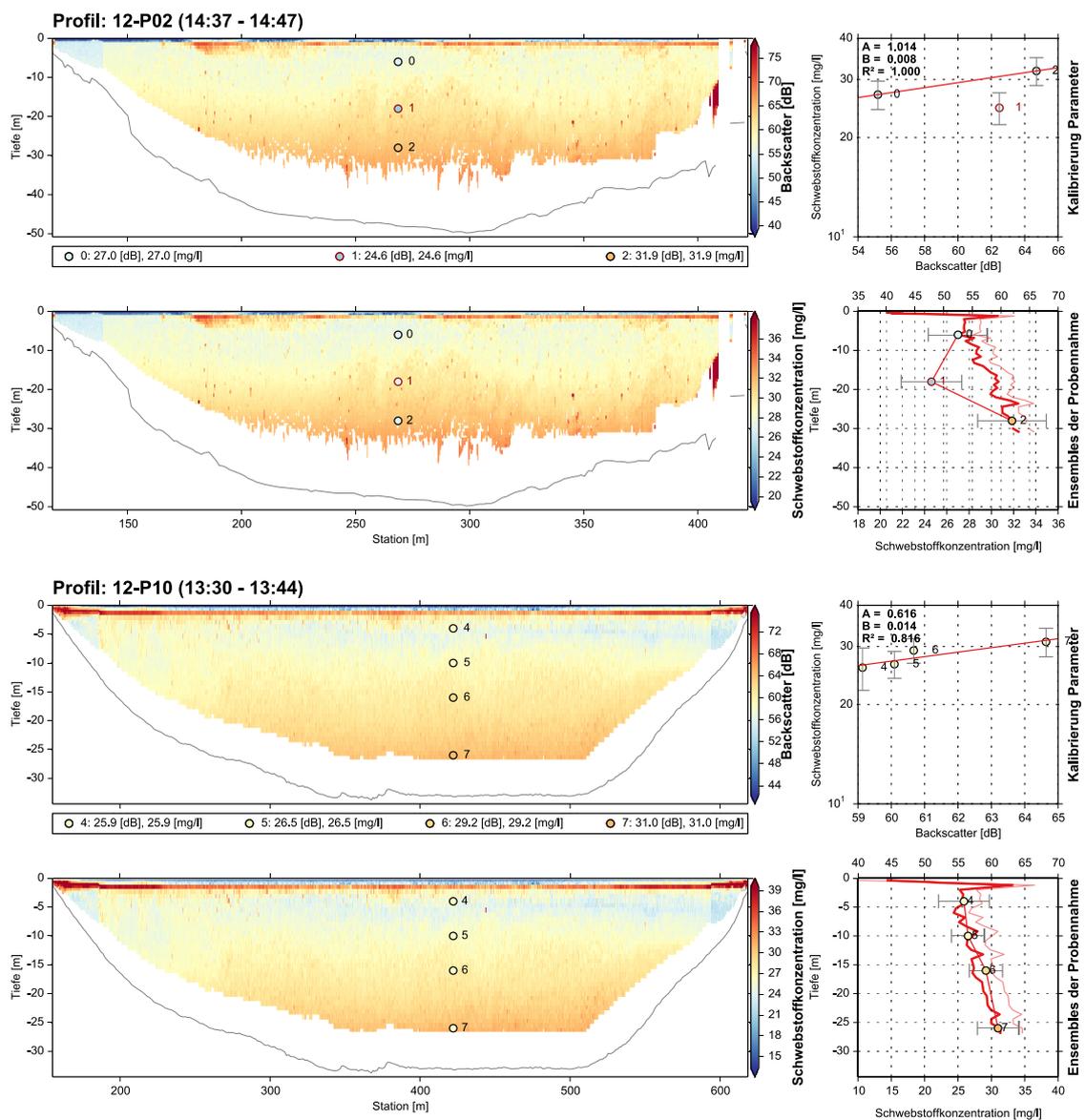
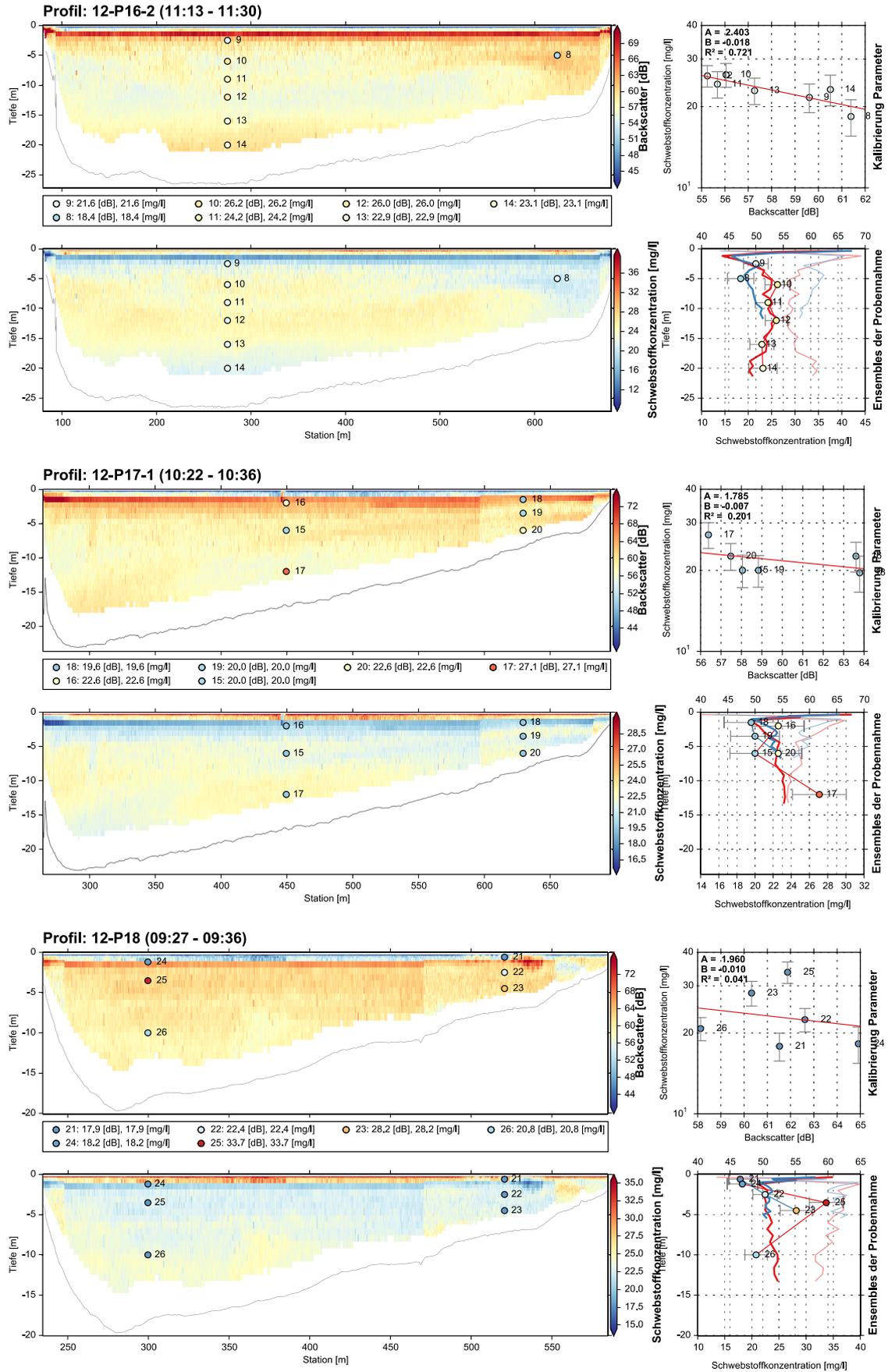


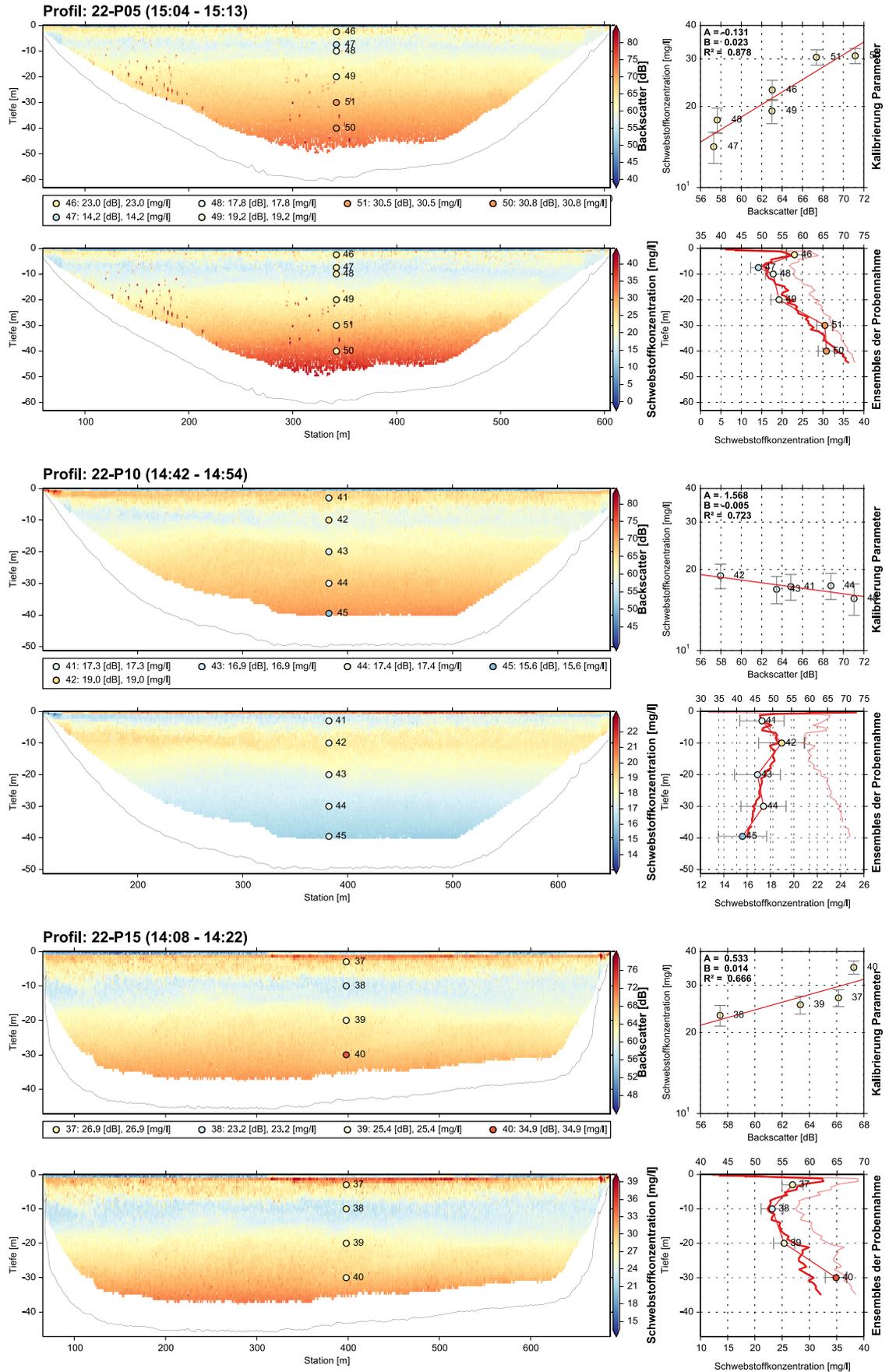
Abbildung A.1: Legende für Ensemble-Plots in Korrelations-Auswertung

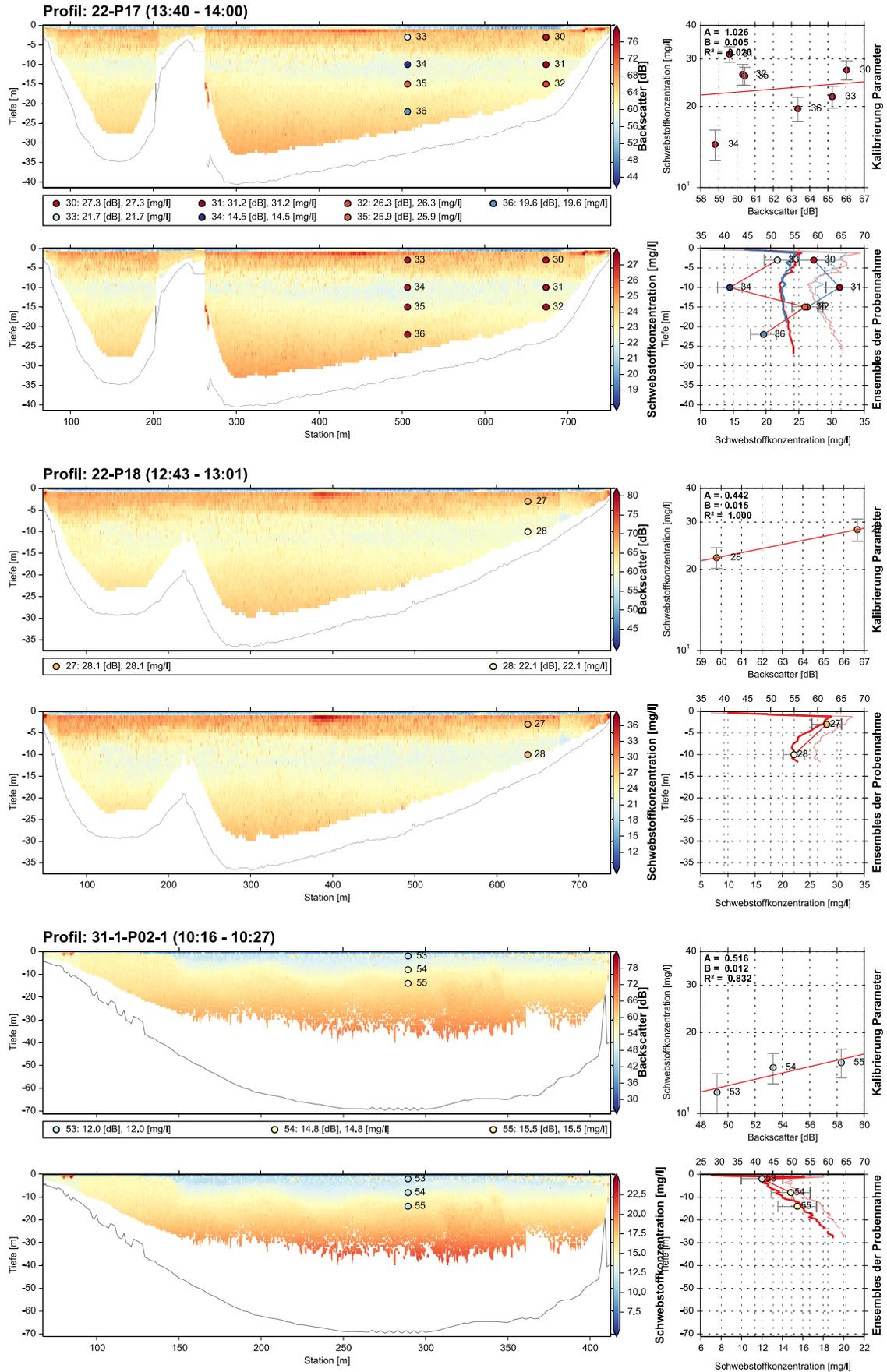
fortlaufende Teil der Proben-ID aus Tabelle A.3 sind. Ausreißer wurden von der Korrelation ausgenommen und sind dunkelrot dargestellt.

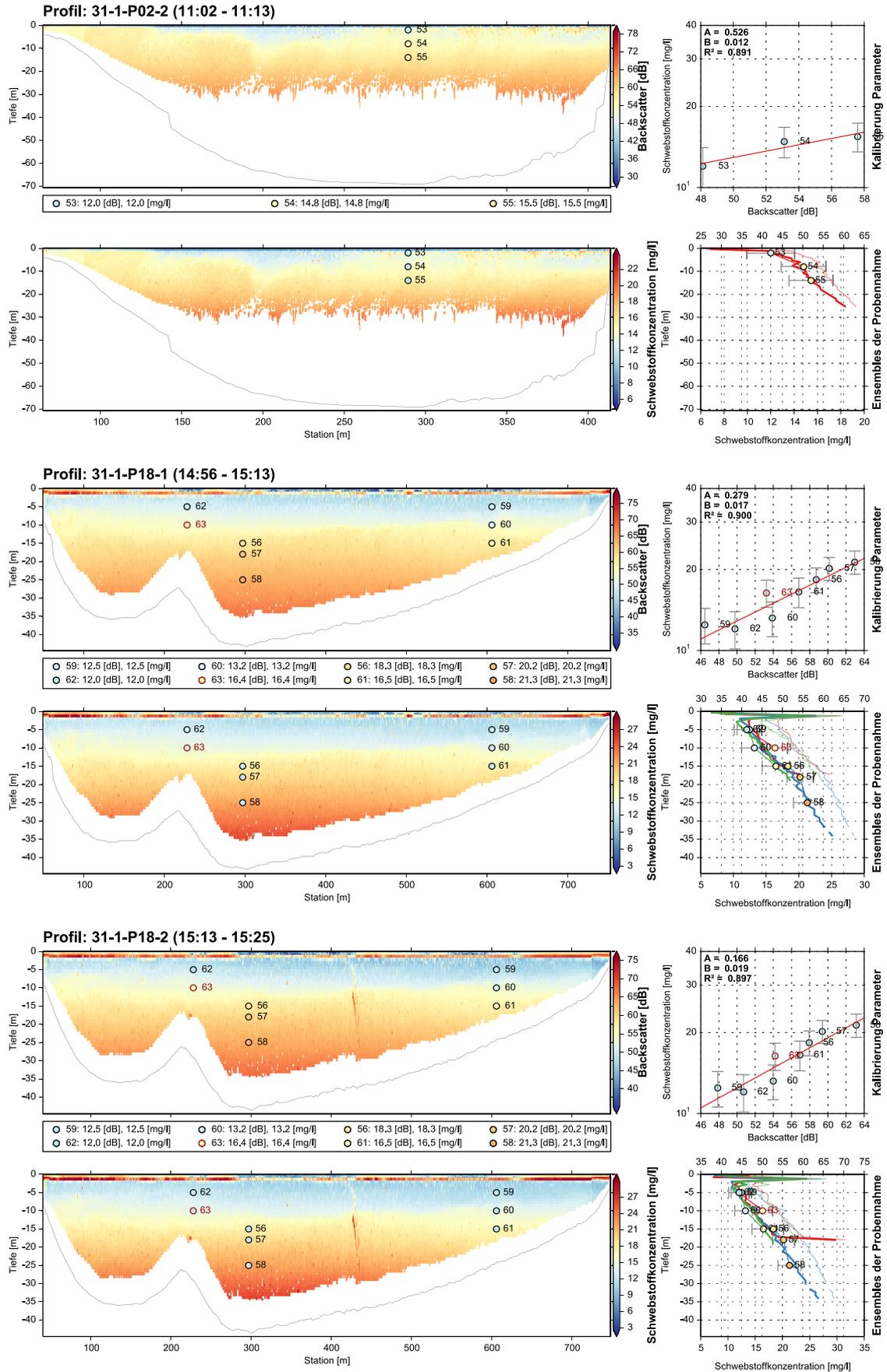
An dieser Stelle sei nochmals auf die Messfehler hingewiesen die hier nicht entfernt wurden. Insbesondere sind hier die Sprünge nahe der Wasseroberfläche im Backscatter-Verlauf zu nennen.

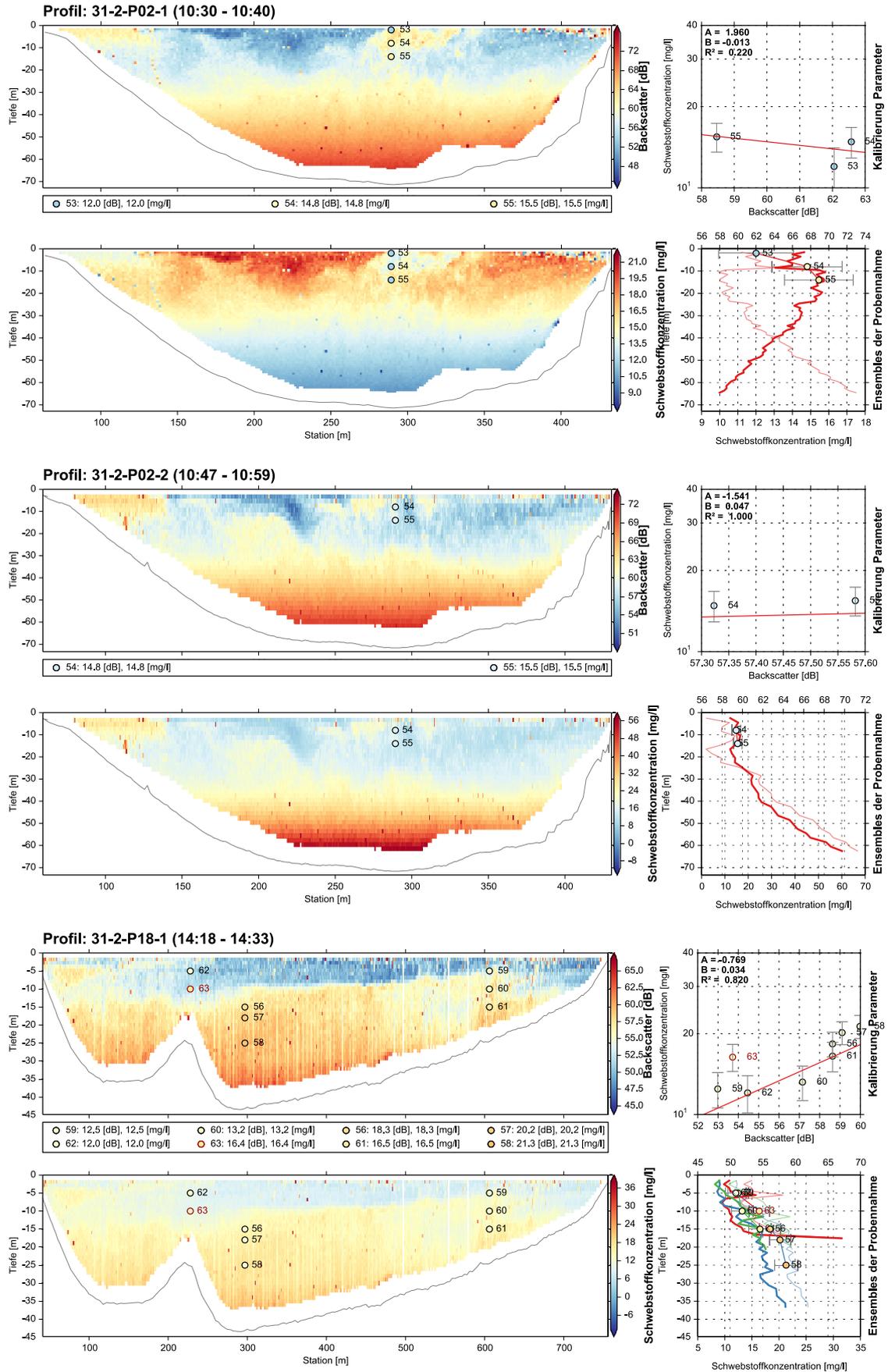


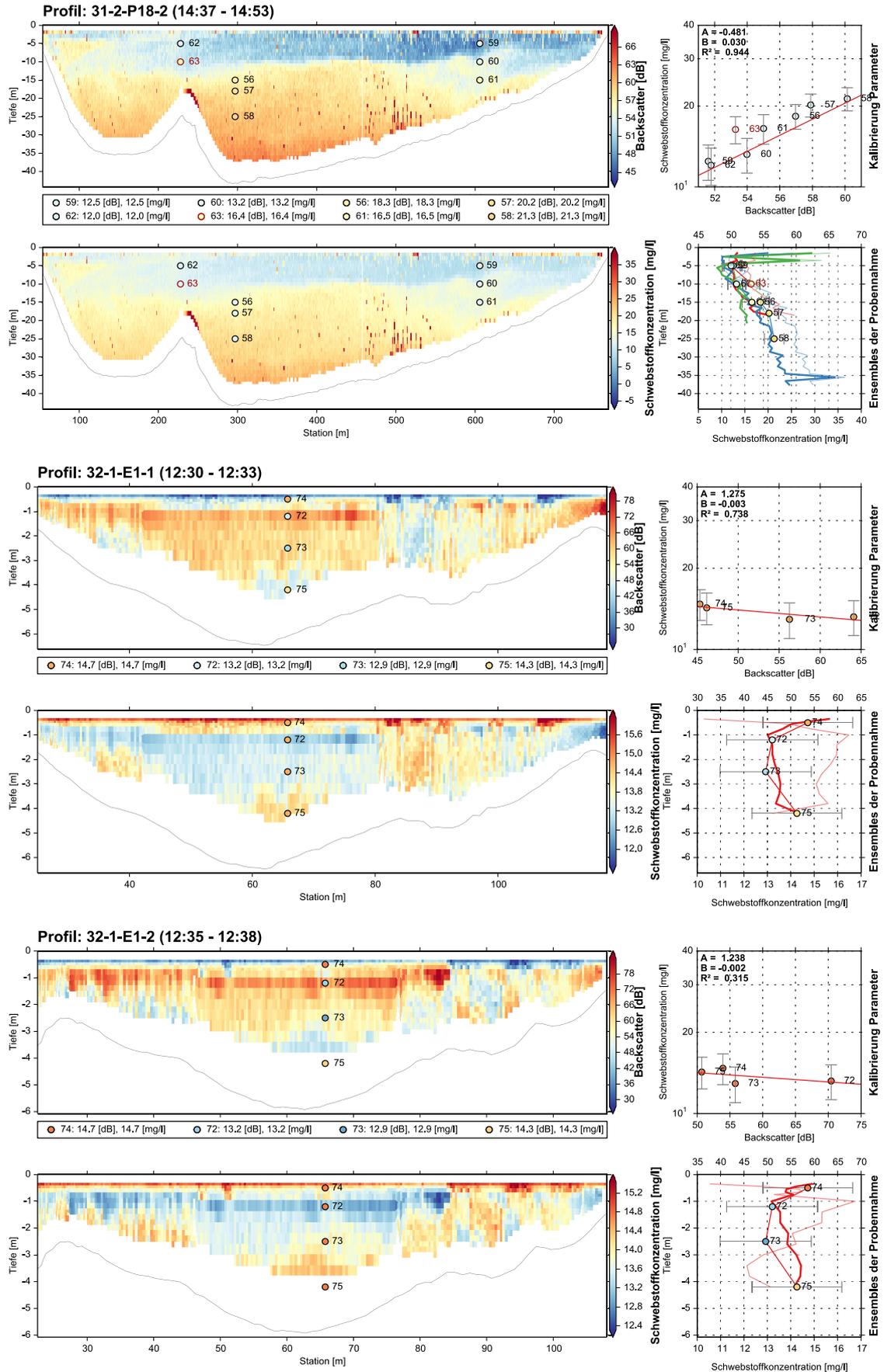


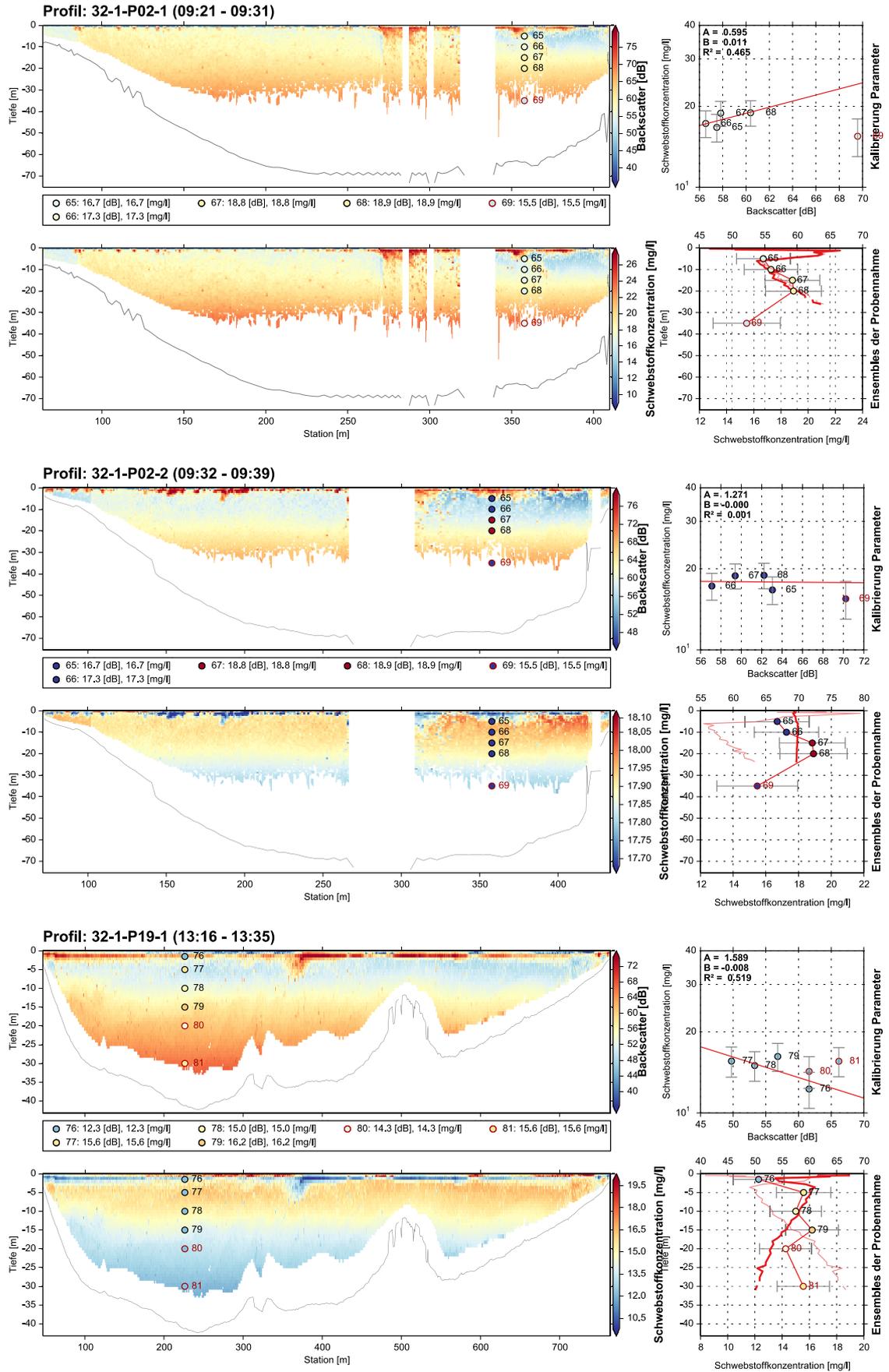


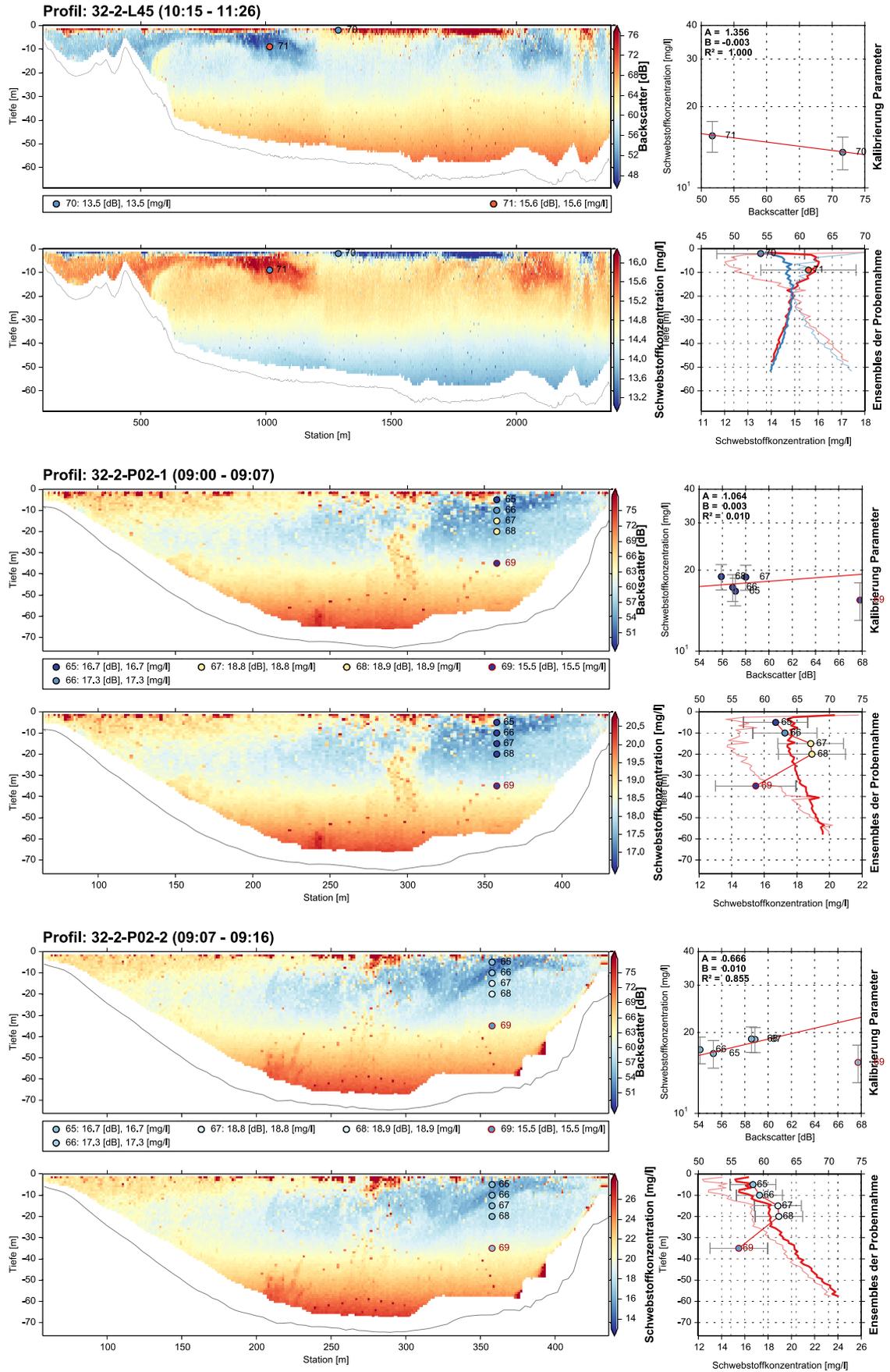


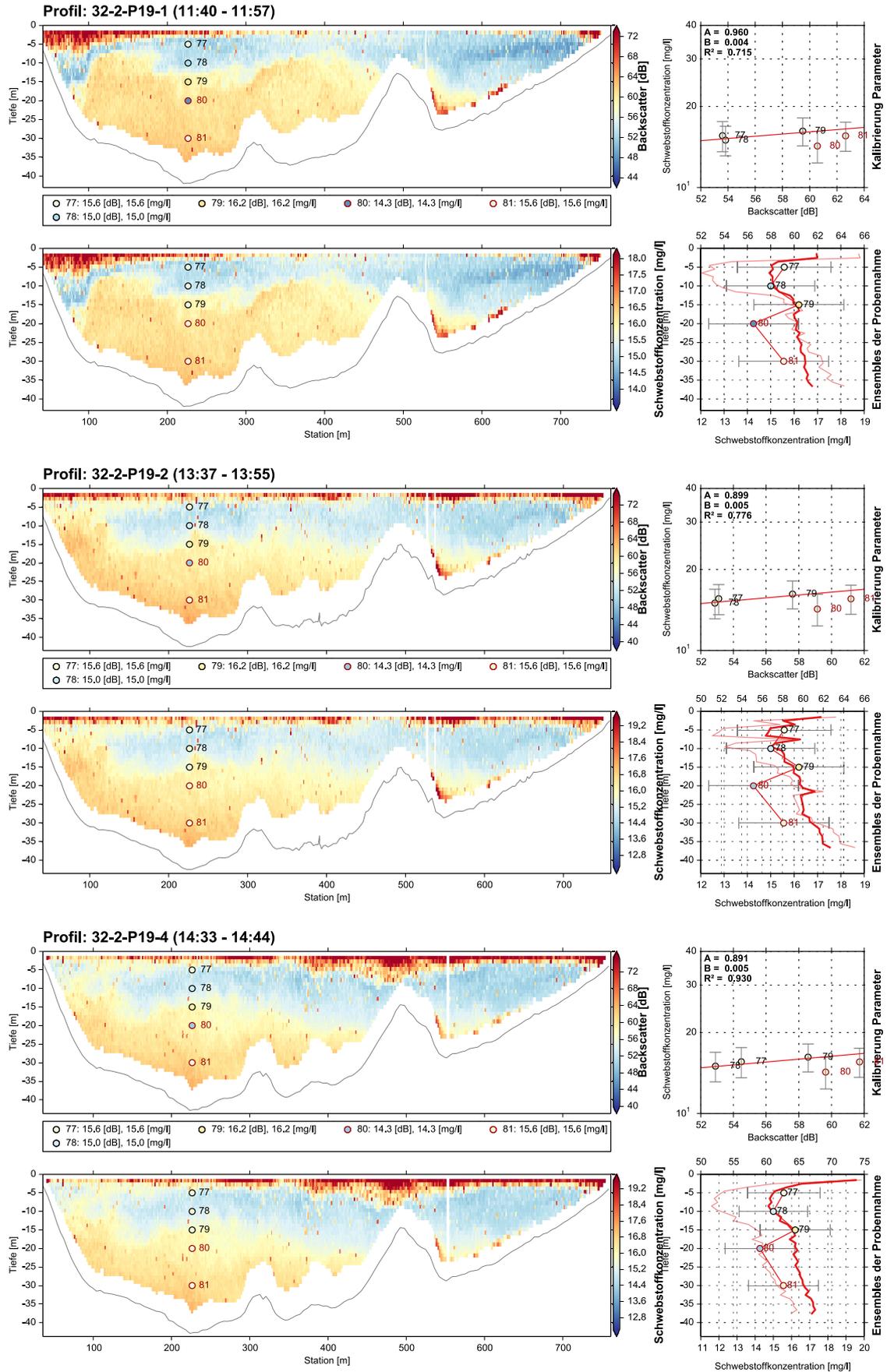












## A.5 Temperaturprofile

Die folgenden Daten stellen die mit dem Lichtlot gemessenen Temperaturprofile dar. Zeilen beginnend mit # bezeichnen die Temperatur-Profil-Nummer (nicht notwendigerweise ident mit der ADCP-Profil-ID). Darunter folgen zwei Spalten, wobei die erste als Wassertiefe und die zweite als gemessene Wassertemperatur in °C zu verstehen ist.

# 12-P18-1	2.5 9.0	2 9.7	1.0 10.1	40.0 7.1
0.6 11.2	6.0 7.4	4 9.3	2.0 9.9	
2.5 8.2	9 7.4	6 9.7	3.0 9.3	
4.5 7.2	12 7.3	8 8.4	5.0 9.1	# 31-P02
6.5 7.2	20 7.0	12 7.4	8.0 8.0	1 8.1
8.5 7.2	25 7.0		10.0 7.7	2 7.8
		# 22-E0	12.0 7.6	4 7.6
# 12-P18-2	# 12-P10-1	0 10.5	15.0 7.5	6 7.5
0.2 15.8	0.20 12	1 10.1	20.0 7.4	8 7.5
1.2 10.5	1 11.8	2 9.8	25.0 7.2	14 7.5
3.5 7.9	2 8.5		30.0 7.1	25 7.5
10 7.2	4 7.2	# 22-P17		
12 7.1	10 7.0	0 10.5	# 22-P10	# 32-P19
14 7.0	16 7.1	1 9.8	0.0 10.0	0 8.0
15 6.9	26 7.0	2.0 9.7	3.0 9.5	2 7.5
16 6.9		4.0 9.6	5.0 8.8	5 7.2
17 6.9	# 12-P05	6.0 9.3	5.5 8.1	10 7.0
	0.2 9.5	8.0 9.1	6.0 8.0	15 7.0
# 12-P17-2	1 8.8	10.0 9.1	7.0 8.0	20 6.8
0.2 14.4	2 7.7	12.0 8.1	8.0 7.6	30 6.9
1.5 9.3	4 7.6	14.0 7.3	10.0 7.4	
3.5 7.6	8 7.2	15.0 7.8	15.0 7.3	# 32-E1
4.5 7.3	12 6.9	16.0 7.4	20.0 7.2	0 7.6
6 6.9	16 6.9	20.0 7.2	25.0 7.2	0.5 7.6
8 6.9	20 6.9		30.0 7.2	1.0 7.4
	25 6.9	# 22-P16	40.0 7.1	1.5 7.3
# 12-P17-1		0.0 10.1	50.0 7.1	2 7.2
0.2 12.0	# 12-P10-2	1.0 10.1	60.0 7.1	3 7.2
2 9.8	0.2 12.5	2.0 9.7		
4 7.6	2 8.9	3.0 9.5	# 22-P05	# 32-P02
6 7.1	2.5 7.9	4.0 9.4	0.0 9.8	0 8.2
12 7	3.0 7.4	6.0 9.2	2.5 9.0	5 7.9
16 7	6 7.4	7.0 9.4	5.0 8.1	10 7.2
	18 6.9	8.0 8.3	7.5 7.9	15 7.3
# 12-P16-1	30 6.8	10.0 8.0	10.0 7.5	20 7.5
5 9.5	40 6.8	15.0 7.6	15.0 7.3	35 7.4
7 9.0		22.0 7.4	20.0 7.2	
	# 22-P18		25.0 7.2	
# 12-P16-2	0 9.8	# 22-P15	30.0 7.1	
0.2 11.8	1 9.7	0.0 10.2	35.0 7.2	

# Literatur

- Deines, Kent L (1999). „Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers“. In: *Current Measurement, 1999. Proceedings of the IEEE Sixth Working Conference on*. IEEE, S. 249–253.
- Dinehart, R.L. und J.R. Burau (2005). „Repeated surveys by acoustic Doppler current profiler for flow and sediment dynamics in a tidal river“. In: *Journal of Hydrology* 314.1-4, S. 1–21. doi: 10.1016/j.jhydrol.2005.03.019. url: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.03.019>.
- Downing, Andrew, Peter D Thorne und Christopher E Vincent (1995). „Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 97, S. 1614.
- Felix, David, Ismail Albayrak und Robert M Boes (2013). „Laboratory investigation on measuring suspended sediment by portable laser diffractometer (LISST) focusing on particle shape“. In: *Geo-Marine Letters* 33.6, S. 485–498.
- Gartner, Jeffrey W. (2004). „Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California“. In: *Marine Geology* 211, S. 169–187.
- Gray, John R, Yogesh C Agrawal und H Charles Pottsmith (2004). „The LISST-SL streamlined isokinetic suspended-sediment profiler“. In: *Proceedings of the 9th International Symposium River Sedimentation China*.
- Guerrero, M., N. R  ther und R. Archetti (2014). „Comparison under controlled conditions between multi-frequency {ADCPs} and LISST-SL for investigating suspended sand in rivers“. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 37, S. 73–82. issn: 0955-5986. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.03.007>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598614000326>.
- Guerrero, M., R.N. Szupiany und M. Amsler (2011). „Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation“. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 22.5, S. 392–401. issn: 0955-5986. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.06.003>. url: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955598611000689>.

- Haimann, Marlene (2007). „Schwebstoffmonitoring an der Sulm und an der Enns“. Magisterarb. Universität für Bodenkultur Wien.
- Hohenwarter, Barbara (2004). „Bestimmung von Strömungs- und Transportvorgängen in einem Hochgebirgsstausee“. Magisterarb. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.
- LISST-SL Operating Manual* (2011). Sequoia Scientific Inc. Bellevue, WA 98005, USA.
- RDI (2006). *Acoustic Doppler Current Profiler Principles of Operation: A Practical Primer*. Teledyne RD Instruments.
- (2013). *WinRiver II - Software User's Guide*. Teledyne RD Instruments.
- Schulkin, M und HW Marsh (1962). „Sound absorption in sea water“. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 34, S. 864.
- Schwebstoffe im Fließgewässer - Leitfaden zur Erfassung des Schwebstofftransportes* (2008).
- Steidl, Jakob (2013). *ADCPtool: A postprocessing framework for ADCP measurements - User Manual*. Techn. Ber. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Graz.
- Urick, Robert (1983). *Principles of Underwater Sound. 3rd Edition*. McGraw-Hill. isbn: 0070660867.
- Wall, Gary R, Elizabeth A Nystrom und Simon Litten (2006). *Use of an ADCP to compute suspended-sediment discharge in the tidal Hudson River, New York*. Techn. Ber. U. S. Geological Survey.

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersichtskarte Projektgebiet . . . . .	2
2.1	Definition von räumlichen Unterteilungen . . . . .	5
2.2	Diagramm Range Gating . . . . .	6
2.3	Ablaufdiagramm zur profilweisen Berechnung der Schwebstoffkonzentrationen . . . . .	11
3.1	Fotos Messboote . . . . .	14
3.2	links: beide ADCP-Geräte, rechts: Schwebstoffprobennahme . . . . .	15
3.3	LISST-SL . . . . .	17
3.4	Funktionsschema LISST, Beugung Lichtspalt . . . . .	18
3.5	Übersicht Messdaten, MK1 . . . . .	20
3.6	Übersicht Messdaten, MK2 . . . . .	21
3.7	Übersicht Messdaten, MK3 . . . . .	22
3.8	Messprofile laut GPS, MK1 . . . . .	23
3.9	Messprofile laut GPS, MK2 . . . . .	23
3.10	Messprofile laut GPS, MK3 . . . . .	23
3.11	Verwendete Bezeichnungen für Messdaten . . . . .	25
4.1	Bottom Tracking Problem Profil 12-P16 . . . . .	27
4.2	Zu- und Abflüsse in den Speicher während der Messkampagne 1 . . . . .	28
4.3	Übersicht Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 1 . . . . .	28
4.4	Tiefen-gemittelte Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 1 . . . . .	29
4.5	Zu- und Abflüsse in den Speicher während der Messkampagne 2 . . . . .	30
4.6	Übersicht Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 2 . . . . .	31
4.7	Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 2 . . . . .	32
4.8	Zu- und Abflüsse in den Speicher während der Messkampagne 3 . . . . .	33
4.9	Übersicht Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 2 . . . . .	34
4.10	Tiefengemittelte Fließgeschwindigkeiten, Messkampagne 3 . . . . .	35
4.11	Verteilung der profilweisen Durchschnittsgeschwindigkeiten . . . . .	36
4.12	Korrelationen für die Medianwerte und Standardabweichungen der Durchflüsse . . . . .	37
4.13	Gemessener Durchfluss für jedes Profil in den einzelnen Komponenten . . . . .	38

4.14	Verteilung der profilweisen Durchflüsse . . . . .	38
5.1	Gemessene Temperaturverläufe . . . . .	40
5.2	Schwebstoffkonzentrationen in Abhängigkeit der Tiefe (links), Häufigkeitsverteilung (rechts) . . . . .	41
5.3	Schwebstoffkonzentrationen für 22-P10. Die Größtfehler liegen etwa im Schwankungsbereich der einzelnen Proben. . . . .	42
5.4	Boxplot profilweiser Schwebstoffkonzentrationen . . . . .	42
5.5	Charakteristische Backscatter-Verläufe . . . . .	45
5.6	Vergleich RioGrande und RiverRay in Profil P18, MK31 . . . . .	46
5.7	Vergleich RioGrande und RiverRay in Profil P2, MK3 . . . . .	47
5.8	Korrelation für alle Proben ( $r \geq 2.1m$ ), $R^2 = 0.20$ . . . . .	49
5.9	Korrelation für MK1 ( $R^2 = 0.10$ ) und MK2 ( $R^2 = 0.08$ ) . . . . .	49
5.10	Korrelation für MK3 - RiverRay ( $R^2 = 0.32$ ) und MK3 - RioGrande ( $R^2 = 0.09$ ) . . . . .	50
5.11	Korrelation für nördlichen ( $R^2 = 0.04$ ) und südlichen Bereich ( $R^2 = 0.34$ ) . . . . .	50
5.12	Korrelation mit Proben aus Profilen mit $R^2 > 0,7$ . . . . .	51
5.13	Vergleich verschiedener Ansätze nach RDI und Dinehart . . . . .	53
5.14	Vergleich in der <i>near zone distance</i> . . . . .	53
5.15	Übersicht Bestimmtheitsmaße $R^2$ im Variantenvergleich (inkl. Ausreißer) . . . . .	55
5.16	Auswirkungen der Temperatur $T_S$ auf die Backscatter-Werte in verschiedenen Tiefen $R$ . . . . .	56
5.17	Gegenüberstellung Korrelationskoeffizient $r$ mit und ohne Ausreißer (AR) in Schwebstoffproben . . . . .	56
A.1	Legende für Ensemble-Plots in Korrelations-Auswertung . . . . .	121

# Tabellenverzeichnis

1.1	Kennwerte der Kraftstufen . . . . .	2
1.2	Kennwerte der Speicher . . . . .	2
3.1	Termine Messkampagnen . . . . .	13
3.2	Gegenüberstellung Kennwerte für die ADCP-Geräte . . . . .	15
3.3	Messbereiche des LISST-SL . . . . .	17
5.1	Klassifizierung der gemessenen Querprofile nach Backscatter-Verlauf für jede Messkampagne . . . . .	44
A.1	Verwendete Parameter für die Nachbearbeitung der ADCP-Daten . . . . .	62
A.2	Tabellarische Auswertung Geschwindigkeitsdaten . . . . .	116
A.3	Ergebnisse der Laborauswertung der Schwebstoffproben . . . . .	119
A.4	Korrelationsergebnisse für Variante 0 . . . . .	120